

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2022

Том 5

№ 4

Журнал основан в 2018 г.
Выходит 4 раза в год

Почетный главный редактор

Гуляев Юрий Васильевич — научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, академик, член Президиума РАН (Москва, Россия)

Главный редактор

Вольвач Александр Евгеньевич — доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» (Крым, Россия)

Редакционная коллегия

Абрамов Игорь Иванович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика приборов микро- и нанoeлектроники» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Громов Дмитрий Викторович — доктор технических наук, профессор отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ, главный научный сотрудник центра экстремальной прикладной электроники институт нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Москва, Россия)

Ермолов Павел Петрович — кандидат технических наук, заведующий базовой кафедрой «Инновационная радиоэлектроника» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия) — заместитель главного редактора

Иванов Вячеслав Элизбарович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Калошин Вадим Анатольевич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией «Электродинамика композиционных сред и структур» Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, профессор кафедры «Радиотехника и системы управления» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт — национальный исследовательский университет» (Москва, Россия)

Кураев Александр Александрович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Носков Владислав Яковлевич — доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (Екатеринбург, Россия)

Обухов Илья Андреевич — доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора по научной работе НПП «Радиотехника» (Москва, Россия)

Пестриков Виктор Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры аудиовизуальных систем и технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения» (Санкт-Петербург, Россия)

Пестряков Александр Валентинович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиооборудование и схемотехника», руководитель научно-исследовательского отдела «Радиотехнические системы и устройства» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (Москва, Россия)

Совлуков Александр Сергеевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)

Старостенко Владимир Викторович — доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой радиофизики и электроники Физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» (Симферополь, Россия)

Широков Игорь Борисович — доктор технических наук, профессор кафедры «Электронная техника» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

Международный редакционный совет

Афонин Игорь Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы и технологии» Института радиоэлектроники и информационной безопасности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

Богуш Вадим Анатольевич — доктор физико-математических наук, профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Iicev Dimov Stojce — professor at Durban University of Technology (South Africa)

Nemai Chandra Karmakar — associate professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

Нечаев Владимир Дмитриевич — доктор политических наук, профессор РАО, ректор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Севастопольский государственный университет» (Севастополь, Россия)

Новиков Владимир Витальевич — доктор технических наук, профессор кафедры ракетного вооружения надводных кораблей федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова» (Севастополь, Россия)

Содержание

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, and M. G. Dembelov, Determination of Forest Environment Density by Georadar “OKO-2”	429
Эрин Ф. А., Вебер В. И., Куприц В. Ю., Нетесов А. А. Метрики оценки качества работы классификатора малоразмерных объектов на радиолокационном изображении, полученном с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой	436
Широков И. Б., Сердюк И. В., Азаров А. А., Широкова Е. И. Исследование системы беспроводной передачи энергии	445
Полетаев Д. А., Мальцев К. С., Майко В. В., Власов В. П. Применение СВЧ измерений для сортировки составных элементов археологических объектов	458
Алдонин Г. М., Черепанов В. В. Модель процесса самоорганизации водителя ритма сердца	472
Леушин В. Ю., Агасиева С. В., Веснин С. Г., Седанкин М. К., Порохов И. О., Ветрова Н. А., Горлачева Е. Н., Сидорова М. И. Задачи совершенствования медицинских антенн для микроволновой радиотермометрии биологических объектов (обзор)	484
Чижигов С. В., Попов В. В., Тихомиров В. Г., Соловьев Ю. В., Агандеев Р. В. Элементная база МИС СВЧ для многоканального многочастотного радиотермометра	515
Гудков А. Г., Веснин С. Г., Соловьев Ю. В., Тихомиров В. Г., Попов В. В. Перспективы микроминиатюризации многоканальных многочастотных радиотермографов	531
Герасимов Ю. М., Петричкович Я. Я. Радиационно-стойкие СБИС СнК и ОЗУ — особенности проектирования по КМОП технологиям объемного кремния	548

История науки и техники (5.6.6)

Пузанков Л. А. Конструкторская деятельность крымских радиолюбителей	570
Пестриков В. М. Роберт Милликен и его роль в рождении современных радиоламп	587

INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES

2022

Vol. 5

No. 4

The journal was founded in 2018
Published 4 times a year

Honorary Chief Editor

Gulyaev Yury Vasilievich – Scientific Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, academician, member of the Presidium of the RAS (Moscow, Russia)

Editor in Chief

Volvach Alexander Evgenievich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Research of the Federal State Budgetary Institution of Science “Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences” (Crimea, Russia)

Editorial Board

Abramov Igor Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the Research Laboratory “Physics of Micro- and Nanoelectronics Devices” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Gromov Dmitry Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the Office of Educational Programs, Chief Researcher of the Center for Extreme Applied Electronics Institute of Nanotechnologies in Electronics, Spintronics and Photonics of the National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow, Russia)

Yermolov Pavel Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Basic Department “Innovative Radio Electronics” of the Institute of Radio Electronics and Information Security of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia) – Deputy Editor-in-Chief

Ivanov Vyacheslav Elizbarovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin” (Ekaterinburg, Russia)

Kaloshin Vadim Anatolyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory “Electrodynamics of Composite Media and Structures” of the Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, Professor of the Department of Radio Engineering and Control Systems of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Moscow Institute of Physics and Technology – National Research University” (Moscow, Russia)

Kuraev Aleksandr Aleksandrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Information Radio Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Noskov Vladislav Yakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin” (Ekaterinburg, Russia)

Obukhov Ilya Andreevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy General Director for Research, Radiotekhnika Co. (Moscow, Russia)

Pestrikov Victor Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Audiovisual Systems and Technologies of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg State Institute of Film and Television” (St. Petersburg, Russia)

Pestryakov Alexander Valentinovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Equipment and Circuitry, Head of the Research Department of Radio Engineering Systems and Devices of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Moscow Technical University of Communications and Informatics” (Moscow, Russia)

Sovlukov Alexander Sergeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Control Problems named after V. A. Trapeznikov RAS (Moscow, Russia)

Starostenko Vladimir Viktorovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Radiophysics and Electronics of the Physico-Technical Institute of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky” (Simferopol, Russia)

Shirokov Igor Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronic Engineering of the Institute of Radio Electronics and Information Security of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

International Editorial Council

Afonin Igor Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Radioelectronic Systems and Technologies” of the Institute of Radioelectronics and Information Security of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

Bogush Vadim Anatolyevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Ilcev Dimov Stojce – Professor at Durban University of Technology (South Africa)

Nemai Chandra Karmakar – Associate Professor at Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University (Australia)

Nechaev Vladimir Dmitrievich – Doctor of Political Sciences, Professor of the Russian Academy of Education, Rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University” (Sevastopol, Russia)

Novikov Vladimir Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Missile Weapons of Surface Ships of the Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education “Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P. S. Nakhimov” (Sevastopol, Russia)

Address:

Sevastopol State University
33, Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
E-mail: icrt.mail@mail.ru
Website: <http://icrtjournal.com>

Contents

Electronics, photonics, instrumentation and communications

Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, and M. G. Dembelov, Determination of Forest Environment Density by Georadar “OKO-2”	429
F. A. Erin, V. I. Weber, V. Yu. Kuprits, and A. A. Netesov, Metrics for Assessing the Quality of the Work of a Classifier of Small Objects on a Radar Image Obtained Using a Synthetic Aperture Radar	436
I. B. Shirokov, I. V. Serdyuk, A. A. Azarov, and E. I. Shirokova, Study of System of Wireless Power Transfer	445
D. A. Poletaev, K. S. Maltsev, V. V. Maiko, and V. P. Vlasov, The Use of Microwave Measurements for Sorting the Constituent Elements of Archaeological Objects	458
G. M. Aldonin and V. V. Cherepanov, Model of the Process of Self-Organization of the Heart Rhythm	472
V. Yu. Leushin, S. V. Agasieva, S. G. Vesnin, M. K. Sedankin, I. O. Porokhov, N. A. Vetrova, E. N. Gorlacheva, and M. I. Sidorova, Tasks of Improving Medical Antennas for Microwave Radiothermometry of Biological Objects (review)	484
S. V. Chizhikov, V. V. Popov, V. G. Tikhomirov, Yu. V. Solov’ev, and R. V. Agandeev, The Element Base of the MIC Microwave for a Multichannel Multi-Frequency Radiothermometer	515
A. G. Gudkov, S. G. Vesnin, Yu. V. Solov’ev, V. G. Tikhomirov, and V. V. Popov, Prospects of Microminiaturization of Multichannel Multi-Frequency Radiothermographs	531
Yu. M. Gerasimov and Ya. Ya. Petrichkovich, Radiation-Hardened VLSI SoC and RAM – Design Features for Bulk Silicon CMOS Technologies	548

History of science and technology

L. A. Puzankov, Design Activity of the Crimean Radio Amateurs	570
V. M. Pestrikov, Robert Millikan and His Role in the Birth of Modern Radio Tubes	587

Determination of Forest Environment Density by Georadar “OKO-2”

Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, and M. G. Dembelov

*Institute of Physical Materials Science,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6, Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation
buddich@mail.ru; vkhaptanov@mail.ru; mdembelov@mail.ru*

Received: March 25, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: A radar method for surveying forests based on GPR technology is proposed, which allows measuring the density of the forest environment with an error of $\pm 5\%$. The forest is irradiated by a georadar installed on a car. Counting the number of reflections from tree trunks (hyperbolas) in a given area allows you to quickly and reliably determine the number of trees per unit area (ar) and recalculate into forest density. A clearer radargram of reflections from tree trunks was obtained with vertical polarization, i.e. the signal reflected from the tree trunk is higher when the polarization of the probing electromagnetic pulse is parallel to the trunk.

Keywords: georadar method, forest environment, ground penetrating radar, forest density.

For citation (IEEE): Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, and M. G. Dembelov, “Determination of Forest Environment Density by Georadar ‘OKO-2’,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 429–435, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.31.

1. Introduction

An important and not yet fully resolved issue in the physics of wave processes is to take into account the influence of vegetation cover on the propagation of electromagnetic waves. Coniferous, deciduous, mixed and tropical forests [1] occupy over 40% of the Earth's land mass. At the same time, the steppe regions are 70% covered with cereal crops, orchards, cotton, coffee and tea plantations. Therefore, the development of models that allow qualitatively assessing and quantitatively predicting the parameters of the electromagnetic field in the Earth-ionosphere waveguide channel in the presence of vegetation is a very urgent task

[2]. Accounting for the influence of vegetation cover is of independent importance for predicting electromagnetic fields during the operation of various radio-electronic systems in order to improve the reliability of information transmission by radio communications, improve the accuracy of both stationary and, especially, mobile radio navigation systems, as well as to improve the accuracy of location of thunderstorm activity centers. and other sources of electromagnetic radiation for multipoint measurements. The review of the literature presented in [2] provides a fairly detailed analysis of the few experimental data and methods for calculating electromagnetic fields in the presence of vegetation in the ranges of medium, long, and superlong waves. The main element of the vegetation cover is a separate tree of the forest [2]. At the same time, trees have different geometric characteristics depending on the type (coniferous: spruce, pine, cedar, larch, etc., deciduous: birch, aspen, oak, alder, etc.). Depending on the age of the trees, their height and diameter change, as well as the height of the crown from the ground and the diameter of the tree crown. At the same time, the wood of tree trunks has a certain specific electrical conductivity, which depends on the ambient (air) temperature in accordance with the change in the nature of the life of trees. Therefore, the representation of an individual tree and a forest area as a whole in a certain model that takes into account the above geometric and electrical characteristics is a very urgent task. The theoretical analysis and the results of experimental studies of electromagnetic field distortions in the presence of a separate tree, which is the main element of the vegetation cover, made it possible to represent the tree in the model of a vertical electric reradiator with a capacitive load. In this case, the complex resistance of an individual tree in the model of a vertical electric re-emitter with a capacitive load is completely determined by the geometric characteristics of the trunk and crown of the tree, taking into account the specific electrical conductivity of the wood of the tree trunk, which gives good agreement between theory and experiment [2]. The effective complex resistance can be determined using well-known formulas that are valid for a leaky capacitor, which include the geometric dimensions of the tree, and take into account the dependence of the specific electrical conductivity of the wood of the tree trunk on the ambient temperature.

The purpose of the work is to propose and substantiate experimentally a georadar method for measuring the density of the forest environment, which makes it possible to quickly and reliably survey forest areas.

2. Equipment and experimental technique

On the territory of Russia [1], forests cover an area of more than 7 million km^2 , of which in the Baikal and Transbaikal regions – 960 thousand km^2 (60% of the territory). The main role in Siberia is played by coniferous forests – pine,

larch, spruce, cedar. Of the hardwoods, birch and aspen are the most widespread. The pine forests that prevail in the Siberian region usually grow on dry sandy soils and on the southern slopes of the mountains. The height of the trees varies from 5 to 30 m, on average 10–20 m; trunk diameter – from 0.1 to 0.8 m, on average 0.15–0.35 m. In open places, the height of trees is lower than in dense forest. To predict the propagation of radio waves along the earth's surface covered with forest, it is necessary to know both the electrical parameters of forest vegetation ($\sigma_{\text{л}}$ и $\varepsilon_{\text{л}}$) and the density of the forest environment. There is a limited amount of experimental data in the literature [3, 4] obtained under various physical and geographical conditions (subtropics, the European part of Russia, North America). Georadar (ground penetrating radar) method is based on the phenomenon of reflection of electromagnetic waves from media and surfaces on which the electrical properties change¹. The main parameter of the medium in the range of meter and decimeter radio waves is its dielectric constant ε . The OKO-2 georadar used in the measurements includes emitting (field source) and receiving (receiver) antennas. The source emits an electromagnetic wave of a given frequency in the form of a finite one and a half period pulse. The forest is irradiated by a GPR mounted on a vehicle, which moves along the profile during GPR survey, usually along a forest road. Counting the number of reflections from trunks in a given area allows you to quickly determine the density of the forest. An electromagnetic wave in the study medium is reflected from the boundaries of the layers and various inhomogeneities with different dielectric properties. At each point of the profile, a radar trace is recorded – the dependence of the signal amplitude on the time of arrival of the reflected signal. A set of traces along the entire profile makes up a radarogram. The first reflection on the radarogram is called the direct signal (direct signal). The direct wave is in most cases the same for all profile traces. It is determined by the design of the antenna and the profile surface. When the georadar moves along the profile, reflection from local objects or boundaries of media with different dielectric constants occurs. A set of reflections can form a straight line, in the case of a boundary, or a hyperbola (hyperbolic curve) in the case of reflections from a local object, while the object itself is at the top of this hyperbola (Fig. 1)². A diffracted wave from a local object is described by the following equation:

$$t(x) = \frac{2L}{V} = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V},$$

¹ Radio technical device for subsurface sounding (ground penetrating radar) "Oko-2". Technical description. User manual. Moscow, LLC "Logic Systems," 2006.

² GeoScan32. Illustrated user manual. Ramenskoye. Moscow region: LOGIS, 2013.

where x is the distance from the projection point of the object on the surface to the point on the profile, $t(x)$ is the time of passage of the electromagnetic pulse in the medium along the “emitter-object-receiver” path, L is the distance from the georadar to the object at depth h , V is the speed radio pulse propagation in the medium: 0.3 m/ns in air.

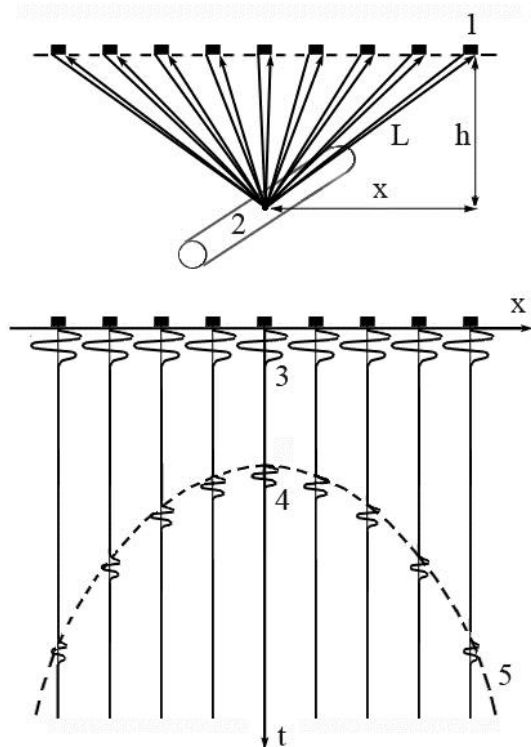


Fig. 1. Display of a local object – a tree trunk and a temporal picture of the GPR signal reflected from it. 1 – ground penetrating radar; 2 – local object; 3, 4 – direct and reflected wave, 5 – hyperbolic curve (dotted line)

3. Discussion of the results

Let us consider the results of studying the characteristics of the forest environment (coniferous forest) using the OKO-2 georadar with the AB-400 antenna unit. The forest is irradiated by a georadar installed on a car moving along the forest road (Fig. 2).

The tree trunk is a vertical cylindrical re-radiator with electrodynamic parameters that are significantly different from the ground air: specific electrical conductivity $\sigma_{\pi} = 10^{-2} - 10^{-3}$ S/m and dielectric constant $\varepsilon_{\pi} = 4 - 30$ [2]. On the

radarogram (Fig. 2), reflections from tree trunks in the form of hyperbolas are clearly and contrastingly distinguished.



Fig. 2. Test plot of the forest. The arrow shows the trajectory of the car with the OKO-2 georadar with the AB-400 antenna unit

The measurements were carried out for horizontal and vertical polarizations of the electromagnetic field. A clearer radarogram of reflections from tree trunks was obtained with vertical polarization of the electromagnetic field. This

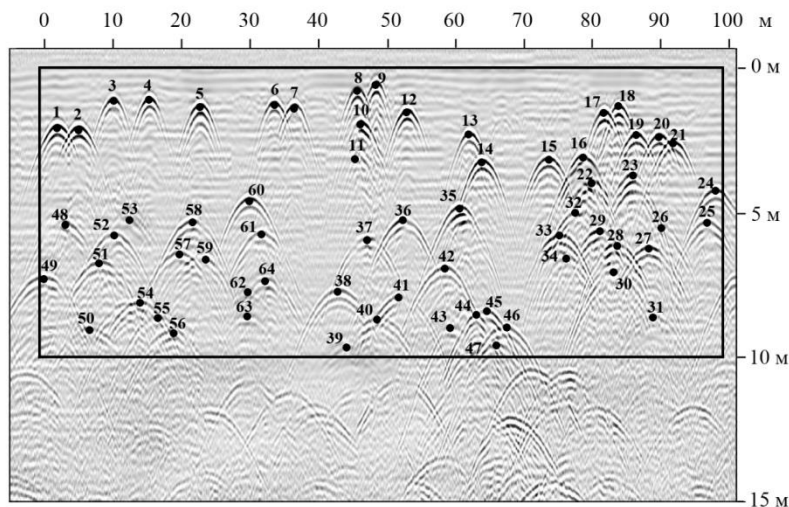


Fig. 3. Radarogram of the forest. GPR “OKO-2” with antenna unit AB-400. Vertical polarization. The location of tree trunks is indicated by dots with numbers. A test area 10 m × 100 m (10 ar) is marked with a rectangle

effect is due to the fact that when the polarization of the probing electromagnetic pulsed field (E-component) is parallel to the tree trunk, the effective scattering area of the tree will be higher. Counting the number of hyperbolas in a given area makes it possible to quickly and efficiently determine the density of the forest (Fig. 2). In the experiment performed by the OKO-2 georadar with the AB-400 antenna unit (central frequency 400 MHz, wavelength $\lambda = 75$ cm) on a test forest area with dimensions of 10 m $\times$ 100 m (10 ar), 64 hyperbolas of the reflected signal from coniferous trunks were identified (pine) trees (Fig. 3). Comparison with the actual number of trees showed 3 gaps due to the shading effect of close trunks, which is 95.5% of the true number of trees.

4. Conclusion

A radar method for surveying forests based on GPR technology is proposed, which makes it possible to measure the density of the forest environment with an error of $\pm 5\%$. Counting the number of reflections from tree trunks (hyperbolas) in a given area allows you to quickly and reliably determine the number of trees and recalculate to the density of the forest. A clearer radarogram of reflections from tree trunks was obtained with vertical polarization, i.e. the signal reflected from the tree trunk is higher when the polarization of the probing electromagnetic pulse is parallel to the trunk. Theoretical studies presented in [2] show that the presence of vegetation significantly affects the electromagnetic field, which at some distances from the radiating device can be even greater than the electromagnetic field over an infinitely conductive surface. This feature of the propagation of electromagnetic waves along forested and ice trails has been confirmed experimentally [2, 4]. Taking into account the influence of vegetation cover allows not only qualitatively, but also quantitatively assessing the features of the propagation of electromagnetic waves associated with the significant influence of the surface electromagnetic wave (SEW) in the MF, LF and VLF radio wave bands, when the field over the forested paths is greater at some distances from the emitter, than for the case of an infinitely conducting plane.

Acknowledgement

The work was carried out under the state budget project "Development of the fundamental foundations for the propagation of ELF-VLF-LF-MF and VHF radio waves in non-uniform impedance channels" (0270-2021-0004).

References

- [1] *Atlas of forests of the USSR*. Moscow, 1973. (In Russ.).
- [2] V. A. Egorov, *Influence of vegetation cover on the propagation of medium and longer electromagnetic waves*. Diss. cand. Phys.-Math. Sciences, St. Petersburg State University, 2006. (In Russ.).

- [3] T. Tamir, "On radio-wave propagation in forest environments," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 15, no. 6, pp. 806–817, Nov. 1967, doi: 10.1109/tap.1967.1139054.
- [4] Yu. B. Bashkuev, *Electrical properties of natural layered media*, Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1996. (In Russ.).

Information about the authors

Yuri B. Bashkuev, Prof., Dr.Sci., Head of EM diagnostic lab of Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of RAS, Russian Federation.

Valery B. Khaptanov, C.Sci., senior researcher of Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of RAS, Russian Federation.

Mikhail G. Dembelov, C.Sci., senior researcher of Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of RAS, Russian Federation.

Метрики оценки качества работы классификатора малоразмерных объектов на радиолокационном изображении, полученном с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой

Эрин Ф. А., Вебер В. И., Куприц В. Ю., Нетесов А. А.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050, Российская Федерация
vladimir.i.kuprits@tusur.ru*

Получено: 17 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Рассматриваются особенности метрик оценки качества работы классификатора по распознаванию малоразмерных объектов на радиолокационном изображении, проводится их сравнение и выявляются наиболее универсальные и информативные.

Ключевые слова: распознавание малоразмерных объектов на радиолокационном изображении, метрики.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Метрики оценки качества работы классификатора малоразмерных объектов на радиолокационном изображении, полученном с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой / Ф. А. Эрин и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 4. С. 436—444.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Метрики оценки качества работы классификатора малоразмерных объектов на радиолокационном изображении, полученном с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой / Ф. А. Эрин, В. И. Вебер, В. Ю. Куприц и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 436—444.

1. Введение

В настоящее время, повышение эффективности распознавания и классификации объектов на радиолокационном изображении связано с применением современных достижений искусственного интеллекта. Из-

вестно, что применение сверточных нейронных сетей позволяет существенно улучшить вероятность правильного распознавания объектов на радиолокационном изображении (РЛИ). Например, в [1] рассматривается система распознавания малоразмерных объектов на радиолокационных изображениях, полученных при помощи радиолокации с синтезированием апертуры (РСА) с использованием сверточной нейронной сети. Результаты обнаружения и распознавания этой системой наземных объектов приведены на рис. 1 (а — до распознавания, б — после распознавания). В качестве изображений наземных объектов были взяты радиолокационные изображения двух типов малоразмерных объектов БТР и грузовой автомобиль ЗИЛ из базы данных *MSTAR*¹[2].

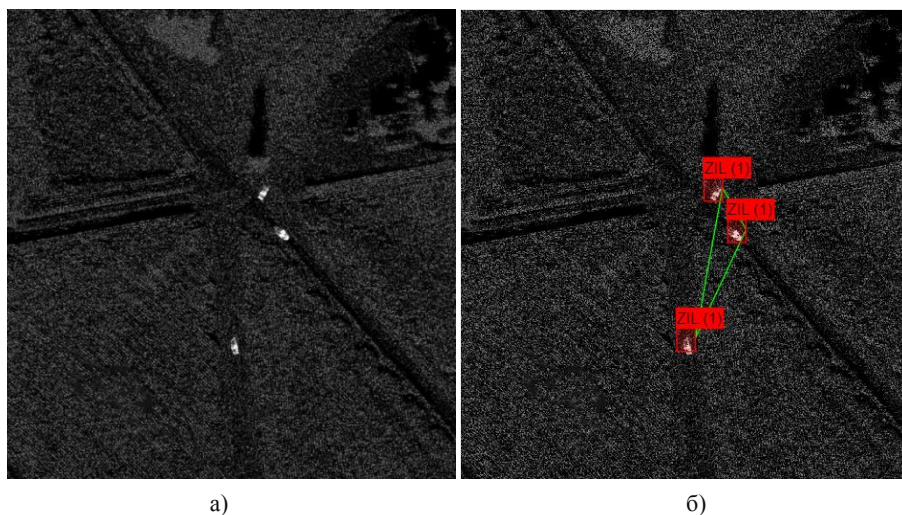


Рис. 1. Радиолокационное изображение сельской местности
а) перед распознаванием, б) после распознавания.

Fig. 1. Radar image of the countryside
a) before recognition, b) after recognition

В результате работы алгоритма распознавания на РЛИ формируются отметки о классе цели с вероятностью решения и отметки о принадлежности объектов к групповой цели (ГЦ), которые выделяется линиями.

Результат работы системы обнаружения и классификации объектов на РЛИ обычно оценивается вероятностью правильного распознавания, которая определяется из отношения количества верных результатов классификации к общему количеству объектов, поступивших на вход нейронной сети.

¹ *MSTAR* Dataset. Available at: <https://www.sdms.afrl.af.mil/index.php?collection=mstar> (14.03.2022)

Например, на вход нейронной сети подается 120 изображений объектов, из которых было распознано 100 изображений. Следовательно, вероятность правильного распознавания составляет 83 %. Предположим, что 120 изображений содержат 100 изображений ЗИЛ и 20 изображений БТР.

В результате работы нейронная сеть правильно распознала 90 из 100 грузовых автомобилей ЗИЛ и 10 из 20 БТР. Таким образом, вероятность правильного распознавания грузовых автомобилей ЗИЛ составила 90 %, вероятность правильного распознавания БТР равна 50 %.

Если использовать для оценки общее количество правильно распознанных объектов к общему количеству объектов, поступивших на вход сверточной нейронной сети, то вероятность правильного распознавания равна 83.3 %. В такой ситуации доля правильных ответов становится неинформативной метрикой оценки качества работы классификатора. Для того, чтобы избежать такой ситуации, используют различные метрики оценки работы нейронной сети.

Целью данной работы является сравнительный анализ применения различных метрик при решении задач классификации объектов.

2. Теория

В результате анализа публикаций из открытых источников в статье [2] была сформирована матрица ошибок классификации для двух классов, которая приведена в таблице 1.

Таблица 1. Матрица ошибок.

Table 1. Matrix of errors

Оценка системы	Оценка эксперта	
	Положительная (True)	Отрицательная (False)
Положительная (True)	True Positive(TP)	False Positive(FP)
Отрицательная (False)	False Negative(FN)	True Negative(TN)

Как видно из представленной выше таблицы, существует два вида ошибок классификации: False Negative (FN) и False Positive (FP) и два положительных исхода: True Positive (TP) и True Negative (TN) [2]:

- *False Negative* (FN) — объекты, которые были определены классификатором как отрицательные (то есть не принадлежащими данному классу), но являющиеся положительными (принадлежащими данному классу);

- *False Positive* (FP) — объекты, которые были определены классификатором как положительные, но являющиеся отрицательными;
- *True Positive* (TP) — объекты, которые были классифицированы как положительные и действительно являющиеся положительными
- *True Negative* (TN) — объекты, которые были классифицированы как отрицательные и действительно являющиеся отрицательными.

На основе значений матрицы ошибок рассчитываются различные метрики классификационной способности алгоритма. Для оценки качества работы классификатора были рассмотрены следующие метрики [2]: *Accuracy* (Доля верных ответов), *Precision* (Точность), *Recall* (Полнота), *F*-мера, ROC-кривая.

Accuracy — самая интуитивно понятная метрика из перечисленных. Данная метрика подразумевает под собой подсчет того, сколько раз классификатор дал верный ответ [2].

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}. \quad (1)$$

Однако, как было указано выше на примере с распознаванием ЗИЛ и БТР, данная метрика плохо отражает работу классификатора, если работа производится с неравными по объему классами.

В примере классификатор будет правильно определять половину БТР при том, что точность работы классификатора будет 83 %, хотя на деле классификатор не справляется с поставленной задачей. Исправить несовершенство данного вида оценки призваны следующие метрики: *Precision* (Точность), *Recall* (Полнота) и *F*-мера.

Precision (Точность) — метрика, показывающая отношение верных ответов к общему числу ответов, которые были определены как верные [2].

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (2)$$

Recall (Полнота) — метрика, показывающая сколько верных ответов из множества всех верных ответов были классифицированы правильно. То есть, чем выше значение *Recall* тем меньше верных объектов было пропущено классификатором [2].

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (3)$$

F-мера — метрика, суть оценки которой заключается в том, что она является объединением двух предыдущих метрик [2].

$$F = \frac{2 * Recall * Precision}{Recall + Precision} \quad (4)$$

3. Результаты моделирования

В соответствии с вышеуказанным примером были проведено обучение нейронной сети и рассчитаны метрики. На рис. 2 и рис. 3 приведены графики с значениями вышеуказанных метрик, рассчитанные для каждого цикла (эпохи) обучения.

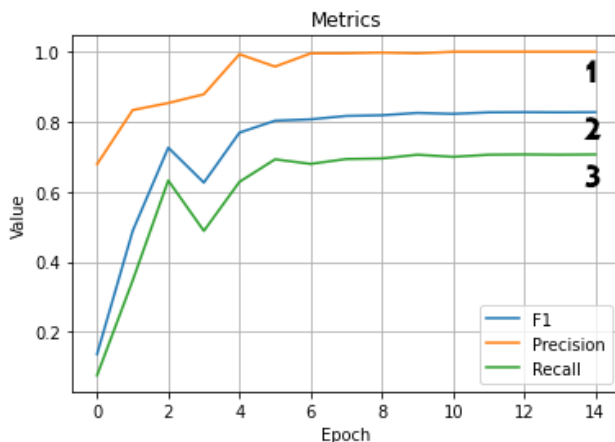


Рис. 2. График с выводом *Recall* (1), *F*-меры (2) и *Precision* (3), рассчитанные для каждого цикла (эпохи) обучения.

Fig. 2. Plot with the output of *Recall* (1), *F*-measures (2) and *Precision* (3) calculated for each training cycle (epoch)

Как видно из рис. 3, значения *Accuracy* и *F*-меры значительно отличаются.

Помимо данных метрик существуют еще довольно информативная метрика оценки работы классификатора — *ROC*-кривая (*Receiver Operating Characteristic*) и площадь под кривой ошибок *AUC ROC* [3].

Кривая *ROC* — графическая характеристика оценки качества работы классификатора. Представляет собой кривую, проведенную в осях *TPR* и *FPR* [2].

TPR (True Positive Rate) — истинно положительная оценка, то же самое что и *Recall* (полнота).

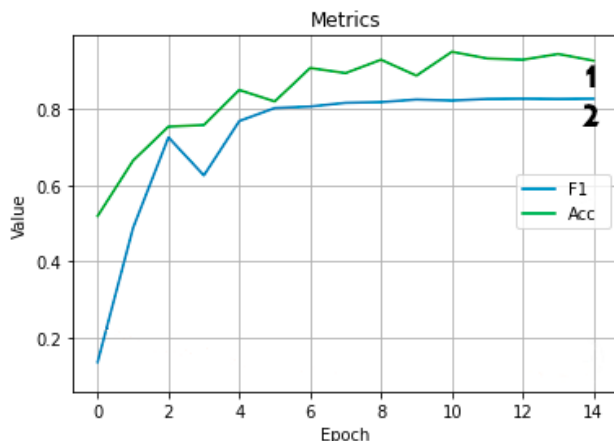


Рис. 3. График с выводом F -меры (1) и Аккурэси (2), рассчитанные для каждого цикла (эпохи) обучения.

Fig. 3. Graph with the output of F-measure (1) and Accuracy (2), calculated for each cycle (epoch) of training

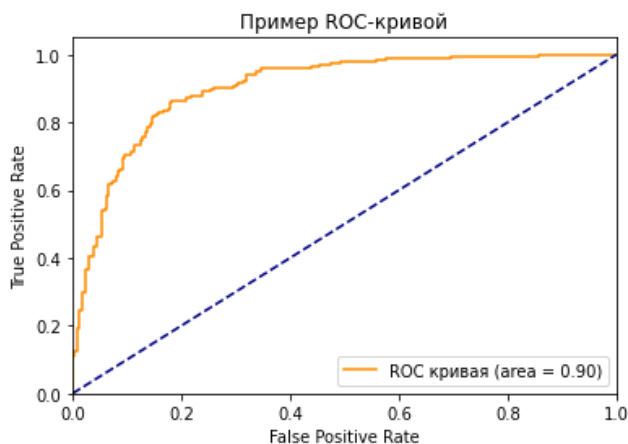


Рис. 4. Пример ROC-кривой

Fig. 4. ROC example

FPR (False Positive Rate) — ложноположительная ставка, отношение отрицательных ответов, которые были определены классификатором как положительные к числу всех фактически отрицательных ответов.

$$FTR = \frac{FP}{TN + FP}. \quad (5)$$

На рис. 4 представлен пример ROC-кривой [3].

Чем ближе ROC-кривая к прямой пунктирной линии, тем меньше различающая способность у классификатора. В идеале TPR должен быть близок к 1, а FPR должен быть близок к 0.

4. Заключение

При решении задач классификации объектов на радиолокационном изображении широко распространенная метрика: доля правильных ответов (*Accuracy*) может стать неинформативной при оценке качества работы классификатора. В такой ситуации необходимо применять другие метрики оценки качества работы нейронной сети.

Полученные результаты моделирования показали, что каждая из рассмотренных метрик обладает своим рядом преимуществ и может быть актуальной при определенной постановке задачи классификации. Наиболее информативной и универсальной характеристикой оценки качества работы классификатора является ROC-кривая. В дальнейшем планируется использовать ROC-кривую для оценки качества распознавания сверточной нейронной сетью различных объектов на радиолокационном изображении.

Список литературы

1. Распознавание наземных объектов на радиолокационном изображении с применением сверточной нейронной сети / В. И. Вебер и др. // Ural Radio Engineering Journal. 2022. Том 6. С. 93—101. DOI: 10.15826/urej.2022.6.1.005.
2. Дудченко П. В. Метрики оценки классификаторов в задачах медицинской диагностики // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 3—7 декабря 2018 г. Томск : Изд-во ТПУ, 2019. [С. 164—165].
3. Гуськов С. Ю., Лёвин В. В. Интервальные доверительные оценки для показателей качества бинарных классификаторов — ROC-кривых, AUC для случая малых выборок. Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. № 3 (39). С. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/idme/1376.html>.

Информация об авторах

Вебер Владислав Игоревич, ассистент кафедры радиотехнических систем радиотехнического факультета Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация.

Куприц Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем радиотехнического факультета Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация.

Нетесов Александр Алексеевич, студент Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация.

Эрин Федор Анатольевич, студент Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация.

Metrics for Assessing the Quality of the Work of a Classifier of Small Objects on a Radar Image Obtained Using a Synthetic Aperture Radar

F. A. Erin, V. I. Weber, V. Yu. Kuprits, and A. A. Netesov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation
vladimir.i.kuprits@tusur.ru

Received: May 17, 2022
Peer-reviewed: June 5, 2022
Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The features of the metrics for assessing the quality of the work of the classifier for recognizing small-sized objects on the radar image are considered, they are compared and the most universal and informative ones are identified.*

Keywords: *recognition of small objects on a radar image, metrics.*

For citation (IEEE): F. A. Erin, V. I. Weber, V. Yu. Kuprits, and A. A. Netesov, "Metrics for Assessing the Quality of the Work of a Classifier of Small Objects on a Radar Image Obtained Using a Synthetic Aperture Radar," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 436–444, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.32. (In Russ.).

References

- [1] V. I. Weber, V. Y. Kuprits, A. A. Mescheryakov, and M. V. Kuprits, "Recognition of ground objects on a radar image using convolutional neural network," *Ural Radio Engineering Journal*, vol. 6(1), pp. 93–101, 2022, doi: 10.15826/urej.2022.6.1.005. (In Russ.).
- [2] P. V. Dudchenko, "Metrics for evaluating classifiers in the problems of medical diagnostics," *Youth and modern information technologies: Proceedings of the XVI International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists*, Tomsk, December 3–7, 2018. Tomsk: TPU publishing house, [pp. 164–165], 2019. (In Russ.).
- [3] S. Yu. Gus'kov and V. V. Lyovin, "Confidence interval estimation for quality factors of binary classifiers – ROC curves, AUC for small samples," *Engineering Journal: Science and Innovation*, no. 3 (39), p. 3, 2015, URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/idme/1376.html>. (In Russ.).

Information about the authors

Vladislav I. Weber, department assistant of the Department of Radio Engineering Systems of Tomsk State University of Control System and Radio Electronics, Tomsk, Russian Federation.

Vladimir Y. Kuprits, Ph. D. in technology, associate professor of the Department of Radio Engineering Systems of Tomsk State University of Control System and Radio Electronics, Tomsk, Russian Federation.

Alexander A. Netesov, student of Tomsk State University of Control System and Radio Electronics, Tomsk, Russian Federation.

Fedor A. Erin, student of Tomsk State University of Control System and Radio Electronics, Tomsk, Russian Federation.

УДК 621.3.051.025

Исследование системы беспроводной передачи энергии

¹ Широков И. Б., ² Сердюк И. В., ³ Азаров А. А., ⁴ Широкова Е. И.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

¹ shirokov@ieee.org

² serduk@ieee.org

³ azarov@ieee.org

⁴ shirokova@ieee.org

Получено: 22 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В статье обсуждается новый подход к беспроводной передаче энергии для заряда аккумуляторных батарей электромобилей. Система передачи электроэнергии состоит из генераторного блока с измерителем КСВ, двух электромагнитных структур и выпрямительного блока. Электромагнитная структура, представленная в виде микрополосковой линии, не излучает электромагнитную энергию в автономном режиме. При сближении электромагнитных структур они превращаются в направленный ответвитель, при этом происходит эффективная передача мощности. Моделирование системы в среде проектирования AWR проводилось при различном взаимном расположении микрополосковых структур. Из моделирования видно, что потери мощности не превышают 1 дБ в широком диапазоне сдвигов между элементами системы и ее взаимным расположением. Изготовлена экспериментальная модель системы передачи мощности и проведены ее экспериментальные исследования. Результаты экспериментов и моделирования хорошо согласуются. Размеры и вес системы позволяют использовать ее для заряда аккумуляторных батарей электромобилей.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; направленные ответвители; схемы связи; электромагнитная связь; генераторы, управляемые напряжением.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Исследование системы беспроводной передачи энергии / И. Б. Широков и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 4. С. 445—457.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Исследование системы беспроводной передачи энергии / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, А. А. Азаров и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 445—457.

1. Введение

Электромобили широко используются сегодня, а в скором времени их использование будет повсеместным. Однако разряд аккумуляторных батарей электромобилей происходит довольно быстро из-за существенного потребления электроэнергии их двигателями. Существует определенный компромисс между полезной нагрузкой электромобилей и весом их аккумуляторных батарей. В результате срок службы аккумуляторных батарей электромобилей относительно невелик. Таким образом, в указанный промежуток времени аккумулятор электромобиля должен заряжаться.

Следует понимать, что во многих случаях применения электромобилей использование присутствия обслуживающего персонала невозможно или экономически неоправданно. Таким образом, контактные способы заряда аккумуляторных батарей исключены, а беспроводная передача энергии является одним из способов заряда аккумуляторных батарей электромобилей. При этом крайне интересны размеры и масса бортового элемента для беспроводного заряда аккумуляторных батарей. Любая дополнительная единица веса и дополнительный дюйм размера уменьшают полезную нагрузку электромобилей [1].

Таким образом, при проектировании системы беспроводного заряда необходимо применять сложные компромиссы. И этот компромисс должен быть умножен на безопасность системы в отношении воздействия системы заряда на биологические объекты с учетом беспроводного характера передачи энергии.

2. Проблемы беспроводной передачи энергии для зарядки аккумуляторных батарей электротранспортных средств

Что касается использования беспроводной передачи энергии для заряда аккумуляторных батарей электромобилей, то можно указать на ряд проблем, которые не могут быть решены с помощью существующих систем беспроводной передачи энергии.

Прежде всего, время заряда должно быть как можно короче, по крайней мере, во много раз меньше, чем срок эксплуатации электромобилей на одном заряде. Приблизительно это время должно быть равно 10—20 минутам. В противном случае экономика использования электромобилей будет слабой. Принимая во внимание класс электромобилей, двадцатиминутная зарядка предполагает использование киловатта беспроводной передаваемой мощности.

Упомянутая особенность накладывает определенные ограничения на использование известного магнитно-резонансного метода беспроводной

передачи энергии [2—5], известного как *WiTricity*. Эффективность этого способа беспроводной передачи энергии достигает 40 %, а дальность действия системы достигает нескольких метров. Однако напряженность поля в непосредственной близости от зарядной станции для упомянутой выше беспроводной передачи энергии будет достаточно высокой, а информации об опасном воздействии такой системы на биологические объекты нет. Об этом негативном влиянии мы можем судить лишь косвенно. В то же время существуют жесткие нормы, регламентирующие воздействие электромагнитных полей на человека [6], и мы должны строго следовать им, создавая новые зарядные станции беспроводной передачи энергии.

В отличие от предшествующего подхода индукционный метод передачи энергии, известный как Ци-стандарт [7, 8], лишен указанного недостатка. Эта технология используется во всем мире для заряда мобильных телефонов. Эта технология предполагает использование спаренных многовитковых катушек в гаджете и зарядной станции. Следует понимать, что высокая эффективность системы может быть достигнута только при очень плотном взаимном расположении катушек. Передача мощности почти полностью прекращается при расстоянии между витками более 5 мм; этот факт хорошо известен и доказан. Даже при нормальной работе КПД системы очень слабый и не превышает 10 %. Так, при передаваемой мощности в сотни ватт большая доля энергии будет преобразована в тепло.

Очевидно, что подобный подход не подходит для беспроводного заряда аккумуляторных батарей электромобилей.

3. Новая технология беспроводной передачи энергии

Недавно для изучения авторами была разработана новая технология беспроводной передачи энергии, свободная от упомянутых выше проблем [9—11]. Предложены полосковые конструкции для использования в составе системы беспроводной передачи электроэнергии. При сближении отдельно стоящих микрополосковых линий друг с другом обращенными сторонами они образуют направленный ответвитель на симметричных полосковых линиях.

С одной стороны, технология связанных полосковых линий сегодня хорошо известна. Взаимная связь двух полосковых линий обеспечивает направленную передачу мощности. Однако традиционный подход к конструкции направленного ответвителя не предполагает использования его для передачи мощности.

Стандартное решение предполагает использование оконечных балластных резисторов и отрезков полосковых линий четвертьволновой дли-

ны. Взаимное затухание мощности в этой системе связанных линий достигает значения в -3 дБ при хорошем решении, т. е. не менее половины подводимой мощности рассеивается в первом балластном резисторе. Часть энергии, отраженная от нагрузки, также рассеивается во втором балластном резисторе. При передаче мощности в 100 ватт не менее пятидесяти ватт превращается в тепло (экономика очень плохая), и это тепло, кстати, приходится отводить от балластных резисторов.

В отличие от традиционного направленного ответвителя, основанного на использовании полосковых линий, в предлагаемой системе отсутствуют оконечные балластные резисторы. Концы полосковых линий открыты. Таким образом, вся мощность либо передается в нагрузку, либо возвращается к источнику. Непроизводительные потери отсутствуют. Следует понимать, что известные типы полосковых линий, либо микрополосковые (самостоятельная микрополосковая структура), либо симметричные полосковые линии (направленный ответвитель), не излучают электромагнитную энергию в окружающее пространство, это общеизвестный факт. Таким образом, та часть энергии, которая не была передана в нагрузку, полностью возвращается к источнику. В этом основное отличие предлагаемой системы от существующих. Основная задача при проектировании предлагаемой системы заключается в увеличении передаваемой части энергии за счет возвращаемой.

В предлагаемой системе эта задача решается за счет увеличения длины присоединяемой полосковой линии. Эти длины линий намного больше четверти длины волны на рабочей частоте, и направленная передача мощности осуществляется многократно.

Так как оконечные резисторы исключены, исключается и рассеивание в них мощности. Волны, распространяющиеся в этих линиях, отражаются от ее открытых концов. Таким образом, отраженные волны также участвуют в процессе передачи энергии. Это приводит к увеличению коэффициента передачи мощности и уменьшению возвращаемой мощности.

С учетом вышеизложенного происходит практически полная передача мощности, что с научной и практической точек зрения является принципиально новым. Недавно, упомянутая технология была запатентована [9].

Далее обе полосковые линии были закручены в спирали, причем закручивание упомянутых сопряженных спиралей производится зеркально. Такое решение приводит к экономии места и увеличению допусков с учетом взаимного расположения конструкций полосковых линий.

Следует понимать, что взаимное поперечное или продольное смещение двух прямых полосковых линий приводит к уменьшению участка сцепления. В этих случаях имеет место деградация передачи мощности.

В то же время при взаимном смещении намотанных в спираль полосковых линий происходит сцепление соседних ветвей спирали и не происходит существенного ухудшения передачи мощности.

Предлагаемая технология передачи мощности существенно отличается от известной, основанной на использовании обычного направленного ответвителя.

4. Моделирование

Предварительное моделирование беспроводной передачи энергии было выполнено в среде *AWR Design Environment*. Полученные зависимости коэффициента передачи мощности, $S(2,1)$ в децибелах (синий цвет, треугольники) и КСВн входной микрополосковой линии (розовый цвет, квадрат) от рабочей частоты представлены на рис. 1 — рис. 3 для расстояний между микрополосковыми линиями электромагнитных структур 5, 10 и 15 мм.

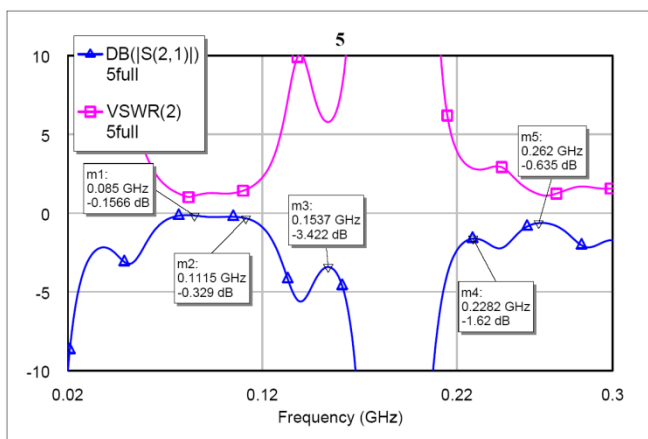


Рис. 1. Коэффициент передачи мощности и КСВ на расстоянии 5 мм.

Fig. 1. Power transfer ratio and VSWR at distance 5 mm

Как видно, форма кривых существенно меняется при сближении микрополосковых структур друг к другу более чем на 10 мм. Форма кривых остается неизменной при изменении расстояния от 20 до 30 мм (в работе не показано).

На приведенных рисунках маркер КСВн (розовые кривые) не выделен. Как видно, значение КСВн при некоторых оптимальных частотах передачи мощности незначительно превышает 1.

Очевидно, что рабочая частота должна изменяться по мере изменения расстояния между структурами. Критерием нахождения оптимальной

частоты является максимальный коэффициент передачи мощности. Этот аспект хорошо обсуждается в [12].

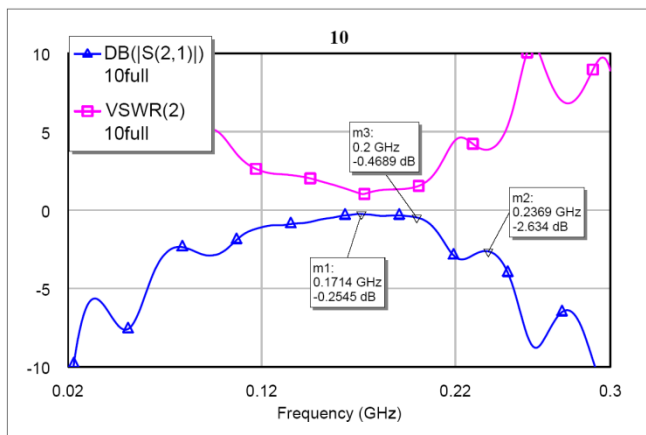


Рис. 2. Коэффициент передачи мощности и KCB на расстоянии 10 мм.

Fig. 2. Power transfer ratio and VSWR at distance 10 mm

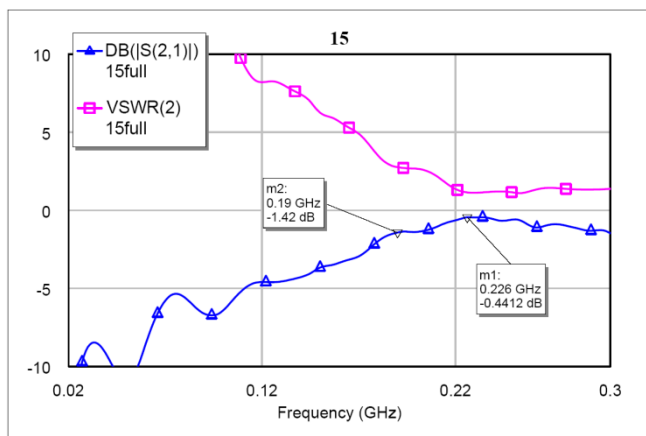


Рис. 3. Коэффициент передачи мощности и KCB на расстоянии 15 мм.

Fig. 3. Power transfer ratio and VSWR at distance 15 mm

Таким образом, зависимость коэффициента передачи мощности в децибелах (ось Y) от расстояния между микрополосковыми структурами в миллиметрах (ось X) с учетом оптимального значения рабочей частоты показана на рис. 4.

Дополнительно на рис. 5 показан анализ зависимостей коэффициента передачи по мощности в децибелах (ось Y) от взаимных смещений

микрополосковых структур в миллиметрах (ось X) в обоих направлениях в плоскости (направление X — зеленым, направление Y — красным).

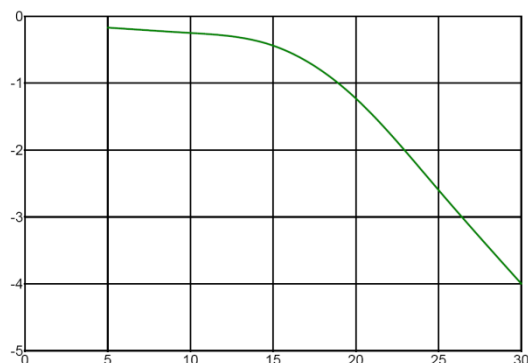


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи от расстояния между структурами.

Fig. 4. Dependence of transfer ratio from distance between structures

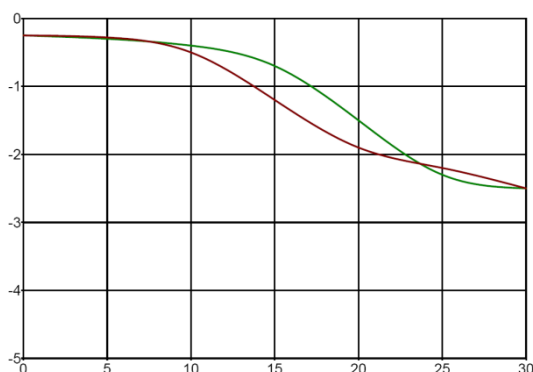


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи от взаимного смещения структур.

Fig. 5. Dependence of transfer ratio from mutual displacement of structures

5. Экспериментальные исследования

Изготовлен основной элемент системы беспроводной передачи энергии — микрополосковые структуры. Первая итерация предполагает закручивание спирали в квадрат (моделирование проводилось и для квадратной спирали). Микрополосковые структуры были изготовлены на гибком стеклотекстолите толщиной 0,2 мм и приклеены к поликарбонатной подложке толщиной 5 мм и размерами 220 мм × 220 мм. С нижней стороны был приклеен такой же стеклотекстолит с заземляющей пластиной. Моделировались одни и те же структуры.

Внешний вид одиночной микрополосковой структуры, закрученной по квадратной спирали, показан на рис. 6



Рис. 6. Внешний вид одиночной микрополосковой структуры.

Fig. 6. Appearance of single microstrip structure

Желтые «кирпичики», показанные на рис. 7, изготовлены из твердого пенопласта и имеют высоту 5, 10 и 20 мм. С помощью них выставлялось необходимое расстояние между структурами.

Соединение обеих микрополосковых структур (одна расположена над другой лицом к лицу) к измерительному мосту и блоку детектирования измерителя КСВн и ослабления типа Р2-102 показано на рис. 7.

На рис. 8 показано расстояние между структурами в 10 мм. На рабочей частоте 216 МГц (виден маркер) коэффициент передачи по мощности составил $-1,4$ дБ, КСВн на входе — 1,48. Форма кривых аналогична модельным кривым соответствующих взаиморасположений микрополосковых структур (см. рис. 2). Шкала Y для измеренного коэффициента передачи мощности отличается от моделированного. Измерения проводились для всех остальных взаимных размещений микрополосковых структур относительно реализованных симуляций.

Измеренная зависимость коэффициента передачи по мощности в децибелах (ось Y) от расстояния между микрополосковыми структурами в миллиметрах (ось X) представлена на рис. 9.

Результаты измерений немного хуже моделированных. Это связано с несовершенством измерительной аппаратуры. Однако форма измеренной кривой такая же, как у моделированной.

На рис. 10 представлены измеренные зависимости коэффициента передачи по мощности в децибелах (ось Y) от взаимных перемещений микрополосковых структур в миллиметрах (ось X) в обе стороны в плоскости (направление X — зеленым, направление Y — красным).



Рис. 7. Подключение микрополосковых структур к измерителю.

Fig. 7. Connection of microstrip structures to measurer

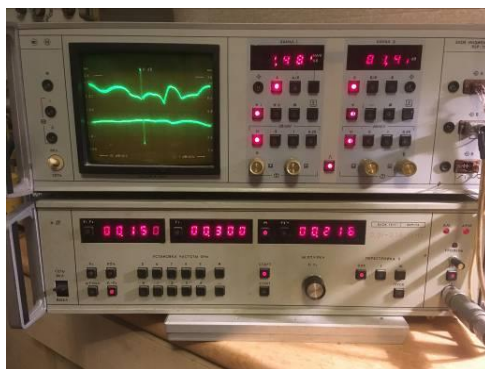


Рис. 8. Результаты измерений.

Fig. 8. Results of measurements

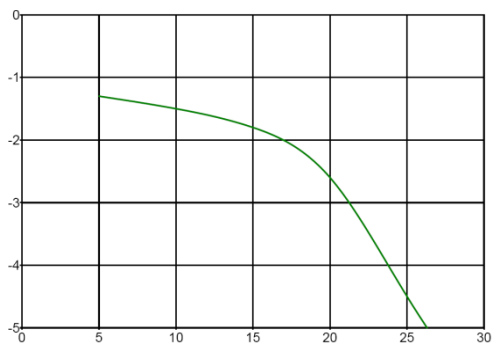


Рис. 9. Зависимость коэффициента передачи от расстояния между структурами.

Fig. 9. Dependence of transfer ratio from distance between structures

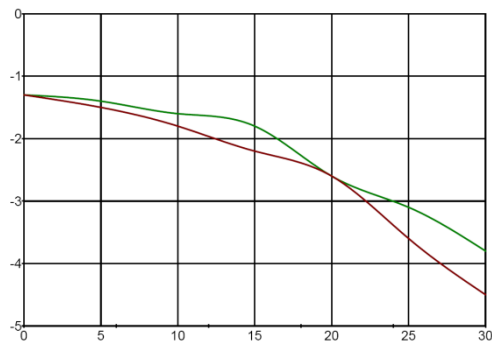


Рис. 10. Зависимости коэффициента передачи от взаимных смещений структур.

Fig. 10. Dependences of transfer ratio from structures mutual displacements

4. Заключение

Таким образом, в статье обсуждался новый подход к проектированию системы беспроводной передачи энергии. Предложенное решение подходит для использования для беспроводной зарядки аккумуляторных батарей электромобилей.

Размеры и масса элементов бортовой системы не имеют для электромобилей принципиального значения.

Допуск взаимного смещения микрополосковых конструкций зарядной станции и бортового оборудования вполне достаточен для отклонений в процессе парковки электромобилей.

Коэффициент передачи по мощности не превышает значения в $-0,25$ дБ (моделирование) или $-1,4$ дБ (реальные измерения) при расстоянии между микрополосковыми структурами в 10 мм. Полученное расхождение между моделированием и измерениями в 1 дБ коэффициента передачи по мощности вызвано использованием в тестируемых структурах медного проводящего слоя толщиной 18 мкм вместо 300 мкм при моделировании.

Основным преимуществом предлагаемой системы является отсутствие паразитных излучений при любом режиме работы зарядной станции. Опасное воздействие на биологические объекты системы беспроводной передачи энергии ничтожно при относительно высоком уровне передаваемой мощности.

Список литературы

1. Local promotion of electric mobility in cities : Guidelines and real application case in Italy / G. Comodi et al. // Energy. 2016. Vol. 95. P. 494—503.

2. Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords.
URL: <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>.
3. Karalis A., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer // *Annals of Physics*. 2008. Vol. 323. P. 34—48.
4. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances / A. Kurs et al. // *Science*. 2007. Vol. 317, iss. 5834. P. 83—86.
5. Tran D. H., Vu V. B., Choi W. Design of a High-Efficiency Wireless Power Transfer System with Intermediate Coils for the On-Board Chargers of Electric Vehicles // *IEEE Trans. Power Electron.* 2018. Vol. 33. P. 175—187.
6. IEEE Std C95.1–2005 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency, Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. Piscataway : IEEE, 2006.
7. Guidelines for Automotive Aftermarket Qi / Chargers The Wireless Power Consortium. 2012.
8. Global Qi Standard Powers Up Wireless Charging. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-qi-standard-powers-up-wireless-charging-102043348.html>.
9. Широков И. Б. Способ беспроводной высокочастотной передачи электрической энергии. Патент России № 2704602, МПК H02J 50/00, H02J 50/90, H01Q 7/08. Оpubл. 30.10.2019, бюл. № 31.
10. Shirokova E. I., Azarov A. A., Shirokov I. B. The Study of Operation of the System of Wireless Energy Transfer at Real Conditions. In : 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 1306—1310.
11. Increasing the Efficiency of Wireless Power Transfer System / I. B. Shirokov. In : 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russia. 2020. P. 147—150.
12. Способ обеспечения максимального коэффициента передачи высокочастотной передачи электрической энергии при изменении расстояния между микрополосковыми структурами в определенных пределах / И. Б. Широков и др. Патент № 2740957. Россия. МПК H02J 50/00, H02J 50/20. Оpubл. 22.01.2021, бюл. № 3.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Сердюк Игорь Владимирович, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Азаров Андрей Андреевич, аспирант Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Широкова Елена Игоревна, студентка Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Study of System of Wireless Power Transfer

I. B. Shirokov¹, I. V. Serdyuk², A. A. Azarov³, and E. I. Shirokova⁴

Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation

¹ shirokov@ieee.org

² serduk@ieee.org

³ azarov@ieee.org

⁴ shirokova@ieee.org

Received: May 22, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: New approach to wireless power transfer for electrical vehicles battery charging is discussed in a paper. The system of power transfer consists of generating unit with VSWR meter, two electromagnetic structures, and rectifying unit. Electromagnetic structure which is represented as microstrip device does not emit electromagnetic energy at its stand alone position. When electromagnetic structures approach each other ones are transformed into alone directional coupler; and effective power transfer takes place. System simulation in AWR design environment was carried out at different mutual arrangements of microstrip units. It was shown the power loss did not exceed 1 dB in a wide range between system parts and its mutual arrangements. Experimental model of system for power transfer was made and experimental study was carried out. Experimental and simulation results are well agreed. The reasonable system size and weight are well situated for its use for battery charging of electrical vehicle.

Keywords: wireless power transmission, directional couplers, coupling circuits, electromagnetic coupling, voltage-controlled oscillators.

For citation (IEEE): I. B. Shirokov, I. V. Serdyuk, A. A. Azarov, and E. I. Shirokova, "Study of System of Wireless Power Transfer," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 445–457, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.33. (In Russ.).

References

- [1] G. Comodi, F. Caresana, D. Salvi, L. Pelagalli, and M. Lorenzetti, "Local promotion of electric mobility in cities: Guidelines and real application case in Italy," *Energy*, vol. 95, pp. 494–503, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.038.
- [2] Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords.
URL: <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607>.
- [3] "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol. 323, no. 1, pp. 34–48, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.aop.2007.04.017.

- [4] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, Jul. 2007, doi: 10.1126/science.1143254.
- [5] D. H. Tran, V. B. Vu, and W. Choi, "Design of a High-Efficiency Wireless Power Transfer System With Intermediate Coils for the On-Board Chargers of Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 1, pp. 175–187, Jan. 2018, doi: 10.1109/tpel.2017.2662067.
- [6] *IEEE Std C95.1–2005 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency, Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*. Piscataway: IEEE, 2006.
- [7] *Guidelines for Automotive Aftermarket Qi / Chargers* The Wireless Power Consortium. 2012.
- [8] *Global Qi Standard Powers Up Wireless Charging*, URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-qi-standard-powers-up-wireless-charging-102043348.html>.
- [9] I. B. Shirokov, "The method of wireless high-frequency transmission of electrical energy," Russian patent no. 2704602, IPC H02J 50/00, H02J 50/90, H01Q 7/08, publ. 30.10.2019, bul. no. 31. (In Russ.).
- [10] E. I. Shirokova, A. A. Azarov, and I. B. Shirokov, "The Study of Operation of the System of Wireless Energy Transfer at Real Conditions," *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 1306–1310.
- [11] I. B. Shirokov, A. A. Azarov, E. I. Shirokova, and I. V. Serdyuk, "Increasing the Efficiency of Wireless Power Transfer System," *2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC)*, Moscow, Russia, 2020, pp. 147–150.
- [12] I. B. Shirokov, A. A. Azarov, I. V. Serdyuk, and E. I. Shirokova, "A method for ensuring the maximum transfer coefficient of high-frequency transmission of electrical energy when changing the distance between microstrip structures within certain limits," Patent no. 2740957, Russia, IPC H02J 50/00, H02J 50/20. Pub, 22.01.2021, bul. no. 3. (In Russ.).

Information about the authors

Igor B. Shirokov, professor at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Igor V. Serduk, associate professor at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Andrey A. Azarov, graduate student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

Elena I. Shirokova, student at Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 537

Применение СВЧ измерений для сортировки составных элементов археологических объектов

¹ Полетаев Д. А., ¹ Мальцев К. С., ² Майко В. В., ² Власов В. П.

¹ Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского
просп. Акад. Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация
poletaevda@cfuv.ru

² Институт археологии Крыма РАН
просп. Акад. Вернадского, 2, г. Симферополь, 295007, Российская Федерация

Получено: 21 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В работе рассматривается конструкция коаксиального резонансного измерительного преобразователя с укорачивающей емкостью, применяемого для определения электрофизических параметров составных элементов археологических объектов. На основании численной модели определены оптимальные геометрические размеры резонансного датчика. Проведен анализ основных характеристик измерительного преобразователя. Получен ряд экспериментальных данных, подтверждающих применимость предложенной методики.

Ключевые слова: археологический объект, СВЧ резонатор, резонансный измерительный преобразователь, апертура, характеристика преобразования.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Применение СВЧ измерений для сортировки составных элементов археологических объектов / Д. А. Полетаев и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 4. С. 458—471.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Применение СВЧ измерений для сортировки составных элементов археологических объектов / Д. А. Полетаев, К. С. Мальцев, В. В. Майко и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 458—471.

1. Введение

К археологическим относят объекты, найденные в культурном слое: керамическую посуду, металлические изделия, черепицу, деревянные элементы и др. Недиэлектрические находки представляют, в большинстве своем, цельные структуры [1, 2]. Керамические и другие диэлектрические

объекты, ввиду хрупкости, чаще всего представлены отдельными составными элементами. Сортировка данных многочисленных фрагментов для восстановления целого объекта является весьма трудоемкой задачей [1, 2]. Действительно, отбор отдельных фрагментов, осуществляемый по внешним характеристикам «на глаз», может занимать несколько лет. Данная задача может быть автоматизирована с применением систем распознавания объектов (нейронных сетей). Однако необходимость всестороннего сканирования каждого элемента является не менее сложной задачей, решение которой при условии разнообразия форм отдельных элементов весьма трудоемко. Рентгеноструктурный анализ, повсеместно применяемый при анализе минералов, слишком трудоемок. Методы радиоизотопной сортировки элементов ресурсозатратны. Оптические сканеры, работающие с оптическими вихрями и спеклами в большинстве своем применимы только для прозрачных объектов. Методы СВЧ диагностики, представленные широким спектром ближнеполевых и диэлькометрических установок, чрезвычайно удобны для применения в сортировке элементов археологических объектов.

Основным функциональным узлом аппаратуры для СВЧ диагностики материалов является датчик, который включает источник электромагнитных волн, измерительный преобразователь (ИП) и устройства выделения информационных сигналов. Наибольшее распространение получили датчики на основе резонаторов [3—10]. При этом для обеспечения бесконтактности проведения экспресс-измерений электромагнитное поле резонатора зондирует образец через отверстие в одной из стенок. Такой резонансный измерительный преобразователь (РИП) относится к апертурному типу [11—15].

С учетом востребованности СВЧ методов диагностики и их возможного широкого использования актуальным является численно-аналитическое моделирование РИП, которое, в частности, позволяет рассчитывать его характеристики преобразования — исходный материал для дальнейшей компьютерной обработки и визуализации результатов измерений. Проведение многопараметрической оптимизации, количественное исследование метрологических параметров, обоснование применения новых типов РИП и их возможностей также нуждаются в создании адекватной численной модели.

СВЧ методы диагностики находят широкое применение в науке, технике и народном хозяйстве. Повсеместное использование аппаратуры, базирующейся на этих методах, обусловлено неразрушаемостью образца, отсутствием физического контакта, возможностью получения экспресс-данных при проведении исследований [12]. В наибольшей степени подоб-

ная аппаратура востребована в агропромышленных хозяйствах (измерители влажности), в различных областях науки и производства (микроволновая микроскопия), и в биологии (для исследования характеристик объектов) [11—14]. Неотъемлемой составляющей аппаратуры при использовании ближнеполевых СВЧ методов являются резонаторные измерительные преобразователи (РИП), конструкции и геометрия которых определяются областью использования. С учетом многообразия используемых сенсоров рассматривается конструкция, которая нашла применение для исследований распределенных структур, производящая усреднение измеряемых параметров по объему и площади исследуемого объекта, каковыми и являются элементы археологических объектов — РИП КИА (резонаторный измерительный преобразователь с коаксиальной измерительной апертурой).

Измеряемыми характеристиками элементов археологических объектов являются электрофизические параметры: относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь. Данные величины однозначно связаны с информационными сигналами РИП КИА: добротностью, резонансной частотой и их изменениями.

Прямое определение электрофизических параметров археологических объектов весьма трудоемко. Это связано с необходимостью проведения предварительной калибровки РИП КИА с конкретными геометрическими размерами, а также с особенностями проведения экспериментов: на измеряемые параметры оказывают сильное влияние неплотность прилегания объекта исследования к апертуре, внешние факторы. Кроме того, требуется проведение оптимизации параметров измерительного преобразователя для обеспечения одновременно высокой чувствительности при сохранении усредненного характера измерений.

Усреднение легко достижимо в традиционных закрытых резонаторах диэлькометрических методов [10]. Однако необходимость каждый раз помещать объект внутрь резонатора, что требует существенных затрат времени, осложняет его применения для серий проб.

Экспресс-контроль электрофизических параметров фактически требует внешнего по отношению к датчику расположения объекта и измерений в режиме реального времени. Концептуально это может быть портативный прибор, легко применимый археологами при полевых работах.

Существует большое количество работ экспериментального и теоретического характера, посвященных исследованию применения резонаторных измерительных преобразователей для измерения электрофизических параметров [12—15]. Однако в этих работах не уделяется должного внимания оптимизации чувствительности датчика для различных керамик, составляющих большую часть археологических находок. Теоретиче-

ское обоснование выбора параметров РИП базируется на упрощенных моделях, позволяющих учитывать только колебательные потери в резонаторной системе. Современные прямые численные методы позволяют существенно уточнить модель РИП КИА, то есть учесть геометрию апертуры, расположение, размеры и другие характеристики исследуемого объекта и построить оценочные теоретические характеристики преобразования РИП КИА, связывающие информационные сигналы резонаторного измерительного преобразователя с электрофизическими параметрами исследуемого объекта [11].

Целью работы является оптимизация параметров РИП КИА, применяемого для сортировки диэлектрических элементов археологических объектов, а также предложение методики работы с разработкой.

2. Теоретическая часть

На рис. 1 приведена конструкция рассматриваемого РИП КИА с прилегающим объектом.

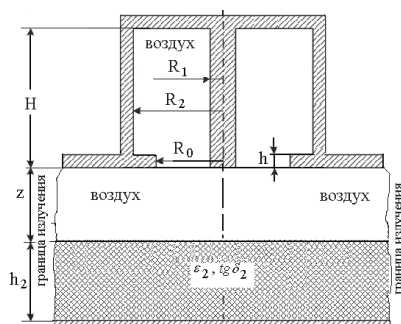


Рис. 1. Модель РИП КИА.

Fig. 1. Resonator transducer model with coaxial measuring aperture

Модель включает отрезок коаксиального волновода, образец толщиной h_2 с электрофизическими параметрами $\epsilon_2, tg \delta_2$.

Для проведения практических измерений важно, чтобы электрофизические параметры образца оказывали как можно большее влияние на нагруженную добротность РИП. При этом нагруженная добротность не должна быть меньше 100 [12]. Из теории коаксиальных линий передач [14—17] известно, что минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов: $R_1 / R_2 = 0,28$. Очевидно, максимальная добротность четвертьволнового резонатора будет также достигаться при данном отношении.

Максимум дисперсии для воды приходится на частоту около 10 ГГц [12]. Предварительный анализ позволяет выбрать геометрические размеры модели: $H/\lambda = 1,25$; $R_2/\lambda = 0,17$; $h/H = 5,6 \cdot 10^{-3}$; $z = \infty$ (четвертьволновый резонатор нагружен на свободное пространство); проводимость стенок резонатора принята равной $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ См/м (с целью учета влияния шероховатости стенок). Исследование влияния остальных геометрических размеров и параметров РИП и образца осуществлялось с помощью численной модели, в основе которой лежит метод конечных элементов, предусматривающий решение волновых уравнений с заданными краевыми условиями [17, 18].

3. Результаты моделирования

Из общих физических представлений следует, что выбором радиуса R_0 апертуры можно существенно изменять добротность резонаторного измерительного преобразователя. На рис. 2 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от величины R_0 , рассчитанные при отсутствии объекта исследования.

Как видно из графиков на рис. 2, уменьшение R_0 апертуры снижает потери на излучение в свободное пространство. Необходимость учета излучательных потерь наиболее явно демонстрируется на зависимости добротности от R_0 апертуры (рис. 2а). Даже при малом размере R_0 добротность при учете излучения и без учета отличаются почти в 2 раза. Требуется отметить, что добротность РИП уменьшается в 1,5 раза по сравнению с РИП, в котором выдержано оптимальное соотношение радиусов. Данное снижение добротности приходится считать вынужденным при проектировании РИП для исследования объектов с высоким тангенсом угла диэлектрических потерь. Из графика на рис. 2б видно, что учет излучения практически не влияет на резонансную частоту.

На рис. 3 приведены зависимости добротности и резонансной частоты РИП от продольного размера апертурно-формирующей части коаксиала h при разных значениях величины R_0 .

Характер изменения добротности (рис. 3а) носит резонансный характер. Более острый резонансный пик соответствует меньшему R_0 , что согласуется с общими физическими представлениями. Уменьшение резонансной частоты (рис. 3б) обуславливается ростом емкости апертуры, при увеличении ее продольного размера апертурно-формирующей части коаксиала.

Как видно из графика (рис. 3а) добротность РИП при исследовании образца с параметрами $\varepsilon_2 = 3$; $\operatorname{tg} \delta_2 = 0,01$ остается довольно высокой даже при раскрывах апертуры $R_0/R_2 > 0,3$. Отчетливо видно значительное изменение добротности с образцом, при $h/H \approx 0,4$ (что соответствует $h/\lambda \approx 0,5$), относительно добротности, рассчитанной при нагрузке на свободное пространство (рис. 3а). Данный факт согласуется с физическими представлениями и свидетельствует об адекватности численной модели. Вместе с тем, даже при $h/H \approx 0,4$, изменение добротности РИП в 2 раза меньше, чем при $h \rightarrow 0$. Это связано со значительным провисанием поля из апертуры. Из графика на рис. 3, а следует весьма важный вывод: наибольшее изменение добротности обеспечивается при $h/H < 0,05$.

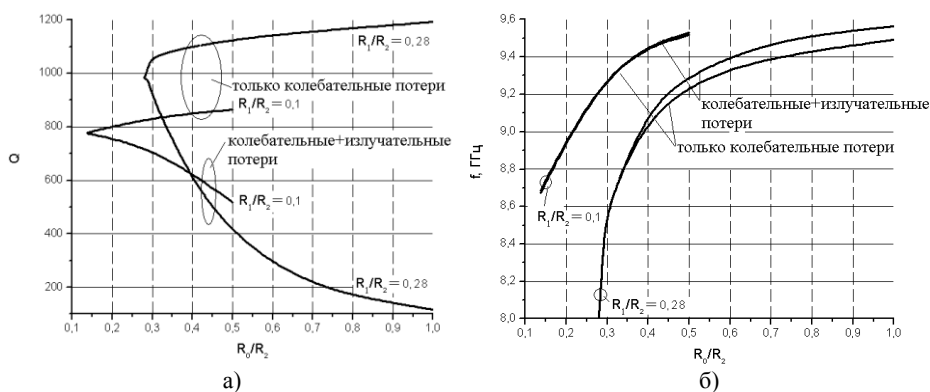


Рис. 2. Зависимость а) добротности и б) частоты от величины R_0 .

Fig. 2. Dependence of a) quality factor and b) frequency on the value R_0

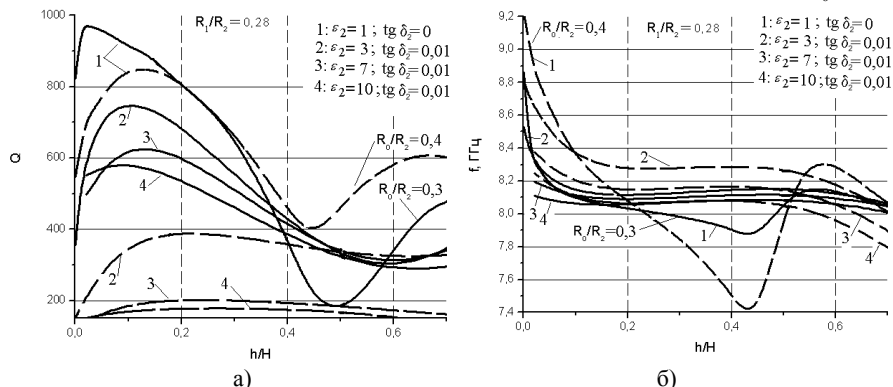


Рис. 3. Зависимость а) добротности, б) резонансной частоты от размеров апертуры.

Fig. 3. Dependence of a) quality factor, b) resonant frequency on the size of the aperture

Значения электрофизических параметров археологических объектов характеризуется диапазоном изменения ε от 3 до 10 и $\operatorname{tg} \delta$ от 0,01 до 0,4 [1, 2]. Таким образом, численные исследования целесообразно проводить в данном диапазоне изменения электрофизических параметров исследуемого образца.

Расчеты проведены для модели с параметрами: $H/\lambda = 1,25$; $R_2/\lambda = 0,17$; $z = 0$; $h_{21} = 0$; $h_2/\lambda = 0,14$; $h/H = 0,01$; проводимость стенок $\sigma = 5,8 \cdot 10^6$ См/м; $\lambda = 3$ см, при изменении величины апертуры R_0/R_2 от 0,29 до 1, для образцов, параметры которых изменяются в указанных выше пределах. Графики зависимости добротности и чувствительности РИП от величины R_0 апертуры приведены на рис. 4. Чувствительность вычислялась исходя из изменения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{dtg} \delta_2 = 0,01$, при значении $\operatorname{tg} \delta_2 = 0,01$ и постоянной относительной диэлектрической проницаемости.

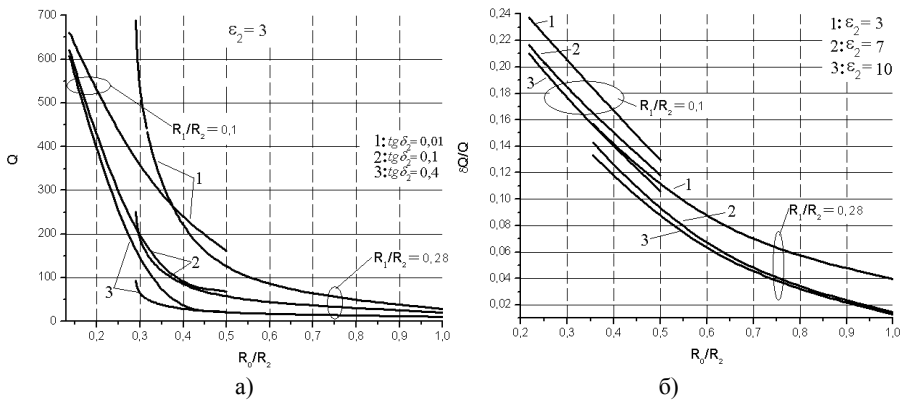


Рис. 4. Зависимость а) Q и б) $\delta Q/Q$ от величины апертуры и параметров образца.

Fig. 4. Dependence of а) Q and б) $\delta Q/Q$ on the aperture value and sample parameters

Добротность РИП (рис. 4а) в большей степени зависит от величины апертуры, которая определяет величину излучательных потерь. Чувствительность датчика (рис. 4, б) увеличивается при уменьшении R_0/R_2 .

На рис. 5 представлены зависимости резонансной частоты и изменения резонансной частоты при вариации величины апертуры R_0/R_2 .

Как видно из графиков (рис. 4 и рис. 5), добротность при наличии объекта, удобная в метрологическом отношении [12], достигается в узком диапазоне значений R_0 . При этом чувствительность к образцам с высокой диэлектрической проницаемостью оказывается недостаточной. Поэтому

оптимизировать такой резонаторный измерительный преобразователь следует отдельно для объектов с низким и высоким значением диэлектрической проницаемости.

Из графиков (рис. 6) видно, что большее значение относительной диэлектрической проницаемости образца увеличивает значение добротности системы, вследствие “запирания” энергии внутри резонатора.

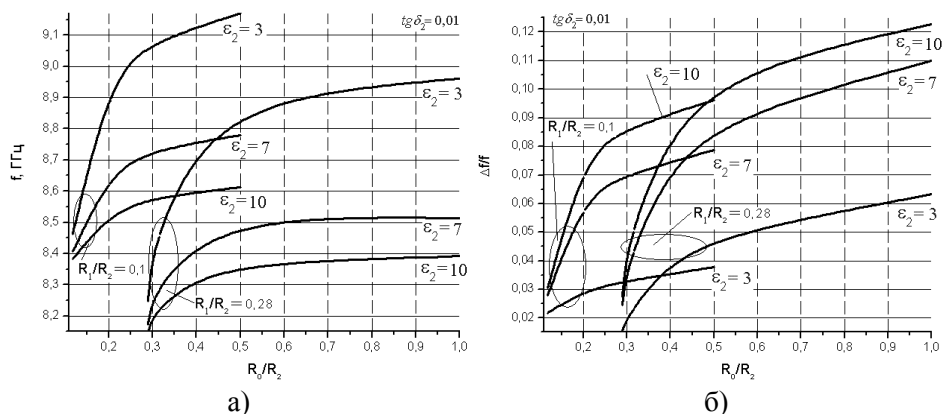


Рис. 5. Зависимость а) f и б) $\Delta f / f$ от величины апертуры и параметров образца.

Fig. 5. Dependence of а) f and б) $\Delta f / f$ on the aperture value and sample parameters

На рис. 6 и рис. 7 приведены рассчитанные характеристики преобразования РИП КИА с различными геометрическими размерами апертуры.

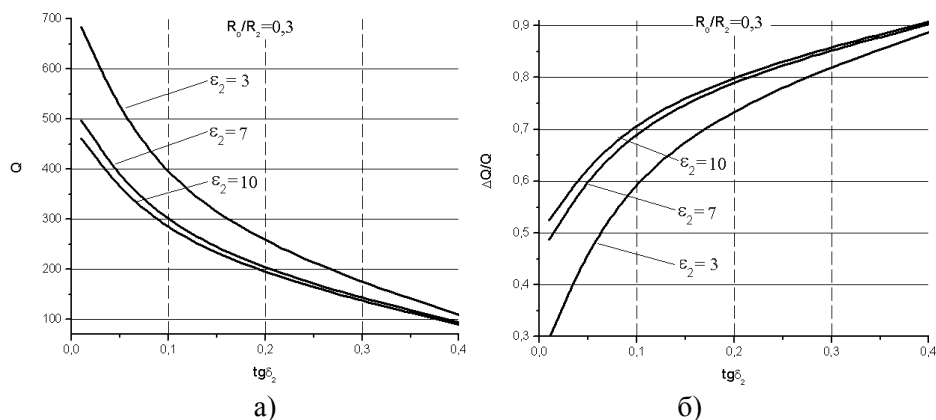
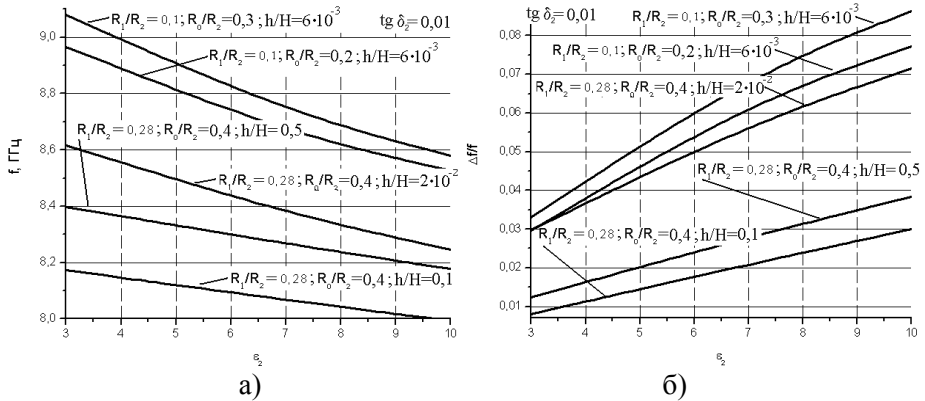


Рис. 6. Зависимость а) Q и б) $\Delta Q / Q$ от параметров образца.

Fig. 6. Dependence of а) Q and б) $\Delta Q / Q$ on the parameters of the sample

Рис. 7. Зависимость а) f и б) $\Delta f / f$ от параметров образца.Fig. 7. Dependence of а) f and б) $\Delta f / f$ on the parameters of the sample

4. Постановка эксперимента

На основе численной модели проведена оптимизация геометрии резонансного преобразователя. Изготовлен прототип резонансного измерительного преобразователя, согласно оптимизированной геометрии (материал — сталь с нанесенным медным покрытием, толщиной больше скин-слоя на рабочей частоте). В качестве измерительного устройства применялся векторный анализатор цепей P4226 со стандартной схемой подключения анализируемого устройства — резонатора. В качестве археологических объектов применялись элементы черепицы и лепной керамики из городища «Таш-Джарган» (координаты расположения: Республика Крым, Симферопольский район, Чистенское сельское поселение, село Чистенькое). Элементы археологических объектов представляли собой фрагменты керамики с приблизительными размерами: 1 см $\times$ 1 см $\times$ 1 см, практически идентичные визуально. Количество элементов: 5 элементов черепицы, 5 керамических элементов, классифицированных по типам сторонними методами. В процессе измерения электрофизических параметров диэлектриков выявлено, что достаточно измерять добротность и частоту резонансного измерительного преобразователя как характерные параметры, характеризующие конкретный объект и его принадлежность.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. Для рассматриваемого элемента археологического объекта в нескольких точках его поверхности измерялись информационные параметры (добротность и частота) резонансного измерительного преобразователя, затем полученные параметры усреднялись. Аналогичные действия производились

для каждого исследуемого элемента. По результатам измерений информационных параметров резонансного измерительного преобразователя элементы археологических объектов разделялись по группам со сходными значениями.

5. Результаты и обсуждение

На рис. 8 представлены полученные в ходе эксперимента значения резонансных частот резонансного преобразователя, соответствующие исследованию различных элементов археологических объектов, разделенных на две группы сторонними методами. Точками на рис. 8 отмечены дискретные значения информационных параметров.

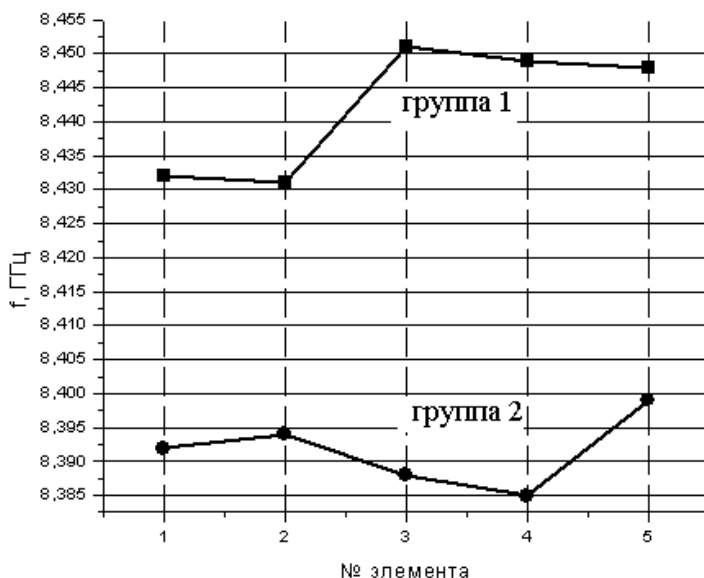


Рис. 8. Значения частот резонансного измерительного преобразователя для разных элементов

Fig. 8. Frequency values of the resonant measuring transducer for different elements

Как видно из рис.8, значения частот для разных групп отличаются не более чем на 0,2 %, что подтверждает гипотезу о возможности сортировки элементов описанным образом.

На рис. 9 представлены полученные в ходе эксперимента значения добротностей резонансного преобразователя, соответствующие исследованию различных элементов археологических объектов, разделенных на две группы сторонними методами. Точками на рис. 9 отмечены дискретные значения информационных параметров.

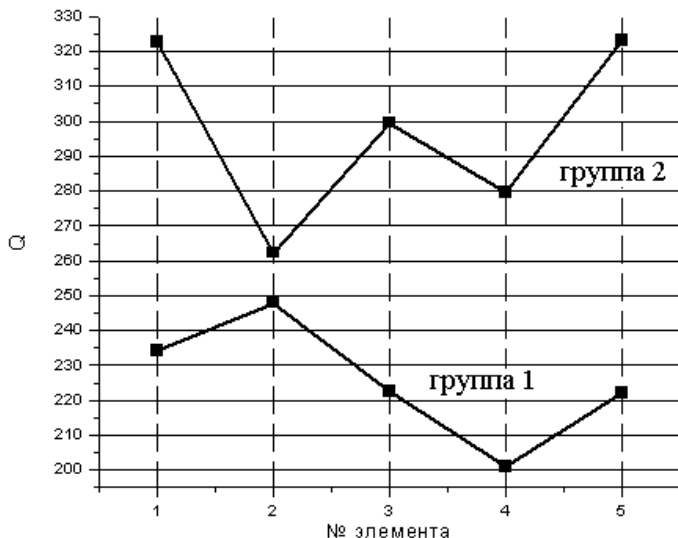


Рис. 9. Значения добротностей резонансного измерительного преобразователя для разных элементов.

Fig. 9. Values of the quality factors of the resonant measuring transducer for different elements

Небольшое значение добротностей (по рис. 9) объясняется недостаточной полировкой поверхностей резонатора. Как видно из рис. 9, значения добротностей для разных групп отличаются не более чем на 19 %, что вписывается в инструментальную погрешность и подтверждает гипотезу о возможности сортировки элементов описанным образом.

6. Заключение

В работе проведено численное моделирование резонансного измерительного преобразователя, применяемого для анализа электрофизических параметров элементов археологических объектов. На основе разработанной модели проведена оптимизация геометрии резонатора. Изготовлен прототип, проведен эксперимент с диэлектрическими объектами. В эксперименте подтверждена высокая чувствительность РИП к изменению электрофизических параметров исследуемых объектов. Предложена методика сортировки элементов археологических объектов.

Список литературы

1. Мыц В. Л. Отчет об охранных раскопках Горно-Крымской экспедиции ИА АН УССР в 1984 г. ФГБУН «Институт археологии Крыма РАН». Д № 1984/76.
2. Щепинский А. А. Археологическое обследование Курцово-Сабловской долины в 1950 г. ИАДК, 1957. С. 307—327.

3. Гордиенко Ю. Е. СВЧ диагностика слоистых полупроводниковых материалов : дисс. ... докт. физ.-мат. наук : 01.04.03. Харьков : ХИРЭ, 1984. 397 с.
4. Егоров В. Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 5—38.
5. Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization / L. Chen et al. New York : John Wiley & Sons, 2004. 537 p.
6. Детинко М. В. Физические основы неразрушающего СВЧ-резонаторного метода локального контроля электрофизических параметров полупроводников. Томск : Изд-во Томского ун-та, 1988. 30 с.
7. Завьялов А. С. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах. Томск : Изд-во ТГУ, 1985. 213 с.
8. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М. : Физматиздат, 1963. 404 с.
9. Гершензон Е. М. Методы определения параметров полупроводников и полупроводниковых пленок на СВЧ // Полупроводниковые приборы и их применение. 1970. Вып. 23. С. 3—48.
10. Гордиенко Ю. Е. Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1996. Вып. 100. С. 253—260.
11. Рябухин А. А. Электродинамические модели резонаторных сенсоров в СВЧ диагностике полупроводников : дисс. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.03. Харьков : ХНУРЭ, 2002. 158 с.
12. Гордиенко Ю. Е. Измерительные преобразователи для неразрушающего контроля электропроводности пленок в эпитаксиальных структурах nn^+ типа // Электронная техника. Серия 8. 1974. Вып. 9. С. 112—117.
13. Hong S. Improved surface imaging with a near-field scanning microwave microscope using a tunable resonator // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 80, no. 3. P. 524—526.
14. Медведев Ю. В. Техника неразрушающего измерения удельного сопротивления, толщины и времени жизни неосновных носителей заряда по площади эпитаксиальных пленок // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1984. № 10. С. 50—54.
15. Imtiaz A. Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope // Journal of applied physics. 2006. Vol. 100. P. 1—8.
16. Гордиенко Ю. Е. Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой // Радиотехника. 2009. № 157. С. 108—114.
17. Кураев А. А. Электродинамика и распространение радиоволн. Минск : 2004. 358 с.
18. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. М. : 1990. 335 с.

Информация об авторах

Полетаев Дмитрий Александрович, доцент Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-2898-960X.

Мальцев Константин Сергеевич, магистр Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, Российская Федерация.

Майко Вадим Владиславович, директор института археологии Крыма РАН, г. Симферополь, Российская Федерация.

Власов Владимир Петрович, научный сотрудник института археологии Крыма РАН, г. Симферополь, Российская Федерация.

The Use of Microwave Measurements for Sorting the Constituent Elements of Archaeological Objects

D. A. Poletaev¹, K. S. Maltsev¹, V. V. Maiko², and V. P. Vlasov²

¹Crimean Federal University n. a. V. I. Vernadsky
4, Acad. Vernadsky Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation
poletaevda@cfuv.ru

²Institute of Crimean Archeology RAS
2, Acad. Vernadsky Ave., Simferopol, 295007, Russian Federation

Received: May 21, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: In this paper the design of a coaxial resonant measuring converter with a shortening capacitance used to determine the electrophysical parameters of the constituent elements of archaeological objects is proposed. Based on the numerical model, the optimal geometric dimensions of the resonant sensor are determined. The analysis of the main characteristics of the measuring transducer is carried out. A number of experimental data were obtained confirming the applicability of the proposed technique.

Keywords: archaeological object, microwave resonator, resonant measuring converter, aperture, conversion characteristic.

For citation (IEEE): D. A. Poletaev, K. S. Maltsev, V. V. Maiko, and V. P. Vlasov, "The Use of Microwave Measurements for Sorting the Constituent Elements of Archaeological Objects," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 458–471, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.34. (In Russ.).

References

- [1] V. L. Myts, *Report on the security excavations of the Crimean Mountain Expedition of the IA Academy of Sciences of the Ukrainian SSR in 1984*. Institute of Archeology of Crimea RAS, no. 1984/76, 1984. (In Russ.).
- [2] A. A. Schepinsky, *Archaeological survey of the Kurtsovo-Sablovskaya valley in 1950*, IADC, pp. 307–327, 1957. (In Russ.).
- [3] Yu. Ye. Gordienko, *Microwave diagnostics of layered semiconductor materials*: diss. ... doct. phys.-math. sci., Kharkov, KhIRE, 1984. (In Russ.).
- [4] V. N. Egorov, "Resonance methods for studying dielectrics at microwave frequencies," *Pribory i tekhnika eksperimenta*, no. 2, pp. 5–38, 2007. (In Russ.).
- [5] L. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, and Vijay K. Varadan *Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization*, New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [6] M. V. Detinko, *Physical foundations of the non-destructive microwave resonator method for local control of the electrophysical parameters of semiconductors*. Tomsk: Publishing House of Tomsk University, 1988. (In Russ.).

- [7] A. S. Zavyalov, *Measurement of parameters of materials at microwave frequencies*, Tomsk: Publishing House of TGU, 1985. (In Russ.).
- [8] A. A. Brandt, *Investigation of dielectrics at superhigh frequencies*. Moscow: Fizmatizdat, 1963. (In Russ.).
- [9] E. M. Gershenzon, "Methods for determining the parameters of semiconductors and semiconductor films on microwave," *Semiconductor devices and their application*, iss. 23, pp. 3–48, 1970. (In Russ.).
- [10] Yu. Ye. Gordienko, "Resonator measuring transducers in the diagnostics of microlayered structures," *Radiotekhnika*, iss. 100. pp. 253–260, 1996. (In Russ.).
- [11] A. A. Ryabukhin, *Electrodynamic models of resonator sensors in microwave diagnostics of semiconductors*: diss. ... cand. phys.-math. sci. Kharkov: KhNURE, 2002. (In Russ.).
- [12] Yu. Ye. Gordienko, "Measuring transducers for non-destructive testing of the electrical conductivity of films in epitaxial structures of the nn^+ type," *Elektronnaya Tekhnika*, ser. 8, iss. 9, pp. 112–117, 1974. (In Russ.).
- [13] S. Hong, J. Kim, W. Park, and K. Lee, "Improved surface imaging with a near-field scanning microwave microscope using a tunable resonator," *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 3, pp. 524–526, Jan. 2002, doi: 10.1063/1.1435068.
- [14] Yu. V. Medvedev, "Technique for non-destructive measurement of resistivity, thickness and lifetime of minor charge carriers over the area of epitaxial films," *Elektronnaya Tekhnika. Ser. 1. Microwave electronics*, no. 10, pp. 50–54, 1984. (In Russ.).
- [15] A. Imtiaz and S. M. Anlage, "Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope," *Journal of Applied Physics*, vol. 100, no. 4, p. 044304, Aug. 2006, doi: 10.1063/1.2234801.
- [16] Yu. E. Gordienko, "The contribution of oscillatory and radiative losses to the characteristics of microwave converters with a coaxial measuring aperture," *Radiotekhnika*, no. 157, pp. 108–114, 2009. (In Russ.).
- [17] A. A. Kuraev, *Electrodynamics and propagation of radio waves*, Minsk: 2004. (In Russ.).
- [18] A. D. Grigoriev, *Electrodynamics and microwave technology*, Moscow: 1990. (In Russ.).

Information about the authors

Dmitrii A. Poletaev, associate professor at V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation. ORCID 0000-0003-2898-960X.

Konstantin S. Maltsev, magister at V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation.

Vadim V. Maiko, director of the Institute of Crimean Archeology RAS, Simferopol, Russian Federation.

Vladimir P. Vlasov, researcher at the Institute of Crimean Archeology RAS, Simferopol, Russian Federation.

Модель процесса самоорганизации водителя ритма сердца

Алдонин Г. М., Черепанов В. В.

Сибирский федеральный университет,

Институт инженерной физики и радиоэлектроники

ул. Киренского, 28, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация

GAldonin@sfu-kras.ru

Получено: 19 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В работе рассматривается синергетический анализ физической и физиологической природы электрических процессов в сердце человека, а именно в важнейшей биосистеме — проводящей нервной системе сердца (ПНСС), в частности, водителя ритма сердца (пейсмейкера). В настоящее время активно развиваются перспективные методы исследования ПНСС как активной среды, использующие основы нелинейной динамики. Методы описания активных сред широко используются в исследовании явлений работы водителя ритма сердца, где активная среда представляется как ансамбль некоторых элементов, локально взаимодействующих друг с другом. Самоорганизация в биологических системах может быть представлена на основе нелинейного динамического подхода к описанию механизмов в ПНСС, а именно: рассмотрения Р-клеток пейсмейкера как системы связанных нелинейных осцилляторов. Такой синергетический метод дает реальную основу для моделирования процессов генерации и распространения нервного возбуждения в сердце с использованием теоремы «возврата» Ферми — Пасты — Улама (ФПУ) и теоремы Колмогорова — Арнольда — Мозера (КАМ).

Ключевые слова: пейсмейкер, Р-клетки, автоматизм, самоорганизация, самоподобие, автоволны, солитон, n -мерный тор, теорема «возврата» ФПУ, КАМ-теорема.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Алдонин Г. М., Черепанов В. В. Модель процесса самоорганизации водителя ритма сердца // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 4. С. 472—483.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Алдонин, Г. М. Модель процесса самоорганизации водителя ритма сердца / Г. М. Алдонин, В. В. Черепанов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 472—483.

1. Введение

Основной функцией *P*-клеток пейсмейкера является автогенерация электрических импульсов сердечного ритма. Электрические процессы в *P*-клетках водителя ритма определяются циклической работой калиево-натриевого (*K-Na*) насоса. В состоянии покоя работа насоса обеспечивает более высокую концентрацию ионов K^+ внутри клетки и более высокую концентрацию Na^+ вне клетки. В тоже время мембрана более проницаема для ионов K^+ . Поэтому они диффундируют во внеклеточную среду и создают там избыток положительного заряда. Считается, что на мембране в нормальном состоянии периодически возникает электрический потенциал, равный примерно 50—70 мВ, называемый потенциалом покоя (ПП). Сотни тысяч *P*-клеток пейсмейкера, связанных через межклеточную жидкость, являются системой связанных нелинейных осцилляторов (ССНО).

Для моделирования электрической активности предлагались относительно простые концептуальные модели, например аксиоматическая модель Винера и Розенблюта [1], так и более сложные модели ФитцХью — Нагумо и ее модификации [2], в основу которых положено детальное описание трансмембранных токов.

В настоящее время получила развитие перспективная область исследований ПНСС как активной среды. На VI симпозиуме «Биофизика сложных систем. Нелинейные процессы. Самоорганизация в биологических системах» (МГУ, 1999 г.) был представлен нелинейный динамический подход к описанию автоматизма работы пейсмейкера как ансамбля *P*-клеток, которые являются системой связанных нелинейных осцилляторов.

2. Теория

В 1946 г. Н. Винер и А. Розенблют для описания процесса распространения волны возбуждения в сердечной ткани предложили модель клеточного автомата. Модель Винера — Розенблюта была весьма упрощенной; кардиомиоцит, элемент модели, описывался набором дискретных состояний, которые по заданным правилам сменяли друг друга через дискретные промежутки времени. Несмотря на свою простоту, модель Винера — Розенблюта качественно воспроизводит многие феномены, наблюдаемые в реальном миокарде. Однако добиться количественного соответствия результатов, получаемых в этой модели, данным, получаемым в экспериментах на реальном миокарде, оказалось невозможно.

В общем смысле область исследований ПНСС как активной среды представляется как ансамбль некоторых элементов, локально взаимодействующих друг с другом. Согласно модели Н. Винера и А. Розенблюта,

активная среда ПНСС состоит из совокупности сцепленных элементов, находящихся в одном из трех возможных состояний: возбуждения, рефрактерности или покоя. Наличие времени рефрактерности делает возможным существование уже в двумерном случае особых режимов — вращающихся автоволн [3, 4, 5, 6].

Для описания распространения возбуждений в нервном волокне и сердечной ткани предложена модель ФитцХью — Нагумо, порождающая ревербераторы, или вращающиеся спиральные волны. В двумерном случае такие волны называются спиральными волнами (рисунок 1, *а* и *б*), роторами, ревербераторами, или автоволновыми вихрями. Существование автоволновых вихрей — пример самоорганизации, поскольку форма и частота вращения спиральных волн в безграничной среде не связаны с какой-либо неоднородностью, а однозначно определяются свойствами самой среды и не зависят от начальных условий [7, 8]. Феноменология этих процессов может быть объяснена тем, что автоматизм работы водителя ритма является результатом самоорганизации сотен тысяч *P*-клеток, осциллирующих в синоатриальном узле.

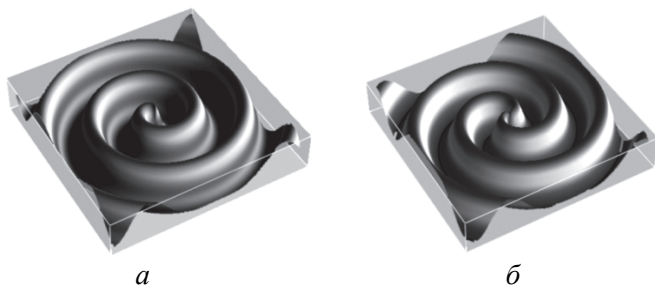


Рис. 1. «Однорукавная» (*а*) и «двухрукавная» (*б*) спиральные волны.

Fig. 1. “Single-arm” (*a*) and “two-arm” (*b*) spiral waves

Другой моделью, описывающей различные типы самоорганизации нелинейных сред, включая образование ревербераторов, является так называемое обобщенное уравнение Гинзбурга — Ландау (1) (рисунок 3).

$$\frac{du}{dt} = a_1 \Delta_2 u + u - a_2 |u|^2 |u| \quad (1)$$

где $u = u_1 + iu_2$ — комплексная функция, a_1 и a_2 — некоторые комплексные константы.

Это уравнение описывает поведение многих нелинейных систем в окрестности точек бифуркации. Для этого уравнения известны автомодельные решения, которые записываются в виде:

$$u(x, y, z) = R(x, y) \exp\{i\omega t + ia(xy)\} \quad (2)$$

На рисунке 2 и рисунке 3 приведены модели спиральных волн модели ФитцХью — Нагумо и Гинзбурга — Ландау.

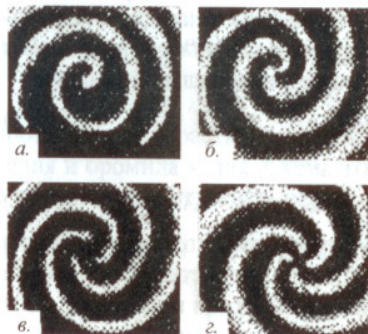


Рис. 2. Спиральные волны модели ФитцХью — Нагумо с топологическими зарядами, равными единице (а), двум (б), трем (в) и четырем (г) в химически активной среде.

Fig. 2. Spiral waves of the FitzHugh–Nagumo model with topological charges equal to (a) one, (b) two, (c) three, and (d) four in a chemically active medium

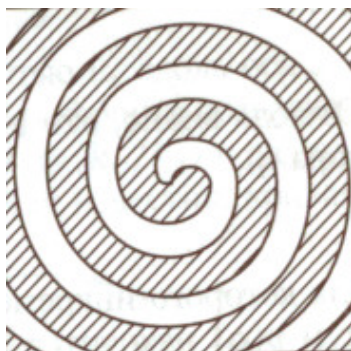


Рис. 3. Спиральная волна, описываемая решением уравнения Гинзбурга — Ландау.

Fig. 3. Spiral wave described by the solution of the Ginzburg–Landau equation

Частные модели не объясняют, каким образом сотни тысяч *P*-клеток пейсмейкера синхронно за счет метаболизма на клеточном уровне создают на мембране размером в десятки микрон потенциал в десятки милливольт с цикличностью в секундном диапазоне. Моделирование процессов генерации и распространения нервного возбуждения в ПНСС возможно на основе моделей синхронизации системы связанных нелинейных осцилляторов. Синхронизация ССНО является одним из значимых инструментов самоорганизации в биоструктурах. Такая задача имеет место при исследо-

вании ритмогенеза в синоатриальном узле, который состоит из сотен тысяч осцилляторных клеток пейсмейкеров, имеющих собственные циклы.

Одна пейсмейкерная клетка не может эффективно управлять ритмом всех клеток синоатриального узла (САУ); эффективная перестройка ритма САУ может быть достигнута лишь группой электрически тесно связанных клеток пейсмейкера. Но если рассматривать автоматизм работы водителя ритма сердца как результат самоорганизации в синоатриальном узле сотен тысяч осцилляторных P -клеток, имеющих собственные циклы осцилляций и связанных между собой через межклеточную жидкость, то можно получить реальную модель автоматизма работы пейсмейкера [9].

Процесс развития автоколебаний в таких самоорганизующихся системах целесообразно представить моделью ССНО и на основе теоремы «возврата» Ферми — Пасты — Улама (ФПУ) (3), которая объясняет образование различных мод колебаний по мере распространения возбуждения по связям между элементами структуры от первоначальных самых высокочастотных колебаний элемента структуры до самых низкочастотных совместных колебаний всех элементов структуры.

$$m \frac{d^2 y_n}{dt^2} = k(y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}) + k\alpha[(y_{n+1} - y_n)^3 - (y_n - y_{n-1})^3], n = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (3)$$

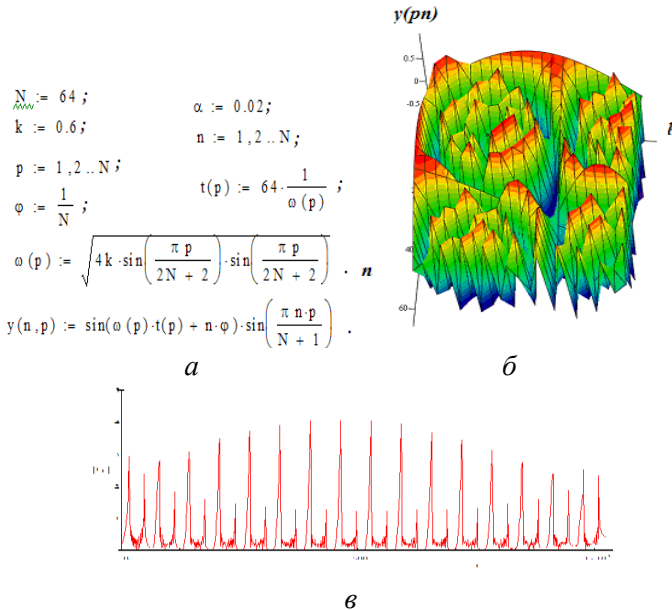


Рис. 4. Модель ФПУ – а, решение теоремы ФПУ – б, ее спектр – в.

Fig. 4. Fermi-Pasta-Ulam (FPU) model – a, solution of the FPU theorem – b, its spectrum – c

Эта система колебаний представляет собой, согласно теореме А. Н. Колмогорова, n -мерный тор, критерием устойчивости которого согласно КАМ-теореме является иррациональное отношение соседних мод, наилучшее из которых соответствует «золотому сечению» [10]. Хаотическое поведение в области сепаратрис — свойство нелинейных осцилляторов. При возмущении переход к хаосу сопровождается последовательностью бифуркаций и, в соответствии с теорией универсальности Фейгенбаума, в ССНО возможно развитие фрактальных структур, обладающих масштабно-инвариантным самоподобием [11]. Хаос перестает быть синонимом беспорядка и обретает тонкую структуру самоподобного структурно-устойчивого множества фракталов.

Впервые решение вопроса об устойчивости таких систем было дано теорией Колмогорова — Арнольда — Мозера (КАМ-теорема) [12]. КАМ-теорема объясняет механизмы и условия формирования фрактальных структур на основе n -мерного тора по принципу масштабно-инвариантного самоподобия. Квазипериодическое движение с несоизмеримыми частотами на торе при добавлении нелинейного возмущения в результате бифуркаций Хопфа становится «складчатым».

Если отношение частот равно рациональному числу, возникает резонанс, если иррациональному числу — траектория не замыкается. С течением времени она будет сколь угодно близко подходить к любой точке фазового пространства. Наилучшим в этом смысле будет иррациональное отношение частот мод, называемое числом вращения w^* , генерирующего ряд Фибоначчи и отражающего перераспределение энергии по степеням свободы системы в соотношении цепной дроби, так называемого «золотого сечения» [10].

$$w^* = \frac{1}{1 + \frac{1}{\dots}} \text{ или } w^* = (\sqrt{5} - 1)/2 = 0.6180339... \quad (4)$$

Ряд Фибоначчи является фундаментальным масштабным законом самоподобия (скейлингом) структурно-устойчивых систем в природе и объясняет связь спектров типа $1/f$ с гармонической самоорганизацией, где правило гармонии является признаком и условием самоорганизации [13].

Учитывая эти особенности морфогенеза, согласно модели самоорганизации на основе n -мерного тора и теореме Колмогорова — Арнольда — Мозера определим модель ССНО для открытых систем как траекторию и спектр осцилляторов, отношения частот которых соответствуют ряду Фибоначчи (рисунок 4)

$$F = F_0(t) + \sum_{i=0}^n F_i(t), i = 1, \dots, \quad (5)$$

где $F_0(t) = Ae^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}$ — начальная функция без возмущений;
 $F_i(t) = 0,618A_{i+1}e^{j(1,618\omega_{i+1}t + 0,618\varphi_{i+1})}$ — функция, в которой амплитуда и частота изменяются в иррациональном соотношении «золотого сечения» по отношению к начальной функции (рисунок 5, а).

Сумма таких циклическостей образует солитоны, переносящие энергию колебаний в низкочастотную область, формируя по мере возрастания размерности тора спектр вида $1/f$ (рисунок 5, б). Взаимодействие осцилляторов показывает формирование одиночных волн (солитонов), которые переносят энергию колебаний в низкочастотный спектр. Спектр такой системы будет:

$$S(f) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{(f_i - f)}{2k^2}} \quad (6)$$

Здесь $A_0 = 1, f_0 = 1, i = 1, \dots, n; A_i = 0,618 \cdot A_{i-1}; f_i = 0,618 \cdot f_{i-1}$.

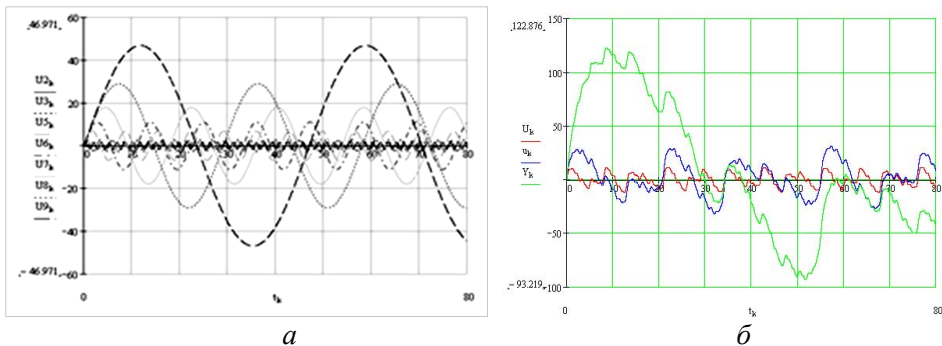


Рис. 5. Модель n -мерного тора ССНО (а) и формирование солитонов в ССНО (б).

Fig. 5. Model of an n -dimensional torus of system of coupled nonlinear oscillators, SCNO (a) and the formation of solitons in SCNO (b)

Для статистической модели шума $1/f$ представим параметры его мод нормально распределенными, т. е. $A_i = A_i + \Delta A_i$ и $f_i = f_i + \Delta f_i$, где ΔA_i и Δf_i — случайные возмущения амплитуд и частот спектральных составляющих, распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением $\sigma_{\Delta A_i}$ и $\sigma_{\Delta f_i}$.

В зависимости от коэффициента связи k происходит формирование спектральной характеристики вида $1/f$. При значении $\sigma = 0,02$ обеспечива-

ется согласие с условием $S_i \cdot f_i = \text{const}$ для спектральной характеристики ССНО вида $1/f$ (рисунок 6). Формирование спектральной характеристики вида $1/f$ происходит за счет перераспределения энергии в спектре связанных осцилляторов в сторону низкочастотных мод по мере увеличения количества осцилляторов в зависимости от коэффициента связи k .

Такой автоволновый механизм формирования спектра был показан М. Крускалом и Н. Забуским в модели возврата ФПУ, доказавшим с помощью теоремы Д. И. Кортевега и его ученика Г. де Вриза, что равномерному распределению энергии препятствует солитон (вихрь), переносящий энергию из высокочастотной группы мод в низкочастотную [14].

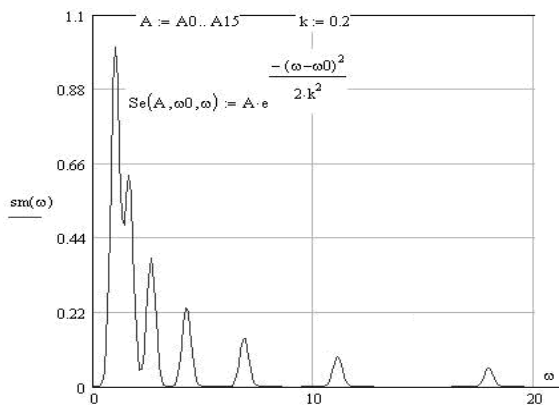


Рис. 6. Спектр n -мерного тора ССНО.

Fig. 6. Spectrum of an n -dimensional torus SCNO

Теорема ФПУ и нелинейная модель ССНО на основе КАМ-теоремы (теорема Колмогорова — Арнольда — Мозера) в виде n -мерного тора объясняет, каким образом тысячи клеток пейсмейкера создают на мембране потенциал в десятки милливольт с цикличностью в секундном диапазоне (рисунок 7, б).

На рисунке 7 отображен механизм возбуждения P -клеток согласно модели n -мерного тора КАМ-теоремы и теоремы «возврата» ФПУ.

Согласно КАМ-теореме механизм распространения возбуждения в ССНО происходит одиночными волнами (солитонами) в системе колебаний ССНО в виде n -мерного тора (рисунок 7, а) [15].

Модель на основе нелинейной модели n -мерного тора и КАМ-теоремы показывает, как образуется волна возбуждения в виде солитона. Его периодичность определяется количеством клеток-микроосцилляторов пейсмейкера. Граничным условием для нормы необходимо принять нижнюю частоту порядка одного герца, а ее амплитуду — на уровне ~ 50 мВ.

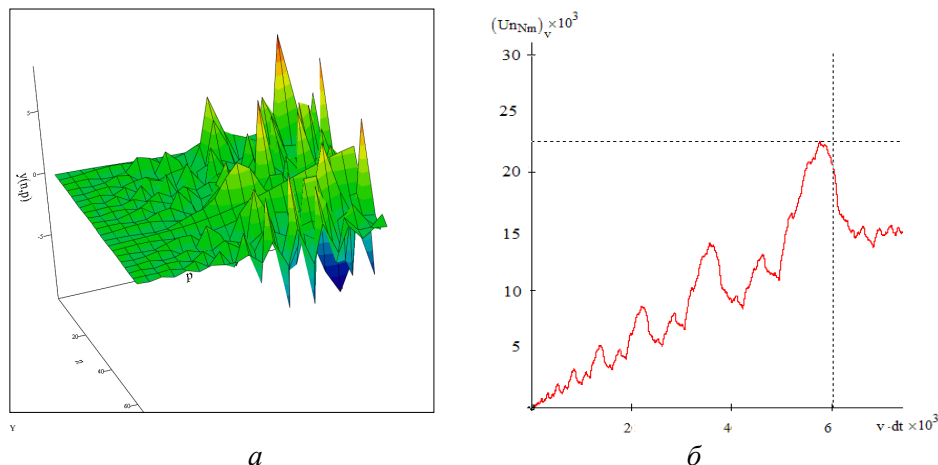


Рис. 7. Механизм возбуждения P -клеток согласно модели n -мерного тора КАМ-теоремы (а) и нелинейная модель формирования солитонов ССНО на основе КАМ-теоремы (б).

Fig. 7. The mechanism of excitation of P -cells according to the model of the n -dimensional torus of the KAM theorem (a) and the nonlinear model of the formation of SCNO solitons based on the KAM theorem (b)

3. Заключение

Автоматизм работы всех клеток синоатриального узла может обеспечить лишь группа электрически связанных через межклеточную жидкость клеток пейсмейкера размерностью в сотни тысяч клеток. При этом образуется волна возбуждения в виде солитона, периодичность которого определяется количеством микроосцилляторов — клеток пейсмейкера. Модель на основе нелинейной модели n -мерного тора теоремы ФПУ и КАМ-теоремы как условия устойчивости n -мерного тора показывает образование волны возбуждения в виде солитона. С помощью нелинейной модели n -мерного тора и КАМ-теоремы можно оценить, при какой размерности системы и за какое время образуется солитон с амплитудой десятки милливольт при значении потенциала клетки пейсмейкера в $14,1 \cdot 10^{-8}$ В за счет формирования солитонов в n -мерном торе ССНО.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (грант проект № 19-37-90072).

Список литературы

1. Wiener N., Rosenblueth A. The mathematical formulation of the problem of conduction of impulses in a network of connected excitable elements, specifically in cardiac muscle // Arch Inst Cardiol Mex. 1946. Vol. 16(3). P. 205—265.

2. FitzHugh R. A. Impulses and physiological states in theoretical model of nerve membrane // Biophys. 1961. No. 1. P. 445—466.
3. Hodgkin A. L., Huxley A. F. A quantitative description of membrane current and its application conduction and excitation in nerve // J. Physiol., 1952. P. 500—544.
4. Zhang H., Holden A. V., Boyett M. R. The pacemaking system of the heart : from coupled oscillators to nonlinear waves // Nonlinear Analysis : Theory, Methods & Applications. 1997. Vol. 30, no. 2. P. 1019—1027.
5. Nonlinear Dynamics in Physiology and Medicine. Eds A. Beuter et al. New York : Springer Verlag Inc., 2003. 436 p.
6. Мазуров М. Е. Механизм установления единого ритма много пейсмекерного сино-atriального узла // Биофизика. 1990. Т. 35, № 6. С. 1001—1006.
7. Мазуров М. Е. Ритмогенез в синоатриальном узле сердца // Биофизика. 2006. Т. 51, № 6. С. 1092—1099.
8. Клиническая аритмология / Под ред. А. В. Ардашева. Москва : ИД Медпрактика, 2009. 1220 с.
9. Алдонин Г. М. Структурный анализ на основе модели самоорганизации биоструктур // Журнал радиоэлектроники. 2006. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov06/4/text.html>.
10. Мозер Ю. КАМ-теория и проблемы устойчивости. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 448 с.
11. Алдонин Г. М., Черепанов В. В., Ярыгина О. Л. Самоорганизация в системе связанных нелинейных осцилляторов. Радиотехника. 2013. № 6. С. 50—54.
12. Табор М. Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике. М.: УРСС, 2001. 331 с.
13. Алдонин Г. М. Нелинейные динамические модели и структурный анализ проводящей системы сердца // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 46—50.
14. Zabusky N. J., Kruskal M. D. Interaction of “Solitons” in a collisionless plasma and the recurrence of initial states // Phys. Rev. Lett. 1965. Vol. 15. P. 240—243.
15. Алдонин Г. М. Структурный анализ самоорганизующихся систем. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. 344 с.

Информация об авторах

Алдонин Г. М., сотрудник Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Российская Федерация.

Черепанов В. В., сотрудник Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Российская Федерация.

Model of the Process of Self-Organization of the Heart Rhythm

G. M. Aldonin and V. V. Cherepanov

Siberian Federal University,
Institute of Engineering Physics and Radioelectronics
79, Svobodny prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
GAldonin@sfu-kras.ru

Received: May 19, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The paper considers a synergistic analysis of the physical and physiological nature of electrical processes in the human heart, namely in the most important biosystem – the conduction nervous system of the heart (CNSH), in particular, the heart pacemaker. Currently, promising methods for studying CNSH as an active medium are being actively developed, using the foundations of nonlinear dynamics. Methods for describing active media are widely used in the study of the phenomena of the work of the heart pacemaker, where the active medium is represented as an ensemble of some elements that locally interact with each other. Self-organization in biological systems can be represented on the basis of a non-linear dynamic approach to the description of mechanisms in CNSH, namely, the consideration of P-cells of the pacemaker as a system of coupled non-linear oscillators. Such a synergistic method provides a real basis for modeling the processes of generation and propagation of nerve excitation in the heart using the Fermi–Pasta–Ulam (FPU) “return” theorem and the Kolmogorov–Arnold–Moser (KAM) theorem.*

Keywords: *pacemaker, P-cells, automatism, self-organization, self-similarity, auto-waves, soliton, n-dimensional torus, Fermi–Pasta–Ulam (FPU) “return” theorem, Kolmogorov–Arnold–Moser (KAM) theorem.*

For citation (IEEE): G. M. Aldonin and V. V. Cherepanov, “Model of the Process of Self-Organization of the Heart Rhythm,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 472–483, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.35. (In Russ.).

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (project no. 19-37-90072).

References

- [1] N. Wiener and A. Rosenblueth, “The mathematical formulation of the problem of conduction of impulses in a network of connected excitable elements, specifically in cardiac muscle,” *Arch Inst Cardiol Mex.*, vol. 16(3), pp. 205–265, 1946.

- [2] R. FitzHugh, "Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane," *Biophysical Journal*, vol. 1, no. 6, pp. 445–466, Jul. 1961, doi: 10.1016/S0006-3495(61)86902-6.
- [3] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley, "A quantitative description of membrane current and its application conduction and excitation in nerve," *J. Physiol.*, pp. 500–544, 1952.
- [4] H. Zhang, A. V. Holden, and M. R. Boyett, "The pacemaking system of the heart: From coupled oscillators to nonlinear waves," *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, vol. 30, no. 2, pp. 1019–1027, Dec. 1997, doi: 10.1016/s0362-546x(96)00155-1.
- [5] *Nonlinear Dynamics in Physiology and Medicine*. Eds A. Beuter et al. New York: Springer Verlag Inc., 2003, doi: 10.1007/978-0-387-21640-9.
- [6] M. E. Mazurov, "The mechanism of establishing a single rhythm of the multipacemaker sinoatrial node," *Biophysics*, vol. 35, no. 6, pp. 1001–1006, 1990. (In Russ.).
- [7] M. E. Mazurov, "Rhythmogenesis in the sinoatrial node of the heart," *Biophysics*, vol. 51, no. 6, pp. 1092–1099, 2006. (In Russ.).
- [8] *Clinical arrhythmology*, ed. A. V. Ardasheva. Moscow: Medpraktika, 2009. (In Russ.).
- [9] G. M. Aldonin, "Structural analysis based on the model of self-organization of biostructures," *Journal of radioelectronics*, no. 11, 2006, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov06/4/text.html>. (In Russ.).
- [10] Yu. Moser, *KAM-theory and stability problems*. Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001. (In Russ.).
- [11] G. M. Aldonin, V. V. Cherepanov, and O. L. Yarygina, "Self-organization in a system of coupled nonlinear oscillators," *Radiotekhnika*, no. 6, pp. 50–54, 2013. (In Russ.).
- [12] M. Tabor, *Chaos and integrability in nonlinear dynamics*, Moscow: URSS, 2001. (In Russ.).
- [13] G. M. Aldonin, "Nonlinear dynamic models and structural analysis of the conduction system of the heart," *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, no. 9, pp. 46–50, 2012. (In Russ.).
- [14] N. J. Zabusky and M. D. Kruskal, "Interaction of 'Solitons' in a Collisionless Plasma and the Recurrence of Initial States," *Physical Review Letters*, vol. 15, no. 6, pp. 240–243, Aug. 1965, doi: 10.1103/physrevlett.15.240.
- [15] G. M. Aldonin, *Structural analysis of self-organizing systems*, Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2017.

Information about the authors

G. M. Aldonin, employee of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation.

V. V. Cherepanov, employee of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation.

УДК 616-07

Задачи совершенствования медицинских антенн для микроволновой радиотермометрии биологических объектов (обзор)¹

¹ Леушин В. Ю., ¹ Агасиева С. В., ^{1,2} Веснин С. Г., ^{1,3,4} Седанкин М. К.,
^{1,5} Порохов И. О., ^{1,6} Ветрова Н. А., ⁶ Горлачева Е. Н., ¹ Сидорова М. И.

¹ ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, 117198, Российская Федерация
Ra3bu@yandex.ru

² ООО «РТМ Диагностика»
ул. Б. Почтовая, д. 55/59, стр. 1 оф. 514, Москва, 105082, Российская Федерация

³ ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна
ул. Маршала Новикова, д. 23, Москва, 123098, Российская Федерация

⁴ РТУ МИРЭА
просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119571, Российская Федерация

⁵ АО «ЦНИРТ И им. академика А. И. Берга»
ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9, Москва, 107078, Российская Федерация

⁶ ФГБОУ ВО МГТУ им. Н. Э. Баумана
2-я Бауманская ул., д. 5, Москва, 105005, Российская Федерация

Получено: 27 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Приведен обзор состояния разработок различных типов антенн, применяемых в медицинских СВЧ радиотермографах. Сформулированы проблемы современной микроволновой радиотермометрии, связанные с разработкой новых антенн. Сформулированы задачи дальнейших исследований, направленных на создание новых конструкций конформных антенн и антенных решеток, направленных на улучшение характеристик и расширение функциональных возможностей и медицинских радиотермографов.

Ключевые слова: микроволновая радиотермометрия, радиояркостная температура, антенна-аппликатор.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00113, <https://rscf.ru/project/22-19-00113/>

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Задачи совершенствования медицинских антенн для микроволновой радиотермометрии биологических объектов / В. Ю. Леушин и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 4. С. 484—514.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Задачи совершенствования медицинских антенн для микроволновой радиотермометрии биологических объектов / В. Ю. Леушин, С. В. Агасиева, С. Г. Веснин и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 484—514.

1. Введение

Использование метода микроволновой радиотермометрии (МР) позволяет неинвазивно получать информацию о температуре внутренних тканей биологического объекта (БО) на основе измерения интенсивности их собственного теплового излучения в микроволновом диапазоне. В качестве датчиков микроволнового излучения используются антенны-аппликаторы, располагаемые непосредственно на поверхности БО и подключаемые к входу высокочувствительного радиометрического приемника. Использование многоканальных антенных решеток, работающих в нескольких диапазонах частот, позволяет проводить динамические исследования глубинных температур БО с реконструкцией трехмерных распределений температуры. Целью настоящей работы является проведение анализа современного состояния разработок антенн для микроволновых радиометрических приборов и формулирование задач дальнейших исследований, направленных на создание новых конструкций конформных антенн и антенных решеток, обеспечивающих улучшение характеристик и расширение функциональных возможностей медицинских радиотермографов.

2. Обзор современного состояния разработок медицинских антенн для применения в микроволновой радиотермометрии

Принцип действия микроволновых радиотермографов основан на регистрации микроволнового излучения биологических объектов. Посредством измерения интенсивности электромагнитного излучения организма в радиочастотном диапазоне можно определить его внутреннюю температуру. Этот метод называется микроволновой радиотермометрией. Прием микроволнового излучения в медицинских диагностических приборах — радиотермографах обеспечивается специальными датчиками, располагаемыми на поверхности биологического объекта — так называемыми антеннами-аппликаторами. Антенна-аппликатор является ключевым элементом радиотермографа, значимо определяющим его диагностические возмож-

ности. Конструкция антенны-аппликатора должна учитывать особенности исследуемого органа. Ввиду существенного различия органов и тканей по биофизическим свойствам, а также высокой вариативности анатомических особенностей у разных пациентов, невозможно осуществлять диагностику разных заболеваний одной универсальной антенной. Для каждого органа необходима определенная конструкция антенны. Антенна должна без отражений принимать шумовой сигнал, поступающий из биологического объекта, но не принимать излучения внешнее излучение [1]. Известно несколько типов антенн-аппликаторов, применяющихся в медицине, а именно: печатные [2—5, 11], волноводные [6—10], вибраторные или рамочные [11, 12], а также внутриполостные антенны различных типов [13].

Волноводные антенны для микроволновой радиотермометрии представляют собой отрезок волновода, заполненного диэлектриком и открытого с одной стороны. Наибольшее распространение получили антенны, построенные на основе круглого волновода [6—9], т. к. углы прямоугольного волновода могут травмировать пациента. Многие специалисты использовали и прямоугольные волноводы, представленные в работах [14—18]. Волноводная антенна соединена со входным каскадом радиотермометра с помощью коаксиального кабеля, поэтому на выходе антенны установлен коаксиальный разъем. На ранних этапах развития микроволновой радиотермометрии для приема собственного излучения биологического объекта использовались антенны, построенные на основе прямоугольного волновода. Открытый конец волновода контактирует с биологическим объектом, противоположный конец короткозамкнутый. Для обеспечения согласования с биологическим объектом волноводы заполняют диэлектриком с высоким значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 10\text{—}25$). Возбуждение волновода, как правило, осуществляется с помощью металлического штыря, который устанавливается внутри волновода вдоль силовых линий электрического поля. Штырь является продолжением внутреннего проводника коаксиального кабеля, экран коаксиального кабеля запаивается на металлическую поверхность волновода. При уменьшении высоты волновода происходит расширение поля антенны в E -плоскости, что не всегда желательно.

Возбуждение волновода круглого сечения можно проводить самыми различными способами, но наибольшее распространение получили щелевые излучатели в форме «бабочки». Для уменьшения размеров можно увеличивать диэлектрическую проницаемость. В частности, в [7] представлена антенна для работы в десятисантиметровом диапазоне, имеющая диаметр 8 мм и длину волновода 3.7 мм. Волновод заполнен диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 80$. При такой малой высоте волно-

водная антенна становится похожей на печатную антенну. Для повышения помехозащищенности волноводную антенну помещают в дополнительный экран [19]. Для снижения влияния температуры антенны на температуру кожи в некоторых случаях антенну нагревают. Следует отметить, что, антенны, работающие в серийных приборах, представляют собой достаточно сложные устройства, в ряде случаев в их состав включают ИК-измеритель температуры кожи, т. к. для диагностики необходимо знать не только внутреннюю температуру, но и температуру кожных покровов. Волноводные антенны имеют приемлемое согласование в широкой полосе частот, малые потери и высокую глубину измерения. Недостатками антенн на базе волноводов является их значительный вес, высокая теплоемкость, низкая помехозащищенность, прямые углы рабочей поверхности антенны, вызывающие болезненные ощущения у пациента, а также высокая стоимость и, как правило, большие продольные размеры. В работе [62] приведены расчеты оптимальных параметров волноводной антенны-аппликатора (формы и размеров волновода, типа используемого диэлектрика), предназначенной для измерения глубинной температуры в диапазоне 32—38 °С

В [65] представлена конструкция волноводной антенны, которая позволяет увеличить эффективную глубину измерения радиояркой температуры и улучшить пространственное разрешение за счет фокусировки излучения, принимаемого от участка БО, расположенного на заданном расстоянии от центра излучателя. Антенна-аппликатор содержит закрытый с одного конца отрезок волновода, частично или полностью заполненный диэлектриком. На противоположном открытом конце волновода расположена диэлектрическая пластина, предназначенная для контакта с БО. Устройство возбуждения электромагнитных волн выполнено в виде металлического проводника и делителя мощности.

В работе [66] рассмотрены вопросы повышения разрешающей способности радиотермографов. Описывается антенна, в открытый конец волновода которой установлена фокусирующая диэлектрическая линза, соприкасающаяся с БО. Часть цилиндрического волновода заполнена диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, сравнимой с диэлектрической проницаемостью исследуемого участка тела. Диэлектрическая линза обеспечивает фокусировку электрического поля антенны на заданном расстоянии от поверхности. Там же представлена антенна, реализованная в виде фазированной антенной решетки (ФАР), где принимающие элементы расположены в виде квадрата 3×3, 4×4 или 5×5. Сигнал от элементов ФАР поступает в систему суммирования, выполненную в виде симметричной микрополосковой конструкции. Суммирование сигналов производится с учетом фазовой задержки, необходимой для фокусировки луча.

Вопросы фокусировки антенн для микроволновой радиотермометрии были подробно рассмотрены в [69], где приводится сравнительный анализ малогабаритных антенн. Показано, что при использовании фокусировки наблюдаемый контраст радиоярких температур может увеличиваться в несколько раз при исследовании участков, расположенных на большой глубине.

Вибраторные или рамочные антенны широко использовались на ранних этапах развития микроволновой радиотермометрии [11, 12, 20]. Обычно вибраторные антенны изготавливались из тонкой пружинной проволоки, но возможна реализация вибраторной антенны в печатном исполнении [21]. Обычно электрическая длина рамки по периметру составляет 360° . Возбуждают рамку с помощью коаксиально кабеля. Для уменьшения вытекания тока на экран коаксиального кабеля используют запирающий стакан длиной в четверть длины волны в свободном пространстве. Эти антенны имеют хорошее согласование в широком диапазоне частот, компактны, имеют хороший контакт с телом, простую конструкцию и низкую стоимость. Кроме этого, такие антенны практически не оказывают влияния на температуру кожи. [22]. Основным недостаток вибраторных антенн, препятствующий их широкому использованию — низкая помехозащищенность, т. к. они не имеют экрана, и помехи наводятся непосредственно на незащищенный излучатель и поступают в приемный СВЧ-тракт радиометрического приемника. По сравнению с волноводными антеннами, рамочные и вибраторные антенны имеют меньшую глубину измерения и более высокие электрические потери. В [21] предложено для мониторинга температуры в процессе гипертермии использовать замкнутые щелевые антенны, которые можно отнести к печатным антеннам, описанным далее. Прямоугольная антенна предназначена для работы в диапазоне 1.5—2 ГГц, круглая — на частоте 900 МГц. Они напечатаны на диэлектрической подложке из материала *Rogers 4003* ($\epsilon = 3.55$, $\text{tg}\delta = 0.027$) толщиной 1,524 мм.

В [67] приводятся результаты исследования вибраторной антенны-аппликатора радиометра, предназначенного для мониторинга функциональных изменений головного мозга в диапазоне частот 650—850 МГц. Рассматриваемая антенна была оптимизирована по принципу получения максимальной напряженности электрического поля на глубине 50 мм. Рассматриваемая антенна по результатам расчета имеет коэффициент отражения в рабочей полосе частот не выше -15 дБ.

В отличие от волноводных антенн, у которых между излучателем и апертурой антенны расположен отрезок волновода, у печатных антенн из-

лучатель напечатан непосредственно на диэлектрическом основании. Толщина основания обычно не превышает 2 мм. Поэтому печатные антенны легче волноводных, дешевле, имеют небольшую высоту и оказывают меньшее влияние на температуру кожи. В последние годы эти антенны получили широкое распространение [23—44]. Во многих случаях печатные антенны используются совместно с болюсом, который представляет собой тонкий слой диэлектрика, размещаемого между антенной и БО. Болюс позволяет согласовать антенну и увеличить расстояние между излучателем и БО, минимизируя влияние на антенну реактивных электрических полей. Это позволяет увеличить глубину измерения. Размеры болюса, как правило, немного больше или равны размеру апертуры антенны. Можно выделить следующие классы печатных антенн: печатные антенны со спиральным излучателем [31—40]; печатные антенны с эллиптическим излучателем [23]; печатные антенны с прямоугольным излучателем (*patch*-антенны) [24—31]; печатные антенны с щелевым излучателем [41—44, 45, 63]; дипольные или вибраторные печатные антенны [21, 44].

В работе [63] приводятся радиофизические параметры вибраторных антенн-аппликаторов для физических и медико-биологических исследований. Представлены петлевые микрополосковые СВЧ-антенны, способные работать в диапазоне частот от 400 МГц до 1 ГГц с шириной рабочей полосы до 50 МГц. Число петель в такой антенне-аппликаторе может варьироваться, в частности, представлены варианты ее исполнения в виде двух- и трехпетлевой антенн, которые имеют разную чувствительность к поляризации внешних радиоволн.

В работе [64] приведены результаты моделирования двух вариантов печатного широкополосного СВЧ-аппликатора, который может быть применен для диагностики бронхиальной астмы. Представленный аппликатор реализован с применением СВЧ-ламината Флан-10 толщиной 1 мм ($\epsilon = 10$) и способен работать в диапазоне частот 1100—1500 МГц. В работе [68] представлены результаты моделирования спиральной печатной антенны с рабочим диапазоном частот 3—5 ГГц. Предлагаемая конструкция может использоваться при создании прибора для измерения собственного электромагнитного излучения головного мозга. Ширина витков и зазоров спирали равна 0.45 мм, минимальный радиус — 1 мм, максимальный радиус — 5.98 мм. Для расширения полосы рабочих частот при наличии плоского экрана высота подвеса спирали выбрана достаточно большой; это было реализовано с помощью пятислойной подложки. Антенна имеет дополнительный цилиндрический металлический экран и подключается к приемнику с помощью SMA-разъема. В качестве диэлектрической подложки был выбран материал *Arlon AD1000* ($\epsilon = 10.2$; $\text{tg } \delta = 0.0023$). Толщина каждого

слоя составляет 0.635 мм. Для уменьшения зависимости характеристик антенны от электрических параметров верхних слоев головы в конструкцию антенны добавлен дополнительный слой диэлектрического материала между плоскостью спирали и поверхностью антенны. По результатам моделирования уровень отраженного сигнала в рабочей полосе частот антенны составляет менее -10 дБ.

В работе [70] представлена печатная спиральная широкополосная антенна для измерения внутренней температуры тела человека. Разработанная антенна выполнена с использованием двух слоев подложки *Rogers RO4003C* ($\epsilon_r = 3.55$, $\tan \delta = 0.0027$) толщиной 0.813 мм с использованием лазерного структурирования. Слои соединены вместе с помощью тонкого слоя поливинилацетатного клея (толщина 50 мкм, $\epsilon_r = 3.3$) без использования промежуточного медного слоя. Витки спирали имеют толщину 0.675 мм при расстоянии между витками в 1.5 мм; внутренний радиус спирали принят равным 1.93 мм для соответствия частотам около 8 ГГц; внешний радиус равен 17.17 мм и соответствует частотам около 0.9 ГГц. Металлические витки антенны защищены тонким слоем пластика ($h = 0.1$ мм). По результатам моделирования разработанная антенна имеет коэффициент отражения S_{11} менее -15 дБ в диапазоне частот 1—4 ГГц.

В работе [71] предложена печатная антенна с излучателем в форме логарифмической спирали для пассивного измерения температуры при диагностике пузырно-мочеточникового рефлюкса (ПМР). Антенна работает на частоте 1.375 ГГц с шириной частотной полосы в 550 МГц и имеет погрешность измерений температуры, равную 0.03 °С. Антенна имеет диаметр 80 мм и выполнена на подложке *Rogers RO4350B* толщиной 1.524 мм; для защиты от электромагнитных помех антенна помещена в алюминиевый цилиндр. Для уменьшения отражения на границе антенна — биообъект были добавлены тонкие диэлектрические диски толщиной 1 мм с различным коэффициентом пропускания ($5 \leq \epsilon_r \leq 30$). В работе [72] проведено моделирование метода диагностики ПМР, состоящего в неинвазивном нагревании мочи внутри мочевого пузыря с помощью микроволновой антенны и одновременного измерения скорости нагрева. В качестве антенны для нагревания была использована печатная антенна с излучателем в виде двух прямоугольных концентрических областей (DCC). Антенна изготовлена на подложке из материала *RO4035B* толщиной 1.524 мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3.56$. Передняя часть антенны состоит из листа медной фольги с квадратным участком со стороной 25 мм в центре, окруженным заземляющей плоскостью через зазор в 2.5 мм. Задняя сторона антенны состоит из микрополосковых питающих линий, подключенных к середине каждой стороны квадратной пластины. Эта конструк-

ция также включает фазовую задержку в 180° на смежных сторонах квадрата, что позволяет повысить проникающую способность по сравнению с другими антеннами *DCC* за счет суммирования фаз электрических полей по центру с противоположных сторон квадрата. Для радиометрии была использована планарная эллиптическая антенна, работающая в полосе частот 3.25—3.75 ГГц. Радиометрическая антенна включает в себя микрополосковую питающую линию, эллиптическую пластину на задней стороне и больший по размеру эллиптический излучатель на передней стороне.

В [73] авторами разработано портативное устройство неинвазивного измерения внутренней температуры тела для применения в различных областях медицины. Устройство состоит из широкополосной микроволновой антенны, многочастотного микроволнового радиометра и блока цифровой обработки. Разработка позволяет проводить 2D- и 3D-визуализацию распределения температуры благодаря последовательному измерению температур на разной глубине с использованием разных частотных диапазонов в пределах от 1 до 4 ГГц. Разработанная антенна состоит из медной заземляющей пластины размером 40 мм × 20 мм и толщиной 0.5 мм. Перпендикулярно плоскости заземления без контакта с ней расположен цилиндрический медный подводящий кабель радиусом 0.5 мм и высотой 10 мм. В качестве излучателя выбраны две одинаковые треугольные пластины с основанием в 10 мм и высотой в 20 мм, расположенные на верхней части кабеля в форме «бабочки». Наиболее многообещающей оказалась структура, в которой диэлектрическая подложка погружена в жидкость (1,2-пропандиол 68 %, деионизированная вода 34.4 %, *NaCl* 0.79 %), соответствующую диэлектрическим свойствам человеческого тела для наилучшего соответствия импеданса ($\epsilon = 41.5$). Такая структура также включает в себя 16 металлических стержней радиусом 0.25 мм, по 8 с каждой стороны, расположенных симметрично для увеличения общей проводимости и улучшения согласования импеданса антенны. Размеры антенны позволяют использовать ее в составе переносного измерительного устройства.

В [74] выполнено моделирование двухэлементной печатной гибкой антенны для диагностики рака груди с питанием через компланарный волновод (*co-planar waveguide*, *CPW*) с помощью программ численного моделирования. Элементарная часть антенны представляет собой тонкий прямоугольный слой, напечатанный на подложке из полиимида *Kapton* толщиной 0.125 мм. Для сохранения гибкости антенны прямоугольный излучатель с двумя симметричными отверстиями питается через компланарный волновод, обеспечивающий характеристический импеданс в 100 Ом. Т-образный переход используется для передачи мощности элементам антенной решетки, кроме того, линия питания *CPW* с характеристическим

сопротивлением 50 Ом также используется для возбуждения глобальной антенной решетки. Кроме того, в канал CPW добавляется настроечный шлейф с оптимизированными размерами и положением для улучшения характеристик антенной решетки. Предлагаемая антенная решетка имеет общий размер около $5,3 \text{ см} \times 5 \text{ см}$, имеет коэффициент усиления 6 дБ и широкую полосу пропускания ($3.0 \pm 0.48 \text{ ГГц}$); такие характеристики свидетельствуют о высокой чувствительности радиометра при очень малых плотностях мощности собственного излучения патологической ткани молочных желез.

В работе [75] для обнаружения локальных изменений температуры и проводимости в экспериментах с фантомом мозга использовался прототип системы радиометрии ближнего поля. Разработанный радиометр выполнен с использованием переключателя Дикке и представляет собой чувствительный приемник полной мощности, работающий на частоте $(1,5 \pm 0,05) \text{ ГГц}$. Приемник имеет четыре входа, по одному на каждую используемую антенну. Радиометрическая система ближнего поля основана на 4-элементной решетке планарных эллиптических антенн ($5 \text{ см} \times 4 \text{ см}$). Коэффициент отражения выбранных антенн составляет -20 дБ в диапазоне $1,45\text{—}1,55 \text{ ГГц}$ при излучении в биологическую ткань. Результаты анализа распределения электрического поля внутри модели головы показывают, что антенны способны эффективно сканировать области мозга на глубине до 3 см.

В статье [76] описывается использование метода конечных разностей во временной области для разработки и моделирования симметричной дипольной антенны с треугольными плечами и спиральной антенны, помещенных в цилиндрический корпус, для использования в микроволновой радиометрии. Новые сенсоры были протестированы и проверены на различных фантомах и биологических тканях. Результаты предполагают достаточные характеристики широкополосных антенн для потенциального использования в функциональной диагностике головного мозга. Для выбора оптимальной конструкции антенн, отвечающей необходимым требованиям для их применения в радиометрии, были смоделированы колебательные и спиральные антенны ближнего поля. Каждая антенна размещена в изоляционном корпусе с толщиной стенки 2 мм. Подложка представляет собой печатную антенну из фторопласта диаметром 26 мм. Заглушки корпусов также изготавливаются из фторопласта и имеют толщину 2 мм. Для анализа вибраторной антенны был выбран симметричный диполь с треугольными плечами. Размер проекции токоведущих элементов антенного модуля на поверхность биологической ткани составляет $20 \times 10 \text{ мм}$. В качестве модели спиральной антенны была выбрана двойная спираль с шириной витков в 1.4 мм и зазором между соседними витками в 1 мм. Ис-

следование антенн проводилось в диапазоне частот 3.2—4.4 ГГц. Анализ результатов расчетов антенн показал, что рассмотренные широкополосные антенны-аппликаторы имеют хорошие электрические характеристики и перспективны для использования в радиотермографии для измерения глубинной радиояркой температуры человеческого организма, в том числе при диагностике функционального состояния головного мозга.

В статье [77] представлена печатная эллиптическая одноплоскостная антенна, которая работает в диапазоне 1,53—3,33 ГГц при размещении напротив фантома молочной железы. Антенна используется как излучающий элемент в круговом массиве вокруг полусферического фантома. Представлены смоделированные и измеренные данные из предложенного массива, которые показывают удовлетворительное согласие и производительность системы. Антенна представляет собой прямоугольную одноплоскостную антенну размером 40 мм × 50 мм и содержит эллиптическую площадку с большой осью 26 мм и малой осью 13 мм. Линия передачи плавно расширяется. Плоскость заземления окружает эллиптический монополь, образуя «окно», предназначенное для расширения рабочей полосы пропускания до более низких частот за счет увеличения пути, пройденного токами земли (поскольку излучаются как элементарные токи, так и токи земли). Подложка имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 10,2$ и тангенс угла потерь $\text{tg}\delta = 0,003$ (материал *Rogers RO3210*), а ее толщина составляет 1,27 мм. Антенная решетка состоит из шести элементов, расположенных перпендикулярно поверхности фантома и параллельно его окружности. Угловое расстояние между соседними элементами составляет 60°. Антенна была разработана с помощью программы численного моделирования. Импеданс порта был принят $Z_{\text{port}} = 50$ Ом. Коэффициент отражения антенны также измерялся при условиях свободного пространства (*FS*) с использованием векторного анализатора цепей (*VNA*), но без использования симметрирующего трансформатора. Результаты моделирования показывают полосу пропускания шириной 1,3 ГГц (1,8—3,1 ГГц) при уровне отражения –10 дБ, и, следовательно, относительной пропускной способности в 53 %. Согласно результатам измерений рабочая полоса пропускания антенны расширяется от 1,50 ГГц до 3,05 ГГц при уровне отражения –6 дБ.

В работах [78, 79] представлено исследование в области радиометрии ближнего поля для измерения внутренней температуры человеческого тела. Разработанный радиометр имеет архитектуру Дикке и работает в полосе частот 1,4 ГГц при сантиметровой глубине проникновения в ткани с минимальными радиочастотными помехами. Показано, что откалиброванный радиометр отслеживает температуру слоя фантомной мышечной ткани под фантомным жиром и слоями кожи с точностью до долей градуса; также по-

казано, что помехи можно уменьшить за счет использования второго зонда и адаптивной обработки [78]. Зонд имеет прямоугольную форму и размеры 4 см × 4 см; для получения более компактного переносного зонда площадь заземляющего слоя может быть уменьшена в 4 раза (2 см × 2 см) при всего лишь небольшом увеличении расчетного уровня радиопомех [78]; печатная антенна, используемая в радиометре, имеет диаметр 1.55 см и подключена к заземляющей пластине. Подложка и согласующий слой выполнены из материала *Rogers 6010* ($\epsilon_r = 10,2$) и имеют толщину 1,27 мм каждый [78, 79].

В рамках разработки нового метода диагностики ПМР [80] было получено устройство для неинвазивного измерения температуры тела, представляющее собой заполненный водой шар, помещаемый внутрь ротовой полости, и радиометр для определения его температуры. Радиометр работает в полосе частот с центром в 3.5 ГГц и измеряет температуру с точностью до 0.03 °C при длительности процедуры измерения 2 секунды. Было протестировано три сценария, включая измерение через водный боллус. Во всех случаях результаты показали хорошее согласие ($R \sim 0.93$) с истинными значениями температуры, полученными с помощью фиброволоконного датчика. Разработанная антенна имеет защиту от электромагнитных помех. Печатная антенна с эллиптической апертурой выполнена на подложке из материала *Rogers RO4350B* толщиной 1.524 мм и запитывается с помощью коаксиального кабеля типа *Radiall R286301072*. Антенна имеет размеры 4 × 4 см с защитным экраном кубической формы глубиной 3.2 см, заполненным воздухом, со стенками, выполненными из меди толщиной 0.7 мм.

В [81] для неинвазивного долговременного мониторинга метаболической активности бурой жировой ткани была разработана печатная логарифмическая спиральная антенна, работающая в диапазоне частот 2.5—3 ГГц. Антенна питается от коаксиального кабеля и экранирована слоем меди. В процессе моделирования были получены оптимальные значения диаметра антенны ($d = 2.5$ см), числа витков ($N = 2$), диэлектрической проницаемости ($\epsilon_r = 12.85$) и толщины подложки ($\delta = 3.18$ мм), а также диэлектрической проницаемости ($\epsilon_r = 30$) и толщины ($\delta = 1$ мм) согласующего слоя. Разработанная антенна позволяет регистрировать изменения температуры менее чем на 0.5 °C для малых объемов (2—6 мл) бурой жировой ткани, находящейся на глубине 4.5—20 мм в надключичной области. Антенна может использоваться и при долговременном мониторинге, что открывает возможности для ее использования при диагностике и лечении ожирения и сахарного диабета.

В работе [82] представлена печатная щелевая антенна для неинвазивного измерения температуры. Антенна выполнена в виде двух перекрещи-

вающихся Н-образных щелей, расположенных под углом 90° , имеет диаметр 2.5 см и с целью лучшего согласования питается через закороченную микрополосковую линию, расположенную под углом в 45° по отношению к каждой из Н-образных щелей. Подобная конфигурация позволяет существенно уменьшить размер антенны для возможности ее свободного ношения при длительном мониторинге. Гибкая подложка толщиной 0.76 мм выполнена из материала *Rogers 3003* ($\epsilon_r = 3$, $\text{tg}\delta = 0.0013$). Разработанная антенна предназначена для выявления подкожных тепловых аномалий, возникающих при сахарном диабете и нарушениях кровотока сонных артерий.

В [83] представлена антенна, способная работать как в режиме излучения (0.9 ГГц), так и в режиме радиометрии (3.7 ГГц). Частота для режима радиометрии выбрана с целью уменьшить влияние радиочастотных помех от большинства бытовых источников; также для уменьшения помех антенна защищена металлическим корпусом. Для питания радиометрическая антенна использует волновод, что позволяет избежать радиочастотного влияния нагревателя. Антенна выполнена на подложке из *Rogers 4003C* ($\epsilon_r = 3.38$, $\text{tg}\delta = 0.0027$) толщиной 1.524 мм и имеет квадратную форму со стороной 52 мм; в качестве согласующего слоя используется широкодоступный промышленный силиконовый каучук (*GE Silicone II*) толщиной 2 мм. Для нагревания используется квадратный контурный щелевой излучатель размерами 42×42 мм и толщиной зазора 2 мм; для радиометрии — круглый щелевой излучатель диаметром 20 мм и толщиной зазора 1.5 мм. В центре антенны также имеется круглое отверстие диаметром 13 мм для уменьшения коэффициента потерь (S_{22}) радиометрического порта.

В работе [84] описывается широкополосная радиометрическая печатная антенна для непрерывного измерения температуры мозга. Предложенная антенна имеет диаметр 20 мм, высоту 4.56 мм, и работает в диапазоне частот 2.7—5.0 ГГц при коэффициенте отражения $S_{11} < 10$ дБ. Антенна имеет квадратное основание 12×12 мм с тремя уровнями неполных гексагональных прорезей и защищена металлическим цилиндром. Подложка выполнена из материала *Rogers RO 3010* ($\epsilon_r = 10.2$, $\text{tg}\delta = 0.0022$). Благодаря своим размерам и хорошему согласованию с тканями головы антенна может применяться в составе многокомпонентных систем для мониторинга температуры головного мозга.

В статье [85] приводится описание имплантируемых *PIFA*-антенн, разработанных для измерения внутричерепного давления на частоте 2.45 ГГц. Размеры антенн (4×5 мм) позволяют их размещать в буровых отверстиях черепа диаметром 12 мм. Антенна напечатана на подложке *FR4* ($\epsilon_r = 4.25$, $\text{tg}\delta = 0.01$) толщиной 0.79 мм. Биосовместимый согласующий слой антенны выполнен из силикона ($\epsilon_r = 3.7$, $\text{tg}\delta = 0.003$) и имеет толщину до 0.5

мм. Антенна помещена в цилиндрический корпус диаметром 10—11 мм, который также содержит источник питания 3 В.

Отдельным классом антенн для МР являются внутриполостные антенны, используемые для выявления тепловых аномалий внутренних органов посредством измерения температуры через биологические полости: трансректальные, служащие для измерения температуры предстательной железы и трансвагинальные для измерения температуры шейки матки. В [46] эти антенны использовались для выявления воспалительных заболеваний органов малого таза. Другие работы по внутриполостной термометрии, в том числе с помощью МР, представлены в [47—56]. Наиболее совершенной является трехканальная антенна для урологии, представленная в [56] для радиотермографа, позволяющего осуществлять трехмерную визуализацию поля температур.

Основанная проблема практического использования МР связана с необходимостью измерять очень слабый шумовой сигнал, поступающий от биологического объекта, на фоне мощных электромагнитных помех, поступающих от компьютеров, систем мобильной связи и т. д. Долгие годы измерение собственного излучения проводилось только в специальных электрогерметичных помещениях. Очевидно, что необходимость экранировки помещения сдерживала развитие метода, т. к. только медицинские центры федерального уровня имели подобные экранированные комнаты. В 2006 г. в [58] была предложена антенна с повышенной помехозащищенностью, которая позволила проводить измерение собственного излучения БО в микроволновом диапазоне без специальной экранировки помещения. Создание этой антенны дало толчок к практическому применению МР в медицинской практике. Антенна построена на базе круглого волновода, заполненного диэлектриком. Система возбуждения представляет собой щелевой излучатель в виде «бабочки», для повышения помехозащищенности антенна снабжена дополнительным экраном.

Размеры экрана выбираются таким образом, чтобы обеспечить минимальный уровень побочного излучения. Кроме высокой помехозащищенности особенностью антенны является наличие воздушного зазора между диэлектриком, контактирующим с телом, и диэлектриком, заполняющим волновод. Это снижает влияние антенны на температуру кожи. Кроме этого диэлектрик, контактирующий с телом, изготовлен из материала с низкой теплоемкостью (ситалл), имеет малую толщину, и оказывает минимальное влияние на температуру кожи. Круглый волновод заполнен диэлектриком с диэлектрической проницаемостью равной 10. Длина волновода составляет 14 мм. Такая значительная длина обеспечивает хорошую фильтрацию всех высших типов волн, возникающих в излучателе и в

электрическое поле антенны близко к волне H_{11} , что обеспечивает высокую глубину измерения. Данная антенна имеет высокий потенциал к использованию в урологии [57].

В [59] была предложена конструкция СВЧ антенны с ИК датчиком, которая одновременно измеряет как температуру внутренних тканей, так и температуру кожи. Антенна построена на базе круглого волновода, заполненного диэлектриком. Возбуждение осуществляется с помощью щелевого излучателя в форме «бабочки».

Для увеличения глубины измерения внутренних температур БО желательно увеличить размеры апертуры антенны, но в некоторых случаях использовать аппликаторы большого диаметра невозможно. Например, в стоматологии для измерения температуры суставов, щитовидной железы, позвоночника, измерения температуры у детей и т. д. Для подобных измерений необходимо использовать миниатюрные антенны. Следует также иметь в виду, что при уменьшении апертуры наряду со снижением глубины измерения, повышается разрешающая способность и уменьшается область усреднения температуры. Это, в конечном счете, должно привести к повышению чувствительности МР при выявлении больших по размеру тепловых аномалий.

Очевидно, что снижение размеров антенны не может быть достигнуто путем повышения диэлектрической проницаемости керамики, заполняющей волновод. В работе [60] представлена конструкция миниатюрной антенны для сантиметрового диапазона длин волн ($\lambda = 7.9$ см), построенная на базе круглого волновода диаметром 8 мм. В этой антенне использован диэлектрик, имеющий диэлектрическую проницаемость, равную 80. Возбуждение волновода осуществляется с помощью щелевого излучателя в форме «бабочки». Эта антенна использовалась в экспериментальной онкологии для измерения температуры внутренних тканей мышей. Другие миниатюрные антенны представлены в [7, 61].

Отдельным направлением, затрагивающим область антенных систем, является применение в конструкциях антенн метаматериалов — искусственно сформированных и особым образом структурированных сред, обладающих электромагнитными свойствами, не достижимыми в природе. По данным работы [86] метаматериалы в технике антенн применяются в основном для изготовления подложек и излучателей в печатных антеннах для достижения широкополосности и уменьшения размеров антенных элементов. Преимуществом антенн на основе метаматериалов являются: существенное уменьшение антенных элементов; компенсация реактивности электрически малых антенн в широкой полосе частот; достижение узкой пространственной направленности элементарных излучателей, погру-

женных в метасферу; уменьшение взаимного влияния между элементами антенных решеток.

В работе [87] приведены результаты исследований по использованию микроволновой радиотермометрии для ранней диагностики легочных осложнений COVID-19 в перекрестном контролируемом исследовании. При этом с помощью одноканального радиотермометра измерялась температура кожи и внутренних тканей в 30 точках тела для обоих легких у больных, у которых повреждение легких были диагностированы как с помощью компьютерной томографии, так и с помощью диагнозов врачей. Исследования показали наличие температурных аномалий в зонах, в которых были диагностированы поражения легочной ткани с помощью компьютерной томографии.

В работе [88] описана конформная антенная система, которая представляет собой совокупность гибких антенн, прилегающих к голове человека и подключенных к миниатюрному радиометрическому приемнику, соединенному с компьютером. Антенная система в виде шлема осуществляет многоканальный прием СВЧ-сигналов в восьми зонах головы человека и передачу этой информации для дальнейшей обработки в миниатюрный радиометрический приемник. 8-канальное исполнение позволяет измерять температуру в различных зонах головного мозга, соответствующих основным функциональным областям, в которых наиболее возможна локализация сосудистой патологии. Состав антенной системы шлема: 8 отдельных антенн, СВЧ-разъемы и кабели, текстильный каркас и металлизированная текстильная «шапочка» для экранировки. С целью оптимизации и повышения технологичности текстильного шлема коммутатор антенн и радиометрический приемник объединены в единый модуль.

Статья [89] посвящена проблеме помехоустойчивости медицинских радиотермографов, в ней рассмотрены возможности повышения помехоустойчивости радиотермографов за счет оптимизации конструкции антенн-аппликаторов. Методами компьютерного моделирования определены электрические параметры оптимальной конструкции целевой печатной антенны-аппликатора типа «бабочка» при использовании имитатора головы человека. Предложена методика оценки уровня помехозащищенности антенны-аппликатора, размещенной на поверхности имитатора БО. Проведенные расчеты подтвердили возможность обеспечения помехозащищенности антенн-аппликаторов за счет размещения поглощающего материала на внешней поверхности экранирующего корпуса антенны. Экспериментально подтверждена возможность проведения функциональных исследований головного мозга человека с помощью медицинских радиотермогра-

фов, оснащенных помехозащищенными антеннами-аппликаторами вне дорогостоящих экранированных помещений.

Таким образом, изучив современное состояние научных исследований данного направления, можно констатировать, что, несмотря на то, что разработкой антенн-аппликаторов для микроволновых радиометрических приборов ранней диагностики онкологических заболеваний занимается широкий круг ученых и специалистов, ряд проблем остается нерешенным, а именно:

- не решена проблема влияния антенн-аппликаторов на температуру расположенных под ними биологических тканей, что требует принятия мер по уменьшению теплопередачи на границе «антенна — биологическая ткань»;

- не решена проблема обеспечения необходимой степени помехозащищенности антенн-аппликаторов для обеспечения проведения радиометрической диагностики вне экранированных помещений;

- не решена проблема создания сверхтонких печатных антенн-аппликаторов на основе современных композиционных материалов, в том числе метаматериалов, обеспечивающих их применение в конформных медицинских антеннах, в том числе в текстильных многоканальных антенных решетках, адаптированных к различным исследуемым органам;

- не решена проблема создания активных антенн-аппликаторов с высокими энергетическими характеристиками, обеспечивающих оптимальное согласование на границе раздела сред «антенна — биологический объект» и реализацию требуемой чувствительности радиометрического диагностического прибора;

- не решена проблема обеспечения функционирования антенных решеток, состоящих из малогабаритных антенн-аппликаторов с высокими энергетическими характеристиками, в нескольких частотных диапазонах для их применения в диагностических радиотермометрических приборах, предназначенных для нахождения 3D распределения и динамики радиояростной температуры в глубине тела человека.

3. Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о необходимости проведения комплекса исследований, направленных на создание нового класса конформных антенн-аппликаторов и антенных решеток на основе новых материалов и технологий. При этом важнейшими задачами дальнейших исследований в данном направлении являются:

— разработка новых типов малогабаритных конформных антенн и антенных решеток на основе современных композиционных материалов, метаматериалов и текстильных материалов;

— разработка тепловых моделей и проведение теплофизического моделирования конформных медицинских антенн с целью уменьшения их влияния на температуру БО;

— разработка новых подходов и технических решений повышения помехозащищенности антенн для возможности использования радиотермографов вне экранированных помещений;

— исследование возможности повышения чувствительности и помехоустойчивости микроволновых радиотермографов за счет применения активных антенн;

— создание антенных решеток, обеспечивающих работу в нескольких частотных диапазонах для их применения в диагностических радиотермометрических приборах с функцией 3D-визуализации распределения и динамики изменения радиояростной температуры в БО.

Результаты этих исследований будут способствовать улучшению характеристик и расширению функциональных возможностей медицинских радиометрических приборов ранней диагностики патологических изменений в организме человека.

Список литературы

1. Седанкин М. К. Антенны-аппликаторы для радиотермометрического исследования тепловых полей внутренних тканей биологического объекта: дисс. ... канд. техн. наук. М. : 2013. 190 с.
2. Jacobsen S., Stauffer P. Multi-frequency radiometric determination of temperature profiles in a lossy homogenous phantom using a dual-mode antenna with integral water bolus // IEEE Trans. Micr. Theory .Tech. 2002. № 50. P. 1737—1746.
3. Klemetsen O., Jacobsen S. Improved radiometric performance attained by an elliptical microwave antenna with suction // IEEE Trans. Bomed. Engineering. 2012. Vol. 59(1). P. 263—271.
4. Bardati F., Iudicello S. Modeling the visibility of breast malignancy by a microwave radiometer // IEEE Trans. Biomed. Engineering. 2008. Vol. 55, no. 1. P. 214—221.
5. Beaucamp-Ricard C. et al. Temperature measurement by microwave radiometry // IEEE Trans. Instrument. Measurement. 2009. Vol. 58, no. 5. P. 1712—1719.
6. Веснин С. Г., Седанкин М. К. Математическое моделирование собственного излучения тканей человека в микроволновом диапазоне // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 9. С. 33—43.
7. Веснин С. Г., Седанкин М. К. Миниатюрные антенны-аппликаторы для микроволновых радиотермометров медицинского назначения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2011. № 10. С. 51—55.
8. Веснин С. Г., Седанкин М. К. Сравнение антенн-аппликаторов медицинского назначения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 10. С. 63—74.

9. Веснин С. Г., Седанкин М. К. Разработка серии антенн-аппликаторов для неинвазивного измерения температуры тканей организма человека при различных патологиях // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Естественные науки. 2012. Спецвыпуск 6. С. 43—61.
10. Hand J. et al. Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modeling // Physics in medicine and biology. 2001. No. 46. P. 1885—1903.
11. Антенны-аппликаторы для медицинских микроволновых радиотермографов / М. К. Седанкин и др. // Медицинская техника. 2018. № 4 (310). С. 13—15.
12. Троицкий В. С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24, № 9. С. 1054—1061.
13. Vesnin S. G., Sedankin M. K., Chupina D. N. Application of modern technologies of mathematical simulation for the development of medical equipment // 11th IEEE Inter. Conference on AICT. Sep. 20—22, 2017. Moscow, Russia. P. 425—429.
14. Barrett A. H., Myers P. C. Subcutaneous temperature : a method of noninvasive sensing // Science. 1975. V. 90. P. 669—671.
15. Barrett A. H., Myers Ph. C., Sadovsky N. L. Microwave thermography in the detection of breast cancer // AJR. 1980. No. 134. P. 365—368.
16. Myers P. C., Sadovsky N. L., Barrett A. H. Microwave thermography : principles, methods and clinical applications // Journal of Microwave Power. 1979. Vol. 14, no. 2. P. 105—113.
17. Cheever E. A., Foster K. R. Microwave radiometry in living tissue : what does it measure? // IEEE Trans. Biomed. Engineering. 1992. Vol. 39. P. 563—568.
18. ►Carr K. Patent (USA) 5779635. Microwave detection apparatus for locating cancerous tumors particularly breast tumors. 14 July 1998.
►Веснин С. Г. Пат. № 2407429 (РФ). Антенна-аппликатор и устройство для определения температурных изменений внутренних тканей биологического объекта и способы определения температурных изменений и выявления риска рака. Опубл. в Б. И., 2008. № 36.
19. Lee J. W. et al. Experimental investigation of the mammary gland tumour phantom for multifrequency microwave radio-thermometers // Medical and Biological Engineering and Computing. 2004. Vol. 42, no. 5. P. 581—590.
20. Tofghi M. Characterization of biomedical antennas for microwave heating, radiometry, and implant communication applications // 12th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICONP). Clearwater Beach, 2011. P. 1—6.
21. Кубланов В. С. и др. Пат. № 2049424 (РФ). Устройство для приема собственного радиотеплового излучения тела человека. Опубл. в Б. И., 1995. № 34.
22. Klemetsen Ø., Jacobsen S. Improved radiometric performance attained by an elliptical microwave antenna with suction // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2012. Vol. 59(1). P. 263—271.
23. Iudicello S. Microwave radiometry for breast cancer detection : PhD thesis. Università degli studi tor vergata Roma, dipartimento di informatica, sistemi e produzione geoinformation research doctorate. Rome. 2009. 111 p.
24. Bardati F. et al. Improved antennas for microwave radiometry. URL: <http://www.ursi.org> (20.01.2020).
25. Bardati F. et al. A three-band antenna for microwave radiometry of breast. URL: <http://www.ursi.org> (20.01.2020).
26. Oikonomou I., Karanasiou S., Uzunoglu N. K. Phased-array near field radiometry for brain intracranial applications // Progress in Electromagnetics Research. 2010. Vol. 109. P. 345—360.
27. Asimakis N. P., Karanasiou I. S., Uzunoglu N. K. Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications: a study using the conformal I-notch microstrip patch antenna // Progress in Electromagnetics Research. 2011. Vol. 117. P. 83—101.

28. Asimakis N. P., Karanasiou I. S., Uzunoglu N. K. Conformal L-notch patch antennas for human brain monitoring using the SAM head model // *Electromagnetics in Advanced Applications*, Torino, 2009. P. 214—217.
29. Asimakis N. P., Karanasiou I. S., Uzunoglu N. K. Multiband conformal patch antennas for diagnosis in human brain using near field radiometry // *6th European Symposium on Biomedical Engineering*, 2008. P. 1—4.
30. Oikonomou I., Karanasiou S., Uzunoglu N. K. Potential brain imaging using near field radiometry // *Journal of Instrumentation*. 2009. Vol. 4, no. 05. P. P05017—P05017.
31. Jacobsen S. Microwave radiometry as a non-invasive temperature monitoring modality during superficial hyperthermia. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/17007/InTech-Non_invasive_temperature_monitoring_during_microwave_heating_applying_a_miniaturized_radiometer.pdf (02.02.2013).
32. Jacobsen S., Stauffer P. R., Rolfsnes H. O. Characteristics of microstrip muscle-loaded single-arm Archimedean spiral antenna as investigated by FDTD numerical computations // *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*. 2005. Vol. 52, no. 2. P. 321—330.
33. Jacobsen S., Murberg A., Stauffer P. Characterization of a transeiving antenna concept for microwave heating and thermometry of superficial tumors // *Progress in Electromagnetics Research*. 1998. Vol. 18. P. 105—125.
34. Jacobsen S., Stauffer P. Can we settle with single-band radiometric temperature monitoring during hyperthermia treatment of chestwall recurrence of breast cancer using a dual-mode transeivingapplicator? // *Phys. Med. Biol.* 2007. No. 52. P. 911—928.
35. Sunal A. et al. Design of spiral antennas for radiometric detection of tumors at microwave frequencies // *Bioengineering Conference. Proceedings of the IEEE 32nd Annual Northeast*. Easton (Pennsylvania), 2006. P. 99—100.
36. Stauffer P. R. et al. Stable microwave radiometry system for long term monitoring of deep tissue temperature // *Energy based Treatment of Tissue and Assessment VII. – International Society for Optics and Photonics*. 2013. Vol. 8584. P. 85840R.
37. Modeling the detectability of vesicoureteral reflux using microwave radiometry / K. Arunachalam et al. // *Phys. Med. Biol.* 2010. Vol. 55(18). P. 5417—5435.
38. Microwave radiometry for non-invasive detection of vesicoureteral reflux (VUR) following bladder warming / P. Stauffer et al. // *Proc SPIE*. 2011. Vol. 7901. P. 79010V.
39. Non-Invasive Measurement of Brain Temperature with Microwave Radiometry : Demonstration in a Head Phantom and Clinical Case / P. R. Stauffer et al. // *The Neuroradiology Journal*. 2014. Vol. 27, no. 1. P. 3—12.
40. Miniature sensor for measurement and control of temperatures by microwave radiometry in medical applications / C. Vanoverschelde et al. // *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*. Phoenix (Arizona), 2001. Vol. 1. P. 155—158.
41. Contact-less sensors for temperature measurement by microwave radiometry in medical or industrial applications / L. Dubois et al. // *Proceedings of ISAP*. Niigata (Japan), 2007. P. 1262—1265.
42. Temperature measurement by microwave radiometry / C. Beaucamp-Ricard et al. // *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. 2009. Vol. 58, no. 5. P. 1712—1719.
43. Temperature measurement by microwave radiometry / P.-Y. Cresson et. al. // *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Victoria (Vancouver Island, Canada). 2008. P. 1344—1349.
44. Tofighi M. R. Dual-mode planar applicator for simultaneous microwave heating and radiometric sensing // *Electronics letters*. 2012. Vol. 48, no 20. P. 1252—1253.
45. Цомаева Е. А. Клиническое значение радиотермометрии в диагностике и дифференциальной диагностике заболеваний органов малого таза : автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2012. 27 с.

46. Rodrigues J., Caldeira J., Vaidya B. A novel intra-body sensor for vaginal temperature monitoring // *Sensors*. 2009. Vol. 9, no. 4. P. 2797—2808.
47. Intra-body temperature monitoring using a biofeedback solution / J. M. L. P. Caldeira et al. // 2010 Second International Conference on eHealth, Telemedicine, and Social Medicine. IEEE, 2010. P. 119—124.
48. A new wireless biosensor for intra-vaginal temperature monitoring / J. M. L. P. Caldeira et al. // *Sensors*. 2010. Vol. 10, no. 11. P. 10314—10327.
49. Pereira O. R. E., Caldeira J. M. L. P., Rodrigues J. J. P. C. A Symbian-based mobile solution for intra-body temperature monitoring // The 12th IEEE International Conference on e-Health Networking, Applications and Services. IEEE, 2010. P. 316—321.
50. Рахлин В. Л., Алова С. Е. Радиотермометрия в диагностике патологии молочных желез, гениталий, предстательной железы и позвоночника. Горький : НИРФИ, 1988. 46 с.
51. Хашукоева А. З., Цомаева Е. А., Водяник Н. Д. Применение трансабдоминальной и вагинальной радиотермометрии в комплексной диагностике воспалительных заболеваний придатков матки // *Лечение и профилактика*. 2012. № 1. С. 26—30.
52. Седанкин М. К., Мартыанова М. В. Внутриполостные антенны для диагностики заболеваний организма человека с помощью радиотермометрии // В сб. : Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике. Москва, 2019. С. 442—445.
53. Microwave Radiometry of the Pelvic Organs / Sedankin M. K. et al. // *Biomedical Engineering*. 2019. Vol. 53, no. 4. P. 288—292.
54. Математическое моделирование радиотеплового излучения органов малого таза / М. К. Седанкин и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 10. С. 148—151.
55. Седанкин М. К., Новов А. А., Абидулин Э. Р. Трехканальная микроволновая антенна для урологии // В сб. : Международная научно-техническая конференция «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» (МНТК ФТИ-2017). Под ред. М. Ф. Булатова. 2017. С. 289—291.
56. Modelling of Thermal Radiation by Kidney in Microwave Range / Sedankin M. K. et al. // *Biomedical Engineering*. 2019, Vol. 53(1), P. 60—65.
57. ►Antenna Applicators for Medical Microwave Radiometers / A. G. Gudkov et al. // *Biomedical Engineering*. 2018. Vol. 52, no. 4. P. 235—238.
►Печатная антенна со встроенным инфракрасным датчиком температуры для медицинского многоканального микроволнового радиотермографа / С. Г. Веснин и др. // *Медицинская техника*. 2020. № 4. С. 4—7.
58. A Printed Antenna with an Infrared Temperature Sensor for a Medical Multichannel Microwave Radiometer / S. G. Vesnin et al. // *Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 54, no. 4. P. 235—239.
59. Веснин С. Г., Зиновьев С. В. Метод микроволновой динамической топографии первичного очага злокачественных новообразований // *Сибирский онкологический журнал*. 2009. Прил. № 2. С. 80.
60. System of rational parameters of antennas for designing a multi-channel multi-frequency medical radiometer / M. K. Sedankin et al. // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). IEEE, 2020. P. 154—159.
61. Use of Multichannel Microwave Radiometry for Functional Diagnostics of the Brain / A. G. Gudkov et al. // *Biomedical Engineering*. 2019. Vol. 53, iss. 2. P. 108—111.
62. ►Тархов Н. С., Трохина И. В. Антенны-аппликаторы для радиотермометрии // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2012. № 11. С. 30—40.

- Microwave Radiometry in the Diagnosis of Various Urological Diseases / A. D. Kaprin et al. // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53, iss. 2. P. 87—91.
63. Аппликаторные СВЧ антенны для функциональных биомедицинских и физических исследований / В. А. Елкин и др. В сб. : Матер. межд. конф. «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ». Саратов, 20—24 марта 2001 г. С. 55—57.
 64. Семерник И. В., Демьяненко А. В., Невструев Я. В. Разработка широкополосного СВЧ-аппликатора для устройства диагностики бронхолегочных заболеваний // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). 2018. С. 1487—1493.
 65. Седельников Ю. Е., Никишина Д. В., Халикова К. Н. Пат. №2562025 (РФ). Антенна-аппликатор для неинвазивного измерения температуры внутренних тканей биологического объекта. Оpubл. в Б. И., 2015. № 14.
 66. Патент (РФ) №2737017 С1. Антенна-аппликатор для радиотермометрии повышенного разрешения / О. А. Морозов и др. Оpubл. 24.11.2020, Бюл. № 33.
 67. Анализ свойств вибраторной антенны-аппликатора в задаче радиометрии головного мозга / И. А. Банников и др. // 2-я Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Екатеринбург, 2016. С. 172—179.
 68. Шабашов Е. П., Шабунин С. Н., Мрдакович Б. Моделирование и анализ свойств спиральной антенны для исследования излучения головного мозга в микроволновом диапазоне // Ural Radio Engineering Journal. 2020. Т. 4. №. 1. С. 84—99.
 69. Седельников Ю. Е., Кубланов В. С., Потапова О. В. Сфокусированные антенны-аппликаторы в задачах диагностической радиотермометрии // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/4/text.pdf>.
 70. New approach for design and verification of a wideband Archimedean spiral antenna for radiometric measurement in biomedical applications / H. Abufanas et al. In. : 2015 German Microwave Conference. IEEE, 2015. P. 127—130.
 71. Detection of vesicoureteral reflux using microwave radiometry – system characterization with tissue phantoms / K. Arunachalam et al. // IEEE Transactions on biomedical engineering. 2011. Vol. 58, no. 6. P. 1629—1636.
 72. Vesicoureteral reflux in children: a phantom study of microwave heating and radiometric thermometry of pediatric bladder / Y. Birkelund et al. // IEEE transactions on biomedical engineering. 2011. Vol. 58, no. 11. P. 3269—3278.
 73. Design and interdisciplinary simulations of a hand-held device for internal-body temperature sensing using microwave radiometry / N. A. Livanos et al. // IEEE Sensors Journal. 2018. Vol. 18, no. 6. P. 2421—2433.
 74. Flexible antenna array for early breast cancer detection using radiometric technique / A. Afyf et al. // Int. J. Biol. Biomed. Eng. 2016. Vol. 10. P. 10—17.
 75. Sensing local temperature and conductivity changes in a brain phantom using near-field microwave radiometry / E. Groumpas et al. // 2017 International Workshop on Antenna Technology : Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT). IEEE, 2017. P. 293—295.
 76. Numerical simulation of miniature antennas applicators of microwave radiometry for diagnostics of the functional state of the brain / V. Leushin et al. // ITM Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. V. 30. P. 13005.
 77. A microwave breast imaging system using elliptical uniplanar antennas in a circular-array setup / M. Koutsoupidou et al. // 2015 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). IEEE, 2015. P. 1—4.

78. Noninvasive internal body temperature tracking with near-field microwave radiometry / P. Momenroodaki et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2017. Vol. 66, no. 5. P. 2535—2545.
79. Momenroodaki P., Haines W., Popović Z. Non-invasive microwave thermometry of multilayer human tissues // 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). IEEE, 2017. P. 1387—1390.
80. Klemetsen Ø., Jacobsen S., Birkelund Y. Radiometric temperature reading of a hot ellipsoidal object inside the oral cavity by a shielded microwave antenna put flush to the cheek // Physics in Medicine & Biology. 2012. Vol. 57, no. 9. P. 2633—2652.
81. Rodrigues D. B., Stauffer P. R., Maccarini P. F. Monitoring brown fat metabolic activity using microwave radiometry : antenna design and frequency selection // 2014 IEEE Benjamin Franklin Symposium on Microwave and Antenna Sub-systems for Radar, Telecommunications, and Biomedical Applications (BenMAS). IEEE, 2014. P. 1—3.
82. Wideband epidermal antenna for medical radiometry / G. León et al. // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 7. P. 1987.
83. Tofighi M. R., Pardeshi J. R. Interference enhanced biomedical antenna for combined heating and radiometry application // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2017. Vol. 16. P. 1895—1898.
84. A Wearable Radiometric Antenna for Non-Invasive Brain Temperature Monitoring / H. Ullah et al. In : 2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM). IEEE, 2018. P. 1—2.
85. Characterization of implantable antennas for intracranial pressure monitoring : Reflection by and transmission through a scalp phantom / R. Warty et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2008. Vol. 56, no. 10. P. 2366—2376.
86. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. 2010. № 3-4. С. 44—60.
87. Passive Microwave Radiometry for the Diagnosis of Coronavirus Disease 2019 Lung Complications in Kyrgyzstan / B. Osmonov et al. // Diagnostics. 2021. Vol. 11. P. 259.
88. Диагностическая конформная система для нейровизуализации головного мозга с использованием многоканального радиотермометра на основе монолитных интегральных схем / С. Г. Веснин и др. // Нанотехнологии : разработка, применение. 2020. Т. 12. № 1. С. 5—12.
89. Possibilities of increasing the noise immunity of radiothermograph antenna applicators for brain diagnostics / V. Yu. Leushin et al. // Sensors and actuators a: physical. 2022. Vol. 337. P. 113439.

Информация об авторах

Леушин В. Ю., к. т. н., технический директор ООО НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН», старший научный сотрудник ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов». ORCID 0000-0001-7092-360X.

Агасиева С. В., к. т. н., доцент ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов». ORCID 0000-0002-9089-1411.

Веснин С. Г., к. т. н., генеральный директор ООО «РТМ Диагностика», старший научный сотрудник ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов». ORCID 0000-0003-4353-8962.

Седанкин М. К., к. т. н., старший научный сотрудник ФГБУ ГНЦ РФ ФМБЦ А. И. Бурназяна ФМБА России, доцент РТУ-МИРЭА, старший научный сотрудник ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов». ORCID 0000-0001-9875-6313.

Порохов И. О., к. т. н., инженер 1-й категории, АО «ЦНИРТИ им. академика А. И. Берга», старший научный сотрудник ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов».

Ветрова Н. А., к. т. н., доцент ФГБОУ ВО МГТУ им. Н. Э. Баумана, доцент ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов». ORCID 0000-0002-6218-4111.

Горлачева Е. Н., д. э. н., доцент ФГБОУ ВО МГТУ им. Н. Э. Баумана. ORCID 0000-0001-6290-8557.

Сидорова М. И., лаборант-исследователь ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», студент МФТИ.

Tasks of Improving Medical Antennas for Microwave Radiothermometry of Biological Objects (review)²

V. Yu. Leushin¹, S. V. Agasieva¹, S. G. Vesnin^{1,2}, M. K. Sedankin^{1,3,4},
I. O. Porokhov^{1,5}, N. A. Vetrova^{1,6}, E. N. Gorlacheva⁶, and M. I. Sidorova¹

¹ RUDN University

6, Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation

Ra3bu@yandex.ru

² RTM Diagnostic, LLC

55/59 b.1, B. Pochtovaya st., Moscow, 105082, Russian Federation

³ SRC-FMBC

23, Marshala Novikova st., Moscow, 123098, Russian Federation

⁴ RTU MIREA

78, Vernadsky Avenue, Moscow 119571, Russian Federation

⁵ CNIRTI

20/9, Novaya Basmannaya str., Moscow, 107078, Russian Federation

⁶ Bauman Moscow State Technical University

5, 2nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation

Abstract: An overview of the state of antennas development of various types used in medical microwave radiothermographs is given. The problems of modern microwave radiothermometry associated with the development of new antennas are formulated. The tasks of further research aimed at creating new designs of conformal antennas and antenna arrays aimed at improving the characteristics and expanding the functionality of medical radiothermographs are formulated.

Keywords: microwave radiometry, radiobrightness temperature, applicator antenna.

For citation (IEEE): V. Yu. Leushin et al., “Tasks of Improving Medical Antennas for Microwave Radiothermometry of Biological Objects (review),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 484–514, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.36. (In Russ.).

References

- [1] M. K. Sedankin, *Antenna-applicators for radiothermometric study of thermal fields of internal tissues of a biological object*: diss. ... cand. tech. sci. Moscow: 2013. (In Russ.).
- [2] S. Jacobsen and P. R. Stauffer, “Multifrequency radiometric determination of temperature profiles in a lossy homogeneous phantom using a dual-mode antenna with integral water

² The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-19-00113, <https://rscf.ru/project/22-19-00113/>

- bolus,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 7, pp. 1737–1746, Jul. 2002, doi: 10.1109/tmtt.2002.800424.
- [3] O. Klemetsen and S. Jacobsen, “Improved Radiometric Performance Attained by an Elliptical Microwave Antenna With Suction,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 263–271, Jan. 2012, doi: 10.1109/tbme.2011.2172441.
 - [4] F. Bardati and S. Iudicello, “Modeling the Visibility of Breast Malignancy by a Microwave Radiometer,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 55, no. 1, pp. 214–221, Jan. 2008, doi: 10.1109/tbme.2007.899354.
 - [5] C. Beaucamp-Ricard, L. Dubois, S. Vaucher, P.-Y. Cresson, T. Lasri, and J. Pribetich, “Temperature Measurement by Microwave Radiometry: Application to Microwave Sintering,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 5, pp. 1712–1719, May 2009, doi: 10.1109/tim.2008.2009189.
 - [6] S. G. Vesnin and M. K. Sedankin, “Mathematical modeling of self-radiation of human tissues in the microwave range,” *Biomeditsinskaya radioelektronika*, no. 9, pp. 33–43, 2010. (In Russ.).
 - [7] S. G. Vesnin and M. K. Sedankin, “Miniature applicator antennas for medical microwave radiothermometers,” *Biomeditsinskaya radioelektronika*, no. 10, pp. 51–55, 2011. (In Russ.).
 - [8] S. G. Vesnin and M. K. Sedankin, “Comparison of antenna-applicators for medical purposes,” *Biomeditsinskaya radioelektronika*, no. 10, pp. 63–74, 2012. (In Russ.).
 - [9] S. G. Vesnin and M. K. Sedankin, “Development of a series of antenna-applicators for non-invasive measurement of the temperature of human tissues in various pathologies,” *Vestnik MGU n. a. N. E. Bauman. Yestestvennyye nauki*, special iss. 6, pp. 43–61, 2012. (In Russ.).
 - [10] J. W. Hand et al., “Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 46, no. 7, pp. 1885–1903, Jun. 2001, doi: 10.1088/0031-9155/46/7/311.
 - [11] M. K. Sedankin et al., “Antennas-applicators for medical microwave radiothermographs,” *Meditsinskaya tekhnika*, no. 4 (310), pp. 13–15, 2018. (In Russ.).
 - [12] V. S. Troitskii, “Theory of contact radiometric measurement of internal temperatures of bodies,” *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 24, no. 9, pp. 717–722, Sep. 1981, doi: 10.1007/bf01035924.
 - [13] S. G. Vesnin, M. K. Sedankin, and D. N. Chupina, “Application of modern technologies of mathematical simulation for the development of medical equipment,” *11th IEEE Inter. Conference on AICT*, Sept. 20–22, Moscow, Russia, pp. 425–429, 2017.
 - [14] A. H. Barrett and P. C. Myers, “Subcutaneous Temperatures: A Method of Noninvasive Sensing,” *Science*, vol. 190, no. 4215, pp. 669–671, Nov. 1975, doi: 10.1126/science.1188361.
 - [15] A. Barrett, P. Myers, and N. Sadowsky, “Microwave thermography in the detection of breast cancer,” *American Journal of Roentgenology*, vol. 134, no. 2, pp. 365–368, Feb. 1980, doi: 10.2214/ajr.134.2.365.
 - [16] P. C. Myers, N. L. Sadowsky, and A. H. Barrett, “Microwave Thermography: Principles, Methods and Clinical Applications*,” *Journal of Microwave Power*, vol. 14, no. 2, pp. 105–115, Jan. 1979, doi: 10.1080/16070658.1979.11689136.
 - [17] E. A. Cheever and K. R. Foster, “Microwave radiometry in living tissue: what does it measure?,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 39, no. 6, pp. 563–568, Jun. 1992, doi: 10.1109/10.141194.
 - [18] ►K. Carr, Patent (USA) 5779635. Microwave detection apparatus for locating cancerous tumors particularly breast tumors. 14 July 1998.

- S. G. Vesnin, Pat. No. 2407429 (RF). Antenna-applicator and a device for determining temperature changes in the internal tissues of a biological object and methods for determining temperature changes and identifying the risk of cancer. Published in Bulletin of Inventions, no. 36, 2008. (In Russ.).
- [19] J. W. Lee et al., "Experimental investigation of the mammary gland tumour phantom for multifrequency microwave radio-thermometers," *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 42, no. 5, pp. 581–590, Sep. 2004, doi: 10.1007/bf02347538.
- [20] M. Tofighi, "Characterization of biomedical antennas for microwave heating, radiometry, and implant communication applications," *12th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICONP)*, Clearwater Beach, pp. 1–6, 2011.
- [21] V. S. Kublanov et al. Pat. no. 2049424 (RF). Device for receiving own radio-thermal radiation of the human body. Published in Bulletin of Inventions, no. 34, 1995. (In Russ.).
- [22] O. Klemetsen and S. Jacobsen, "Improved Radiometric Performance Attained by an Elliptical Microwave Antenna With Suction," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 263–271, Jan. 2012, doi: 10.1109/tbme.2011.2172441.
- [23] S. Iudicello, *Microwave radiometry for breast cancer detection: PhD thesis*, Università degli studi tor vergata Roma, dipartimento di informatica, sistemi e produzione geoinformazione research doctorate, Rome. 2009.
- [24] F. Bardati et al., *Improved antennas for microwave radiometry*, URL: <http://www.ursi.org> (20.01.2020).
- [25] F. Bardati et al., *A three-band antenna for microwave radiometry of breast*, URL: <http://www.ursi.org> (20.01.2020).
- [26] A. Oikonomou, I. S. Karanasiou, and N. K. Uzunoglu, "Phased-Array Near Field Radiometry for brain intracranial applications," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 109, pp. 345–360, 2010, doi: 10.2528/pier10073004.
- [27] N. P. Asimakis, I. S. Karanasiou, and N. K. Uzunoglu, "Non-Invasive Microwave Radiometric System for Intracranial Applications: a Study Using the Conformal L-Notch Microstrip Patch Antenna," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 117, pp. 83–101, 2011, doi: 10.2528/pier10122208.
- [28] N. P. Asimakis, I. S. Karanasiou, and N. K. Uzunoglu, "Conformal L-notch patch antennas for human brain monitoring using the SAM head model," *Electromagnetics in Advanced Applications*, Torino, pp. 214–217, 2009.
- [29] N. P. Asimakis, I. S. Karanasiou, and N. K. Uzunoglu, "Multiband conformal patch antennas for diagnosis in human brain using near field radiometry," *6th European Symposium on Biomedical Engineering*, pp. 1–4, 2008.
- [30] A. Oikonomou, I. S. Karanasiou, and N. K. Uzunoglu, "Potential brain imaging using near field radiometry," *Journal of Instrumentation*, vol. 4, no. 05, pp. P05017–P05017, May 2009, doi: 10.1088/1748-0221/4/05/p05017.
- [31] S. Jacobsen, "Microwave radiometry as a non-invasive temperature monitoring modality during superficial hyperthermia," URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/17007/InTech-Non_invasive_temperature_monitoring_during_microwave_heating_applying_a_miniaturized_radiometer.pdf (02.02.2013).
- [32] S. Jacobsen, H. O. Rølfesnes, and P. R. Stauffer, "Characteristics of Microstrip Muscle-Loaded Single-Arm Archimedean Spiral Antennas as Investigated by FDTD Numerical Computations," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, no. 2, pp. 321–330, Feb. 2005, doi: 10.1109/tbme.2004.840502.
- [33] S. Jacobsen and A. M. P. R. Stauffer, "Characterization of a Tranceiving Antenna Concept for Microwave Heating and Thermometry of Superficial Tumors," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 18, pp. 105–125, 1998, doi: 10.2528/pier97050600.

- [34] S. Jacobsen and P. R. Stauffer, "Can we settle with single-band radiometric temperature monitoring during hyperthermia treatment of chestwall recurrence of breast cancer using a dual-mode transeiving applicator?," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 52, no. 4, pp. 911–928, Jan. 2007, doi: 10.1088/0031-9155/52/4/004.
- [35] A. Sunal et al., "Design of spiral antennas for radiometric detection of tumors at microwave frequencies," *Bioengineering Conference. Proceedings of the IEEE 32nd Annual Northeast. Easton (Pennsylvania)*, pp. 99–100, 2006.
- [36] P. R. Stauffer et al., "Stable microwave radiometry system for long term monitoring of deep tissue temperature," *Energy based Treatment of Tissue and Assessment VII. – International Society for Optics and Photonics*, vol. 8584, p. 85840R, 2013.
- [37] K. Arunachalam, P. F. Maccarini, V. De Luca, F. Bardati, B. W. Snow, and P. R. Stauffer, "Modeling the detectability of vesicoureteral reflux using microwave radiometry," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 55, no. 18, pp. 5417–5435, Aug. 2010, doi: 10.1088/0031-9155/55/18/010.
- [38] P. Stauffer et al., "Microwave radiometry for non-invasive detection of vesicoureteral reflux (VUR) following bladder warming," *Proc. SPIE*, vol. 7901, p. 79010V, 2011.
- [39] P. R. Stauffer et al., "Non-Invasive Measurement of Brain Temperature with Microwave Radiometry: Demonstration in a Head Phantom and Clinical Case," *The Neuroradiology Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 3–12, Feb. 2014, doi: 10.15274/nrj-2014-10001.
- [40] C. Vanoverschelde et al., "Miniature sensor for measurement and control of temperatures by microwave radiometry in medical applications," *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*. Phoenix (Arizona), vol. 1, pp. 155–158, 2001.
- [41] L. Dubois et al., "Contact-less sensors for temperature measurement by microwave radiometry in medical or industrial applications," *Proceedings of ISAP. Niigata (Japan)*, pp. 1262–1265, 2007.
- [42] C. Beaucamp-Ricard, L. Dubois, S. Vaucher, P.-Y. Cresson, T. Lasri, and J. Pribetich, "Temperature Measurement by Microwave Radiometry: Application to Microwave Sintering," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 5, pp. 1712–1719, May 2009, doi: 10.1109/tim.2008.2009189.
- [43] P.-Y. Cresson et al., "Temperature measurement by microwave radiometry," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Victoria (Vancouver Island, Canada)*, pp. 1344–1349, 2008.
- [44] M. R. Tofighi, "Dual-mode planar applicator for simultaneous microwave heating and radiometric sensing," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 20, p. 1252, 2012, doi: 10.1049/el.2012.2711.
- [45] E. A. Tsomaeva, *Clinical significance of radiothermometry in the diagnosis and differential diagnosis of diseases of the pelvic organs*: authoref. diss. ... cand. med. nauk. Moscow, 2012. (In Russ.).
- [46] J. Rodrigues, J. Caldeira, and B. Vaidya, "A Novel Intra-body Sensor for Vaginal Temperature Monitoring," *Sensors*, vol. 9, no. 4, pp. 2797–2808, Apr. 2009, doi: 10.3390/s90402797.
- [47] J. M. L. P. Caldeira et al., "Intra-body temperature monitoring using a biofeedback solution," *2010 Second International Conference on eHealth, Telemedicine, and Social Medicine*, IEEE, pp. 119–124, 2010.
- [48] J. M. L. P. Caldeira, J. J. P. C. Rodrigues, J. F. R. Garcia, and I. de la Torre, "A New Wireless Biosensor for Intra-Vaginal Temperature Monitoring," *Sensors*, vol. 10, no. 11, pp. 10314–10327, Nov. 2010, doi: 10.3390/s101110314.

- [49] O. R. E. Pereira, J. M. L. P. Caldeira, and J. J. P. C. Rodrigues, "A Symbian-based mobile solution for intra-body temperature monitoring," *The 12th IEEE International Conference on e-Health Networking, Applications and Services*, IEEE, pp. 316–321, 2010.
- [50] V. L. Rakhlin and S. E. Alova, *Radiothermometry in the diagnosis of pathology of the mammary glands, genitals, prostate and spine*. Gorky: NIRFI, 1988. (In Russ.).
- [51] A. Z. Khashukoeva, E. A. Tsomaeva, and N. D. Vodyanik, "The use of transabdominal and vaginal radiothermometry in the complex diagnosis of inflammatory diseases of the uterine appendages," *Lecheniye i profilaktika*, no. 1, pp. 26–30, 2012. (In Russ.).
- [52] M. K. Sedankin and M. V. Martyanova, "Intracavitary antennas for diagnosing diseases of the human body using radiothermometry," *Russian Scientific and Technical Conference with International Participation. Informatics and technology. Innovative technologies in industry and informatics*. Moscow, pp. 442–445, 2019. (In Russ.).
- [53] M. K. Sedankin et al., "Microwave Radiometry of the Pelvic Organs," *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 288–292, Nov. 2019, doi: 10.1007/s10527-019-09928-7.
- [54] M. K. Sedankin et al., "Mathematical modeling of radiothermal radiation of the pelvic organs," *Scientific and technical bulletin of the Volga region*, no. 10, pp. 148–151, 2018. (In Russ.).
- [55] M. K. Sedankin, A. A. Novov, and E. R. Abidulin, "Three-channel microwave antenna for urology," *International Scientific and Technical Conference "Information and Technology. Innovative technologies in industry and informatics" (MNTK FTI-2017)*, ed. M. F. Bulatova, pp. 289–291, 2017. (In Russ.).
- [56] M. K. Sedankin et al., "Modeling of Thermal Radiation by the Kidney in the Microwave Range," *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 1, pp. 60–65, May 2019, doi: 10.1007/s10527-019-09878-0.
- [57] ► M. K. Sedankin et al., "Antenna Applicators for Medical Microwave Radiometers," *Biomedical Engineering*, vol. 52, no. 4, pp. 235–238, Nov. 2018, doi: 10.1007/s10527-018-9820-1.
► S. G. Vesnin et al., "Printed antenna with a built-in infrared temperature sensor for a medical multichannel microwave radiothermograph," *Meditinskaya tekhnika*, no. 4, pp. 4–7, 2020. (In Russ.).
- [58] S. G. Vesnin et al., "A Printed Antenna with an Infrared Temperature Sensor for a Medical Multichannel Microwave Radiometer," *Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 4, pp. 235–239, Nov. 2020, doi: 10.1007/s10527-020-10011-9.
- [59] S. G. Vesnin and S. V. Zinoviev, "Method of microwave dynamic topometry of the primary focus of malignant neoplasms," *Sibirskiy onkologicheskii zhurnal*, app. no. 2, pp. 80, 2009. (In Russ.).
- [60] M. K. Sedankin et al., "System of rational parameters of antennas for designing a multi-channel multi-frequency medical radiometer," *2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. IEEE, pp. 154–159, 2020.
- [61] A. G. Gudkov et al., "Use of Multichannel Microwave Radiometry for Functional Diagnostics of the Brain," *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 108–111, Jul. 2019, doi: 10.1007/s10527-019-09887-z.
- [62] ► N. S. Tarkhov and I. V. Trokhina, "Antenna-applicators for radiothermometry," *Bulletin of the Tula State University. Technical science*, no. 11, pp. 30–40, 2012. (In Russ.).
► A. D. Kaprin et al., "Microwave Radiometry in the Diagnosis of Various Urological Diseases," *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 87–91, Jul. 2019, doi: 10.1007/s10527-019-09883-3.
- [63] V. A. Elkin et al., "Applicator microwave antennas for functional biomedical and physical research," *Int. conf. "Modern problems of electronics and microwave radiophysics"*, Saratov, pp. 55–57, March 20–24, 2001. (In Russ.).

- [64] I. V. Semernik, A. V. Demyanenko, and Y. V. Nevstruev, "Development of a broadband microwave applicator for a device for diagnosing bronchopulmonary diseases," 28th *International Crimean Conference "Microwave and Telecommunication Technology" (CriMiCo'2018)*, pp. 1487–1493, 2018. (In Russ.).
- [65] Yu. E. Sedelnikov, D. V. Nikishina, and K. N. Khalikova, Pat. No. 2562025 (RF). Antenna-applicator for non-invasive temperature measurement of the internal tissues of a biological object. Published in Bulletin of Inventions, no. 14, 2015. (In Russ.).
- [66] O. A. Morozov et al. Patent (RF) No. 2737017 C1. Antenna-applicator for high-resolution radiothermometry. Published in Bulletin of Inventions, no. 33, 2020. (In Russ.).
- [67] I. A. Bannikov et al., "Analysis of the properties of a vibrator antenna-applicator in the problem of brain radiometry," 2nd *International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Information Technologies, Telecommunications and Control Systems,"* Ekaterinburg, pp. 172–179, 2016. (In Russ.).
- [68] E. P. Shabashov, S. N. Shabunin, and B. Mrdakovich, "Modeling and analysis of the properties of a helical antenna for studying brain radiation in the microwave range," *Ural Radio Engineering Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 84–99, 2020. (In Russ.).
- [69] Yu. E. Sedelnikov, V. S. Kublanov, and O. V. Potapova, "Focused applicator antennas in problems of diagnostic radiothermometry," *Zhurnal radioelektroniki*, no. 7, 2018. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/4/text.pdf>. (In Russ.).
- [70] H. Abufanas et al., "New approach for design and verification of a wideband Archimedean spiral antenna for radiometric measurement in biomedical applications," 2015 *German Microwave Conference*. IEEE, pp. 127–130, 2015.
- [71] K. Arunachalam et al., "Detection of Vesicoureteral Reflux Using Microwave Radiometry—System Characterization With Tissue Phantoms," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 58, no. 6, pp. 1629–1636, Jun. 2011, doi: 10.1109/tbme.2011.2107515.
- [72] Y. Birkelund, O. Klemetsen, S. K. Jacobsen, K. Arunachalam, P. Maccarini, and P. R. Stauffer, "Vesicoureteral Reflux in Children: A Phantom Study of Microwave Heating and Radiometric Thermometry of Pediatric Bladder," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 58, no. 11, pp. 3269–3278, Nov. 2011, doi: 10.1109/tbme.2011.2167148.
- [73] N.-A. Livanos et al., "Design and Interdisciplinary Simulations of a Hand-Held Device for Internal-Body Temperature Sensing Using Microwave Radiometry," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 6, pp. 2421–2433, Mar. 2018, doi: 10.1109/jsen.2018.2791443.
- [74] A. Afyf et al., "Flexible antenna array for early breast cancer detection using radiometric technique," *Int. J. Biol. Biomed. Eng.*, vol. 10, pp. 10–17, 2016.
- [75] E. Groumpas et al., "Sensing local temperature and conductivity changes in a brain phantom using near-field microwave radiometry," 2017 *International Workshop on Antenna Technology : Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT)*. IEEE, pp. 293–295, 2017.
- [76] V. Leushin et al., "Numerical simulation of miniature antennas applicators of microwave radiometry for diagnostics of the functional state of the brain," *ITM Web of Conferences*. EDP Sciences, vol. 30, p. 13005, 2019.
- [77] M. Koutsoupidou et al., "A microwave breast imaging system using elliptical uniplanar antennas in a circular-array setup," 2015 *IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, IEEE, pp. 1–4, 2015.
- [78] P. Momenroodaki, W. Haines, M. Fromandi, and Z. Popovic, "Noninvasive Internal Body Temperature Tracking With Near-Field Microwave Radiometry," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 5, pp. 2535–2545, May 2018, doi: 10.1109/tmmt.2017.2776952.

- [79] P. Momenroodaki, W. Haines, and Z. Popović, "Non-invasive microwave thermometry of multilayer human tissues," *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, IEEE, pp. 1387–1390, 2017.
- [80] Ø. Klemetsen, S. Jacobsen, and Y. Birkelund, "Radiometric temperature reading of a hot ellipsoidal object inside the oral cavity by a shielded microwave antenna put flush to the cheek," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 57, no. 9, pp. 2633–2652, 2012.
- [81] D. B. Rodrigues, P. R. Stauffer, and P. F. Maccarini, "Monitoring brown fat metabolic activity using microwave radiometry: antenna design and frequency selection," *2014 IEEE Benjamin Franklin Symposium on Microwave and Antenna Sub-systems for Radar, Telecommunications, and Biomedical Applications (BenMAS)*, IEEE, pp. 1–3, 2014.
- [82] G. León, L. F. Herrán, I. Mateos, E. Villa, and J. B. Ruiz-Alzola, "Wideband Epidermal Antenna for Medical Radiometry," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1987, Apr. 2020, doi: 10.3390/s20071987.
- [83] M.-R. Tofghi and J. R. Pardeshi, "Interference Enhanced Biomedical Antenna for Combined Heating and Radiometry Application," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1895–1898, 2017, doi: 10.1109/lawp.2017.2685503.
- [84] H. Ullah et al., "A Wearable Radiometric Antenna for Non-Invasive Brain Temperature Monitoring," *2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*, IEEE, pp. 1–2, 2018.
- [85] R. Warty, M.-R. Tofghi, U. Kawoos, and A. Rosen, "Characterization of Implantable Antennas for Intracranial Pressure Monitoring: Reflection by and Transmission Through a Scalp Phantom," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 10, pp. 2366–2376, Oct. 2008, doi: 10.1109/tmtt.2008.2004254.
- [86] V. Slyusar, "Metamaterials in antenna technology: basic principles and results," *Pervaya Milya*, no. 3-4, pp. 44–60, 2010. (In Russ.).
- [87] B. Osmonov et al., "Passive Microwave Radiometry for the Diagnosis of Coronavirus Disease 2019 Lung Complications in Kyrgyzstan," *Diagnostics*, vol. 11, no. 2, p. 259, Feb. 2021, doi: 10.3390/diagnostics11020259.
- [88] S. G. Vesnin et al., "Diagnostic conformal system for neuroimaging of the brain using a multichannel radiothermometer based on monolithic integrated circuits," *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye*, vol. 12, no. 1, pp. 5–12, 2020. (In Russ.).
- [89] V. Yu. Leushin et al., "Possibilities of increasing the interference immunity of radiothermograph applicator antennas for brain diagnostics," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 337, p. 113439, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.sna.2022.113439.

Information about the authors

V. Yu. Leushin, Ph.D., technical director of "HYPERION" Ltd., senior researcher of Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia). ORCID 0000-0001-7092-360X.

S. V. Agasieva, Ph.D., Associate Professor, Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia). ORCID 0000-0002-9089-1411.

S. G. Vesnin, Ph.D., General Director of RTM Diagnostics Ltd., senior researcher of Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia). ORCID 0000-0003-4353-8962.

M. K. Sedankin, Ph.D., Senior Researcher of FMBA Burnazyana of Russia, Associate Professor of RTU-MIREA, senior researcher of Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia). ORCID 0000-0001-9875-6313.

I. O. Porokhov, Ph.D., engineer of the 1st category, JSC "CNIRTI n. a. Acad. A. I. Berg, senior researcher of Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia).

N. A. Vetrova, Ph.D., Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Associate Professor, Peoples' Friendship University of Russia (Moscow, Russia). ORCID 0000-0002-6218-4111.

E. N. Gorlacheva, Doctor of Economics, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Associate Professor, ORCID 0000-0001-6290-8557.

M. I. Sidorova, laboratory researcher, Peoples' Friendship University of Russia, student of Moscow Institute of Physics and Technology.

Элементная база МИС СВЧ для многоканального многочастотного радиотермометра

¹ Чижиков С. В., ¹ Попов В. В., ² Тихомиров В. Г.,
³ Соловьев Ю. В., ¹ Агандеев Р. В.

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный университет)
ул. 2-я Бауманская, д. 5, Москва, 105005, Российская Федерация
chigikov95@mail.ru

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ул. проф. Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация
³ АО «Светлана-Электронприбор»
просп. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Российская Федерация

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Современная медицинская СВЧ диагностическая аппаратура требует применения решений, связанных с компактностью разрабатываемых приборов и высоким быстродействием. Достичь поставленных условий возможно с применением современной полупроводниковой компонентной базы на основе соединений A^3B^5 . В работе представлены конструкции основных элементов управления СВЧ сигнала в составе микроволнового радиотермометра монолитного $AlGaIn/GaN/SiC$ HEMT SPDT транзисторного переключателя и МИС МШУ, разработанного на основе рHEMT гетероструктуры арсенида галлия.

Ключевые слова: радиотермометрия, монолитные интегральные схемы, гетероструктуры.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Элементная база МИС СВЧ для многоканального многочастотного радиотермометра / С. В. Чижиков и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 4. С. 515—530.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Элементная база МИС СВЧ для многоканального многочастотного радиотермометра / С. В. Чижиков, В. В. Попов, В. Г. Тихомиров и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 515—530.

1. Введение

В последнее время для применения в различных сферах деятельности человека бурно развивается метод микроволновой радиометрии (РТМ-метод), имеющий ряд преимуществ перед традиционными методами диагностики. В стадии внедрения в коммерческую эксплуатацию находится перспективный способ измерения влажности почвогрунтов, основанный на использовании СВЧ-радиометрических датчиков различных диапазонов длин волн. Помимо этого, активно развивается микроволновая радиотермометрия для функционального исследования тканей и органов человека, которая позволяет неинвазивно выявлять в них термонеоднородности, реализовывать раннюю диагностику онкологических заболеваний, а также корректировать процесс лечения по изменению параметров электромагнитного излучения тканей и органов [1—2].

РТМ-метод основан на измерении интенсивности собственного электромагнитного излучения физического тела в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ-диапазоне): измеряя мощность шумового сигнала на выходе антенны, можно получить информацию о температуре объекта. Это свойство нагретых тел используется для измерения усредненной температуры внутренних тканей и обнаружения температурных аномалий (повышенной или пониженной температуры внутренних тканей) [3—5].

Измерение мощности шумового сигнала, поступающего с выхода антенны, происходит в СВЧ-приемниках — радиотермометрах, к которым предъявляется ряд существенных требований. Медицинские радиотермометры должны обладать высокой чувствительностью необходимой для приема и обработки крайне слабых шумовых сигналов мощностью $\approx 10^{-13}$ — 10^{-12} Вт, высокой точностью измерения температуры объекта (допустимая разрешающая способность измерителя температуры составляет 0,1 К). Конструкция должна обладать миниатюрностью и при этом позволять проводить одновременно несколько измерений температуры, что может быть обеспечено применением многоканальных систем передачи и приема СВЧ сигнала в системе «медицинский прибор — объект биологического исследования» [6—11].

Дальнейшее развитие метода радиометрии затрудняется наличием ряда научно-технологических ограничений, которые необходимо преодолеть. Объединение в одном радиометрическом комплексе принципов многоканальности, многочастотности и микроминиатюрности приведет к существенному уменьшению размеров радиометрического приемника и к необходимости разработки принципиально новых конструктивных и технологических решений, а именно выполнение его в виде одного модуля,

что подразумевает использование монолитного интегрального исполнения. Результаты работ в данном направлении отображены в работах [12—14].

Таким образом, современная СВЧ аппаратура требует технических решений, обеспечивающих компактность разрабатываемых приборов и высокое быстродействие. Применение элементной базы, выполненной в виде монолитных интегральных схем, позволит увеличить вариативность схемотехнических решений при разработке современных микроволновых радиометров и, тем самым, обеспечить их оптимальные характеристики и расширения функциональных возможностей приборов. В работах [15—16] рассмотрены возможности использования интегральных микросхем в медицинских микроволновых радиотермометрах с целью улучшения характеристик и функциональных возможностей приборов.

2. Основная часть

Микроволновые радиотермометры могут быть созданы на основе различных принципов. Два наиболее распространенных варианта: радиотермометр полной мощности и радиотермометр, построенный на основе схемы *R. H. Dicke*. Большинство радиотермометров, представленных в публикациях, построено на базе данных схем или их модификациях [17—21]. На сегодняшний день медицинские радиометры работают в диапазоне частот 1—3 ГГц с глубиной проникновения в мягкие ткани 16—30 мм [16, 22]. В данном диапазоне частот реализовано большое количество различной полупроводниковой компонентной базы на основе таких материалов, как арсенид галлия, нитрид галлия и кремний — германий. Номенклатура такой компонентной базы достаточно большая — СВЧ диоды, дискретные транзисторы различного назначения и монолитные интегральные схемы на их основе [23—25]. На рис. 1 представлено схемотехническое решение приемника медицинского радиотермометра.

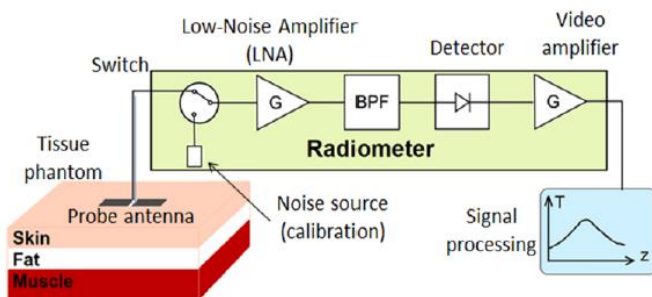


Рис. 1. Схемотехническое решение медицинского радиотермометра.

Fig. 1. Circuit design of a medical radiothermometer

Как видно из представленной схемы, основными элементами конструкции приемника радиотермометра, обеспечивающими технические и функциональные характеристики устройства, являются переключатель и малошумящий усилитель. Рассмотрим каждый из них с точки зрения возможности применения их в радиотермометре в монолитном интегральном исполнении.

На входе приемника располагается переключатель сигналов, который обеспечивает прием сигнала и калибровку по «горячей» и «холодной» нагрузке температуры. Реализация приема сигнала без калибровки и с калибровкой по температуре возможно с применением СВЧ полупроводниковых переключателей двух типов — *SPST* (однопозиционный переключатель) в конструкционном исполнении без калибровки по температуре и переключатели *SPDT* (двухпозиционный переключатель), изготовленных на эпитаксиальных гетероструктурах арсенида галлия в монолитном интегральном исполнении. В качестве активных элементов переключателя могут выступать СВЧ диоды или транзисторы, изготовленные по групповой технологии в едином технологическом цикле, обеспечивающие работу в диапазоне частот 1—3 ГГц. В случае применения монолитных интегральных схем (МИС) переключателя на основе транзисторов, работающих в режиме ключа, применяются эпитаксиальные арсенид галлиевые *pHEMT* гетероструктуры, которые обеспечивают высокую скорость переключения транзисторов.

В последнее время наблюдается значительный интерес к реализации СВЧ полупроводниковой компонентной базы на основе широкозонных материалов группы A^3B^5 . Применение гетероструктур *HEMT AlGaIn/GaN* на подложках полуизолирующего SiC по сравнению с традиционными для СВЧ области гетероструктурами на основе *GaAs* позволяет обеспечить минимальные размеры кристалла, эффективный отвод тепла, работать с высокими значениями мощности входного сигнала. В связи с этим применение такой компонентной базы в составе различных СВЧ приборов является достаточно перспективным.

В рамках данной работы был разработан монолитный переключатель с применением гетероструктур *HEMT AlGaIn/GaN*. Конструкция монолитного переключателя определялась областью применения разрабатываемого радиометра. Основные требования, предъявляемые к переключателям, являются миниатюрность и обеспечение малых значений вносимых потерь и высоких значений развязки в широком диапазоне частот. Наиболее чувствительные к отклику СВЧ сигнала от биологического объекта исследований радиометры работают в области частот 0,5—3 ГГц [9]. Еще одним существенным требованием к разрабатываемой элементной базе

является обеспечение в составе радиометра возможности приема сигнала и калибровки по «горячей» и «холодной» нагрузке температуры. На основании указанных требований была выбрана конструкция транзисторного переключателя тип *SPDT* (один вход — два выхода СВЧ сигнала) с минимальным топологическим размером 0,4 мкм для обеспечения надежной работы в указанном диапазоне частот.

Для разработки технологии изготовления транзисторного переключателя применялась отечественная эпитаксиальная *HEMT*-структура, которая была выращена методом газофазной эпитаксии на полуизолирующей подложке карбида кремния диаметром 76,2 мм производства АО «Светлана-Электронприбор».

В рамках настоящей работы проводилось численное моделирование и экспериментальная оптимизация конструкции гетероструктур полевых СВЧ-транзисторов (*HEMT*) на основе систем материалов *AlGaIn/GaN*. Разработанные гетероструктуры *HEMT* транзисторов (рис. 2) состояли из зародышевого слоя *AlGaIn* для подложек *SiC*, изолирующего буферного слоя *GaN* толщиной 2 мкм, слоя *AlN* толщиной 1 нм и нелегированного барьерного слоя *AlGaIn*. Толщина и состав слоя *AlGaIn* варьировались в различных вариантах расчета в диапазоне 15—35 нм и 20—35%, соответственно.

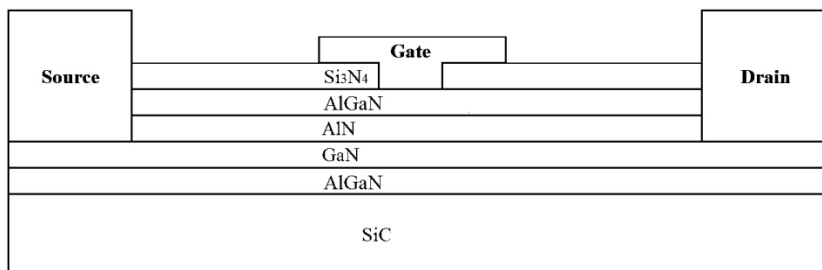


Рис. 2. Схематическое изображение разработанной гетероструктуры *HEMT* транзистора для использования в составе переключателя.

Fig. 2. Schematic representation of the developed *HEMT* transistor heterostructure for use as part of a switch

В результате проведенной численной оптимизации *HEMT* структура обеспечивала следующие характеристики: концентрация двумерного электронного газа в канале $9 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и подвижность $1750 \text{ см}^2/\text{В} \times \text{сек}$. Формирование металлизации омических контактов и разводки проводили с применением метода «взрывной» фотолитографии. В качестве металлизации омических контактов использовалась система *Ti/Al/Ni/Au* с последующим быстрым термическим отжигом при температуре $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ в среде азота. Межприборная изоляция осуществлялась методом ионной имплантации.

Формирование Ni/Au затворной металлизации (длина затвора $L_g = 0.4$ мкм и ширина $W_g = 2$ мм) проводилось с помощью электронной литографии. Для исключения статического пробоя и повышения надежности в конструкции переключателя был предусмотрен тройной затвор. Диэлектрическая защита обеспечивалась нанесением слоя нитрида кремния. Сквозные заземляющие отверстия формировались плазмохимическим травлением подложки карбида кремния с последующей процессом магнетронного напыления металлизации Ti/Au . На рис. 3 представлен кристалл $HEMT\ AlGaN/GaN\ SPDT$ переключателя на пластине.

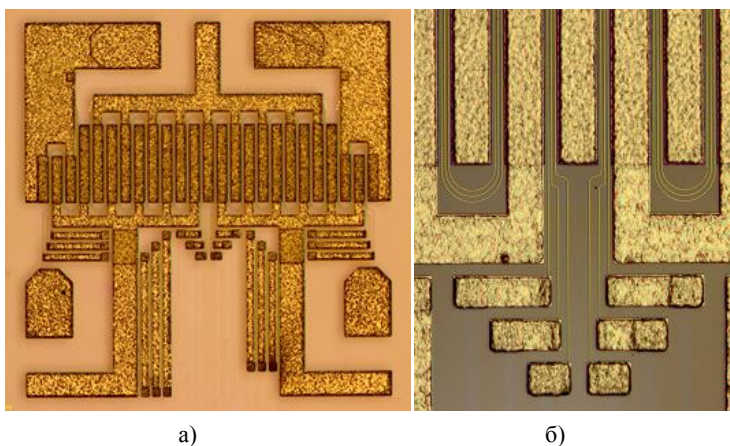


Рис. 3. Фрагмент кристаллов $HEMT\ AlGaN/GaN\ SPDT$ переключателя на пластине (а) и его затворная часть (б).

Fig. 3. Fragment of $HEMT\ AlGaN/GaN\ SPDT$ switch crystals on the plate (a) and its gate part (b)

Контроль ВАХ переключателя проводился с помощью зондовой станции *Cascade MicroTech PA-200*. На рис. 4 представлена типичная ВАХ кристалла $HEMT\ AlGaN/GaN\ SPDT$ переключателя.

Измерение СВЧ характеристик были проведены с помощью контрольно-измерительного стенда в составе зондовой станции *Cascade PM5* и векторного анализатора *Rohde&Schwarz ZVB-20* непосредственно на кристалле без использования СВЧ тестовой платы. На рис. 5 приведены ключевые характеристики разработанного переключателя — потери на проход и изоляция закрытого канала.

Как видно из представленных данных, разработанный переключатель обеспечивает потери в одном канале на проход СВЧ сигнала 0,66—1,27 дБ и изоляцию не хуже 25—11,5 дБ в диапазоне частот 0,5—3 ГГц. При согласовании разработанного переключателя на тестовой плате (рис. 6) наблюдается улучшение ключевого параметра — потери СВЧ сигнала на

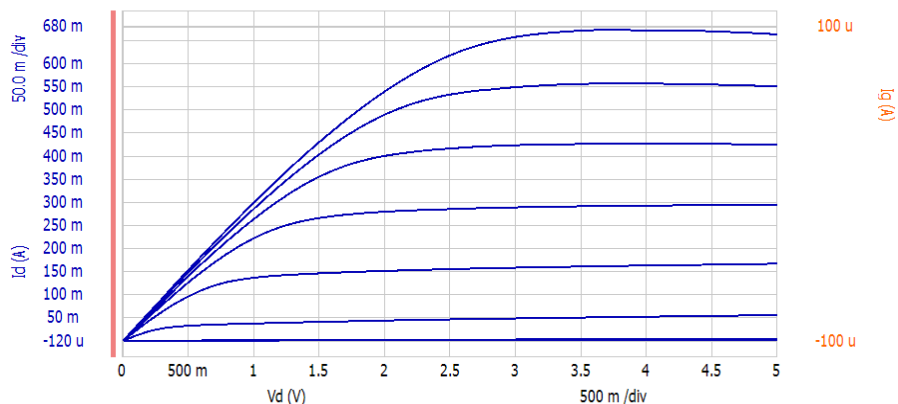


Рис. 4. BAX кристалла *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* переключателя.

Fig. 4. CVC of the *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* switch crystal

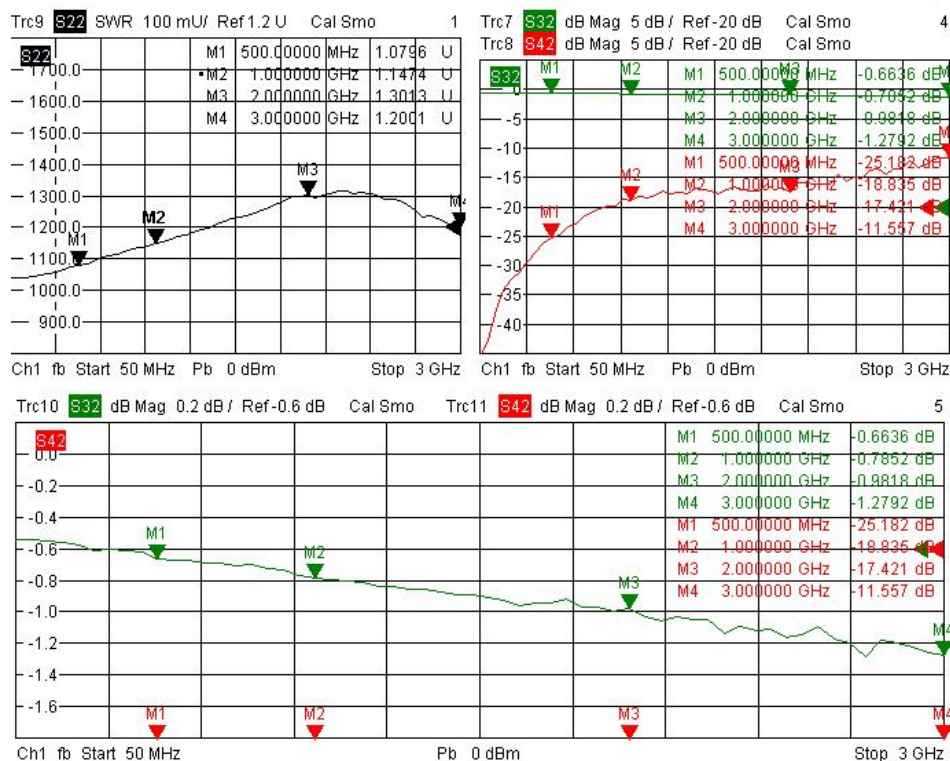


Рис. 5. Малосигнальные СВЧ характеристики *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* переключателя.

Fig. 5. Small-signal microwave characteristics of *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* switch

проход 0,39—0,9 дБ, значение КСВН не превышает 1,33 дБ, а изоляция изменяется в указанном диапазоне частот от 26 дБ на частоте 0,5 ГГц до 14 дБ при частоте 3 ГГц (рис. 7), что необходимо учитывать при согласовании кристалла переключателя при монтаже в корпус микроволнового радиометра.

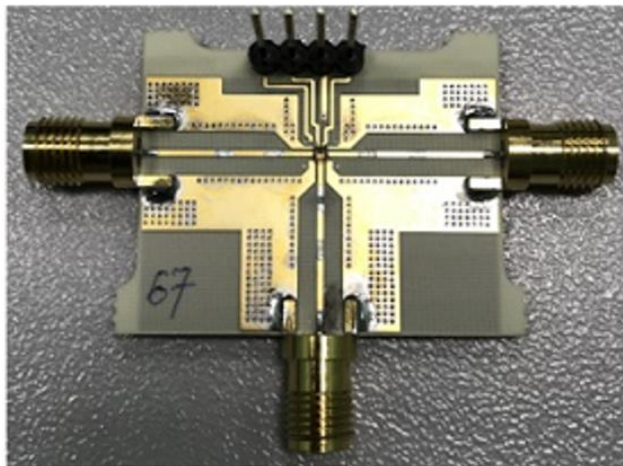


Рис. 6. HEMT AlGaIn/GaN SPDT переключатель на тестовой плате.

Fig. 6. HEMT AlGaIn/GaN SPDT switch on test board

Таким образом, в работе представлена разработанная конструкция HEMT AlGaIn/GaN SPDT переключателя на отечественной гетероструктуре на подложке полуизолирующего карбида кремния. Проведенные измерения СВЧ параметров разработанного переключателя, показывают возможность применения данной элементной компонентной базы в составе микроволновых радиометров, что позволит объединить в одном радиометрическом комплексе принципы многоканальности, многочастотности и миниатюризации и приведет к расширению его функциональных возможностей и существенному уменьшению размеров.

Еще одним из основных элементов конструкции приемника медицинского радиотермометра, обеспечивающих качественный прием СВЧ сигнала, является малошумящий усилитель. Основным критерием выбора разработчиком медицинского радиотермометра из достаточно большой номенклатуры изделий МИС малошумящего усилителя (МШУ) является согласование с МИС переключателя и обеспечение высокого коэффициента усиления и малых значений уровня шума [26].

Поскольку элементная компонентная база, реализованная на *pHEMT* гетероструктурах AlGaAs/GaAs, обладает наименьшими коэффициентами шума, именно такие гетероструктуры используются при изготовлении ги-

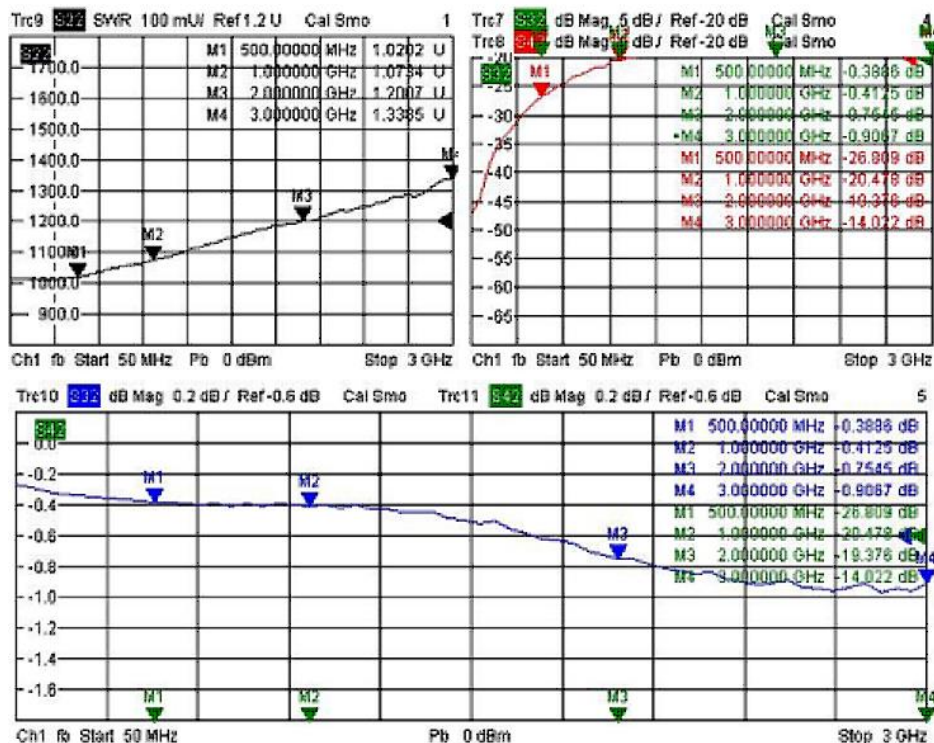


Рис. 7. Малосигнальные СВЧ характеристики *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* переключателя на тестовой плате после согласования.

Fig. 7. Small-signal microwave characteristics of *HEMT AlGaIn/GaN SPDT* switch on the test board after matching

брендных и монокристаллических МШУ. Для снижения коэффициента шума требуется небольшая длина затвора и низкое паразитное сопротивление между затвором и истоком. Типичными значениями длины затвора являются 0,25—0,5 мкм. Для снижения коэффициента шума системы в целом важно снизить потери в цепях, особенно перед первым каскадом МШУ. Это включает линию передачи от антенны к устройству. Кроме снижения потерь в цепях, шум может быть уменьшен при работе усилителя на низких температурах, токах и напряжениях. Наконец, коэффициент шума МШУ зависит от степени согласования цепей, которые проектируются с учетом минимизации коэффициента шума и максимизации усиления. Оптимальным с этой точки зрения является *HEMT* [27—29].

На сегодняшний день в РФ опытом изготовления МИС МШУ в частотном диапазоне 1—3 ГГц на основе арсенида галлия обладает АО

«Светлана-Электронприбор». В качестве материала, который применялся для создания кристаллов усилителя, применялись эпитаксиальные гетероструктуры на основе арсенида галлия. Гетероструктуры изготавливались на полупроводниковых подложках арсенида галлия, эпитаксиальные слои выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Кристаллы МШУ были изготовлены на двух типах транзисторных гетероструктур — *MESFET* и *pHEMT*. Изготовление кристаллов МШУ на обоих типах гетероструктур проводилось по стандартной технологии для материалов A^3B^5 — технологии «взрывной» литографии. Для обеспечения оптимальных характеристик в диапазоне частот 1—3 ГГц транзисторы в кристаллы МШУ изготавливались по технологии с проектной нормой по длине затвора 0.5 мкм. Такие топологические размеры обеспечивались применением в технологическом процессе изготовления установки электронной литографии. Омические контакты формировались с применением металлизации *AuGe-Ni-Au*, межэлементная изоляция осуществлялась методом ионной имплантации. В качестве барьера Шоттки применялась металлизация *Ti/Au*. Защита активных (транзисторы) и пассивных (емкости, сопротивления, индуктивности) элементов топологии кристаллов МШУ проводилась с помощью процессов плазмохимического осаждения диэлектрических пленок на основе нитрида кремния. С точки зрения усиления сигнала более предпочтительным для создания МШУ является применение *pHEMT* гетероструктур — высокие значения концентрации основных носителей заряда в канале и подвижности позволяют существенно увеличить коэффициент усиления, что является важным условием при приеме слабых сигналов. Однако при общих подходах в технологии изготовления транзисторов в составе МШУ (*MESFET* и *pHEMT* гетероструктуры) критически важной операцией для транзисторов на основе *pHEMT* гетероструктур является жидкостное селективное травление. На сегодняшний день в АО «Светлана-Электронприбор» проведен ряд работ, результатом которых является разработанная технология жидкостного травления эпитаксиальных гетероструктур с применением различных селективных травителей на основе перекиси водорода, водного раствора аммиака, серной кислоты и различных соединений цитратов. Разработанная технология позволяет обеспечить высокий процент выхода годных по токам насыщения. Опытные образцы кристаллов МИС МШУ имели значения коэффициента усиления в диапазоне 18—20 дБ, коэффициент шума меньше 2,2 дБ, что является достаточно хорошим результатом для усиления слабых сигналов. На рис. 8 представлен фрагмент кристалла МИС МШУ, выполненного на арсенидгаллиевой *pHEMT*.

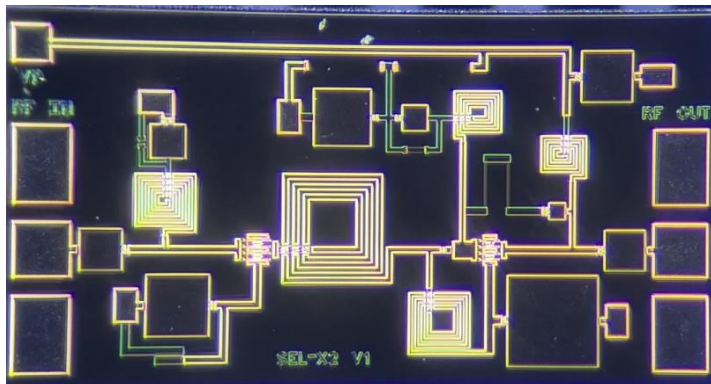


Рис. 8. Фрагмент топологии кристалла МИС МШУ разработанного на основе *pHEMT* гетероструктуры арсенида галлия для работы в диапазоне частот 1—3 ГГц.

Fig. 8. A fragment of the topology of the MIS LNA crystal developed on the basis of the *pHEMT* gallium arsenide heterostructure for operation in the frequency range of 1–3 GHz

3. Заключение

Таким образом, сделан обзор элементной базы МИС СВЧ для применения в медицинских радиотермометрах с целью улучшения технических характеристик и расширения функциональных возможностей устройств.

Проведенный аналитический обзор элементной базы МИС СВЧ для применения в медицинских радиотермометрах показал широкие возможности в области схемотехнических решений на основе отечественной элементной компонентной базы. Применение монолитных интегральных схем различного назначения на основе полупроводниковых гетероструктур материалов группы A^3B^5 позволяет обеспечить требуемые характеристики работы радиотермометра в части приема, усиления и обработки СВЧ сигнала, существенно повысить функциональные возможности и реализовать конструкционное исполнение с значительным снижением массогабаритных характеристик разрабатываемого медицинского прибора.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения соглашения № 19-19-00349-П.

Список литературы

1. Приборы для диагностики патологических изменений в организме человека методами микроволновой радиометрии / Ю. В. Гуляев и др. // Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век. 2017. Т. 9, № 2. С. 27—45.

2. The specific of 3D passive radars sensing alive and non-alive objects / I. Sidorov et al. // 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). Dolgoprudny, Russia, 2019. P. 1—4.
3. Моделирование собственного теплового излучения почки в микроволновом диапазоне / М. К. Седанкин и др. // Медицинская техника. 2019. № 1. С. 44—47.
4. Исследование возможностей радиочастотной идентификации с пассивными метками в инвазивной биосенсорике / А. Г. Гудков и др. // Медицинская техника. 2015. № 2. С. 26—29.
5. On the Possibility of Detecting Oil Films on a Water Surface by Methods of Microwave Radiometry / A. G. Gudkov et al. // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 55. P. 57—62.
6. Research of a microwave radiometer for monitoring of internal temperature of biological tissues / S. Vesnin et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 4, no. 5 (100). P. 6—15.
7. Антенны-аппликаторы для медицинских микроволновых радиотермографов / М. К. Седанкин и др. // Медицинская техника. 2018. №4. С. 13—15.
8. Моделирование антенн-аппликаторов унифицированных антенных решеток модульного типа для многоканальных систем радиотермокартирования / А. Ф. Бобрехин и др. // Антенны. 2014. № 2. С. 17—26.
9. Приборы для диагностики патологических изменений в организме человека методами микроволновой радиометрии / Ю. В. Гуляев и др. // Нанотехнологии : разработка, применение. 2017. Т. 9, № 2. С. 27—45.
10. Стаценко Л. Г., Пуговкина О. А. Проектирование СВЧ-устройств для микроволновой радиотермометрии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №10. С. 127—135.
11. Устройства СВЧ и антенные системы. Кн. 2. Моделирование, проектирование и технологии СВЧ-устройств и ФАР / Под. ред. А. Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2014. 198 с.
12. Prospects for application of radio-frequency identification technology with passive tags in invasive biosensor systems / A. Gudkov et al. // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49, no. 2. P. 98—101.
13. Обнаружение локального источника тепла в глубине тела человека методом объемной радиотермографии / Е. П. Новичихин и др. // Медицинская физика. 2020. Т. 12, № 2. С. 305—312.
14. The relationship between the reliability of transistors with 2D AlGaIn/GaN channel and organization type of nanomaterial / V. V. Emtsev et al. // Technical Physics Letters. 2016. Vol. 42, no. 7. P. 701—703.
15. Use of multichannel microwave radiometry for functional diagnostics of the brain / A. G. Gudkov et al. // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53, no. 2. P. 108—111.
16. Studies of a Microwave Radiometer Based on Integrated Circuits / A. G. Gudkov et al. // Biomedical Engineering. 2020. Vol. 53. P. 413—416.
17. Многоканальный микроволновый радиотермометр / М. К. Седанкин и др. // Междунар. науч.-тех. конф. «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике». 2017. С. 348—350.
18. Электронный модуль многоканального СВЧ тракта для систем радиотермокартирования / В. Н. Вьюгинов и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. № 1. С. 27—34.
19. Результаты разработки унифицированного приемного модуля для многоканальных медицинских радиотермографов / С. В. Агасиева и др. // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМи-Ко'2014). Севастополь, 7—13 сентября 2014 г. Севастополь: Вебер, 2014. Том 2. С. 1045—1046.

20. Результаты разработки экспериментального образца прибора для неинвазивной диагностики состояния головного мозга с использованием метода многоканальной микроволновой радиометрии / В. Ю. Леушин и др. // Нанотехнологии : разработка, применение — XXI век. 2019. Т. 11. № 1. С. 44—50.
21. Электронный модуль многоканального СВЧ тракта для систем радиотермокартирования / В. Н. Вьюгинов и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19, № 1. С. 27—34.
22. Гудков А. Г. Электронные устройства СВЧ. Кн. 2 / Под ред. И. В. Лебедева. М. : Радиотехника, 2008. 400 с.
23. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ. Кн. 1 / Под ред. А. Г. Гудкова и В. В. Попова. М. : ООО «Автотест», 2012. 212 с.
24. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ. Кн. 2 / Под ред. А. Г. Гудкова и В. В. Попова. М. : ООО «Автотест», 2013. 214 с.
25. Повышение надежности и качества ГИС и МИС СВЧ. Кн. 3 / Под ред. В. Н. Вьюгинова, А. Г. Гудкова и В. В. Попова. М. : ООО НТП «Выраж-Центр», 2016. 252 с.
26. Патент на изобретение № 2646536 (РФ). Гетероструктурный полевой транзистор на основе нитрида галлия с улучшенной температурной стабильностью вольт-амперной характеристики / А. Г. Гудков и др. Оpubл. в Б. И. 2018. № 7.
27. Simulation of electric field distribution in GaN HEMTs for the onset of structure degradation / A. Gudkov et al. // Proceedings of the 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, EMCCompo. 2017. P. 115—118.
28. Evaluation of the influence mode on the CVC GaN HEMT using numerical modeling / A. G. Gudkov et al. // Journal of Physics : Conference Series. 2016. Vol. 741, iss. 1. Art. no. 012024.
29. Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation / A. G. Gudkov et al. // Journal of Physics : Conference Series. 2019. Vol. 1410. no. 012191.

Информация об авторах

Чижиков Сергей Владимирович, младший научный сотрудник Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

Попов Владимир Васильевич, президент ПАО «Светлана», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Тихомиров Владимир Геннадьевич, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Соловьев Юрий Владимирович, заместитель директора по науке АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Агандеев Роман Вячеславович, студент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

The Element Base of the MIC Microwave for a Multichannel Multi-Frequency Radiothermometer

S. V. Chizhikov¹, V. V. Popov², V. G. Tikhomirov³,
Yu. V. Solov'ev², and R. V. Agandeev¹

¹ Bauman Moscow State Technical University
5, 2nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation
chigikov95@mail.ru

² JSC "Svetlana-Electronpribor"
5, Prof. Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation

³ St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI»
27, Engels ave., St. Petersburg, 194156, Russian Federation

Received: May 20, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: Modern medical microwave diagnostic equipment requires the use of solutions related to the compactness of the developed devices and high performance. It is possible to achieve the set conditions with the use of a modern semiconductor component base based on A^3B^5 compounds. The paper presents the designs of the main control elements of the microwave signal as part of the microwave radiothermometer monolithic AlGaIn/GaN/SiC HEMT SPDT transistor switch and MIC LNA developed on the basis of the pHEMT heterostructure of gallium arsenide.

Keywords: radiothermometry, monolithic integrated circuits, heterostructures.

For citation (IEEE): S. V. Chizhikov, V. V. Popov, V. G. Tikhomirov, Yu. V. Solov'ev, and R. V. Agandeev, "The Element Base of the MIC Microwave for a Multichannel Multi-Frequency Radiothermometer," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 515–530, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.37. (In Russ.).

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation under agreement No. 19-19-00349-II.

References

- [1] Yu. V. Gulyaev, V. Yu. Leushin, A. G. Gudkov, S. G. Vesnin et al., "Devices for diagnosing pathological changes in the human body using microwave radiometry," // *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye – XXI vek*, vol. 9, no. 2, pp. 27–45. 2017. (In Russ.).
- [2] I. Sidorov, A. Gudkov, E. Novichikhin, A. Taradin, R. Haarbrink, and S. Chizhikov, "The specific of 3D passive radars sensing alive and non-alive objects," *2019 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*. Dolgoprudny, Russia, pp. 1–4, 2019.

- [3] M. K. Sedankin et al., "Modeling of the own thermal radiation of the kidney in the microwave range," *Meditinskaya tekhnika*, no. 1, pp. 44–47, 2019. (In Russ.).
- [4] A. G. Gudkov, S. V. Agasieva et al., "Investigation of the possibilities of radio frequency identification with passive tags in invasive biosensors," *Meditinskaya tekhnika*, no. 2, pp. 26–29, 2015. (In Russ.).
- [5] A. G. Gudkov et al., "On the Possibility of Detecting Oil Films on a Water Surface by Methods of Microwave Radiometry," *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 55, no. 1–2, pp. 57–62, May 2019, doi: 10.1007/s10556-019-00580-2.
- [6] S. G. Vesnin, M. Sedankin, V. Leushin, V. Skuratov, I. Nelin, and A. Konovalova, "Research of a microwave radiometer for monitoring of internal temperature of biological tissues," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 5 (100), pp. 6–15, Aug. 2019, doi: 10.15587/1729-4061.2019.176357.
- [7] M. K. Sedankin et al., "Antenna-applicators for medical microwave radio thermographs," *Meditinskaya tekhnika*, no. 4, pp. 13–15, 2018. (In Russ.).
- [8] A. F. Bobrikhin et al., "Modeling antenna-applicators of unified antenna arrays of modular type for multichannel radiothermal mapping systems," *Antenny*, no. 2, pp. 17–26, 2014. (In Russ.).
- [9] Yu. V. Gulyaev et al., "Instruments for diagnosing pathological changes in the human body by microwave radiometry," *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye*, vol. 9, no. 2, pp. 27–45, 2017. (In Russ.).
- [10] L. G. Statsenko and O. A. Pugovkina, "Designing microwave devices for microwave radio-thermometry," // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki*, no. 10, pp. 127–135, 2014. (In Russ.).
- [11] A. G. Gudkov, V. V. Popov, A. E. Chalykh et al. *Microwave devices and antenna systems. Book. 2. Modeling, design and technology of microwave devices and phased array*, ed. A. Yu. Grinev, Moscow: Radiotekhnika, 2014. (In Russ.).
- [12] A. G. Gudkov et al., "Prospects for Application of Radio-Frequency Identification Technology with Passive Tags in Invasive Biosensor Systems," *Biomedical Engineering*, vol. 49, no. 2, pp. 98–101, Jul. 2015, doi: 10.1007/s10527-015-9506-x.
- [13] E. P. Novichikhin, I. A. Sidorov, V. Yu. Leushin, S. V. Agasieva, and S. V. Chizhikov, "The local heat source detection inside of the human body by means of microwave radiothermography," *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, vol. 12, no. 2, pp. 305–312, Aug. 2020, doi: 10.17725/rensit.2020.12.305. (In Russ.).
- [14] V. V. Emtsev et al., "The relationship between the reliability of transistors with 2D AlGaIn/GaN channel and organization type of nanomaterial," *Technical Physics Letters*, vol. 42, no. 7, pp. 701–703, Jul. 2016, doi: 10.1134/s1063785016070075.
- [15] A. G. Gudkov et al., "Use of Multichannel Microwave Radiometry for Functional Diagnostics of the Brain," *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 108–111, Jul. 2019, doi: 10.1007/s10527-019-09887-z.
- [16] A. G. Gudkov et al., "Studies of a Microwave Radiometer Based on Integrated Circuits," *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 6, pp. 413–416, Mar. 2020, doi: 10.1007/s10527-020-09954-w.
- [17] M. K. Sedankin et al., "Multichannel microwave radiothermometer," *Mezhdunar. Nauch.-Tekh. Konf. «Informatika i tekhnologii. Innovatsionnyye tekhnologii v pro-myshlennosti i informatsii*, pp. 348–350, 2017. (In Russ.).
- [18] V. N. Vyuginov et al., "Electronic module of a multichannel microwave path for radio thermal mapping systems," *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy*, no. 1, pp. 27–34, 2014. (In Russ.).

- [19] S. V. Agasieva, A. G. Gudkov, A. V. Korolev, V. Yu. Leushin, V. A. Plushev, I. A. Sidorov, "Results of the development of a unified receiving module for multichannel medical radio-thermographs," 24th International Crimean Conference "Microwave and Telecommunication Technology" (CriMiCo'2014). Sevastopol, September 7–13, 2014. Sevastopol: Weber, vol. 2, pp. 1045–1046, 2014. (In Russ.).
- [20] V. Yu. Leushin, V. D. Shashurin, S. V. Chizhikov et al., "Results of the development of an experimental sample of a device for non-invasive diagnostics of the state of the brain using the method of multichannel microwave radiometry," *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye – XXI vek*, vol. 11, no. 1, pp. 44–50, 2019. (In Russ.).
- [21] V. N. Vyuginov et al., "Electronic module of multichannel microwave path for radio thermal mapping systems," *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy*, vol. 19, no. 1, pp. 27–34, 2014. (In Russ.).
- [22] A. G. Gudkov, *Microwave electronic devices*, book 2, ed. I. V. Lebedev, Moscow: Radio-tekhnika, 2008. (In Russ.).
- [23] Improving the reliability and quality of microwave GIS and MIS, book 1, ed. A. G. Gudkov and V. V. Popov, Moscow: Autotest LLC, 2012. (In Russ.).
- [24] Improving the reliability and quality of microwave GIS and MIS, book 2, ed. A. G. Gudkov and V. V. Popov, Moscow: Avtotest LLC, 2013. (In Russ.).
- [25] Improving the reliability and quality of microwave GIS and MIS, book 3, ed. V. N. Vyuginov, A. G. Gudkov and V. V. Popov, Moscow: Virazh-Center LLC, 2016. (In Russ.).
- [26] A. G. Gudkov, S. V. Chizhikov et al., patent No. 2646536 (RF). Heterostructural field-effect transistor based on gallium nitride with improved temperature stability of the current-voltage characteristic. Published in Bulletin of Inventions, no. 7, 2018. (In Russ.).
- [27] V. G. Tikhomirov et al., "Simulation of electric field distribution in GaN HEMTs for the onset of structure degradation," 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo), Jul. 2017, doi: 10.1109/emccompo.2017.7998094.
- [28] Y. M. Parnes et al., "Evaluation of the influence mode on the CVC GaN HEMT using numerical modeling," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 741, p. 012024, Aug. 2016, doi: 10.1088/1742-6596/741/1/012024.
- [29] V. G. Tikhomirov, A. G. Gudkov, S. V. Agasieva, D. D. Dynaiev, M. K. Popov, and S. V. Chizhikov, "Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1410, no. 1, p. 012191, Dec. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1410/1/012191.

Information about the authors

Sergey V. Chizhikov, junior research assistant at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Vladimir V. Popov, the president at PJSC "Svetlana", Saint Petersburg, Russian Federation.

Vladimir G. Tikhomirov, associate Professor at Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russian Federation.

Yuriy V. Solov'ev, Deputy Director for Science at JSC "Svetlana-Electronpribor", Saint Petersburg, Russian Federation.

Roman V. Agandeev, student at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

УДК 621.382

Перспективы микроминиатюризации многоканальных многочастотных радиотермографов

¹ Гудков А. Г., ¹ Веснин С. Г., ^{1,2} Соловьев Ю. В.,

³ Тихомиров В. Г., ² Попов В. В.

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный университет)
ул. 2-я Бауманская, д. 5, Москва, 105005, Российская Федерация
profgudkov@gmail.com

² АО «Светлана-Электронприбор»
просп. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Российская Федерация

³ СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ул. проф. Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Настоящая работа посвящена решению фундаментальной научной задачи — разработке научных основ и методологии создания прототипа аппаратно-программного комплекса неинвазивного выявления и локализации патологий живых тканей человека на основе динамического радиотермокартирования, предназначенного для ранней диагностики онкологических заболеваний и мониторинга процессов их лечения, а также может использоваться в персонализированной медицине. Использование современного программного обеспечения и технологии монолитных интегральных схем СВЧ позволят применить новые подходы к разработке принципиально нового устройства — многоканального многочастотного радиотермографа на основе технологии МИС.

Ключевые слова: радиотермометрия, радиотермограф, многоканальность, многочастотность.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Перспективы микроминиатюризации многоканальных многочастотных радиотермографов / А. Г. Гудков и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 4. С. 531—547.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Перспективы микроминиатюризации многоканальных многочастотных радиотермографов / А. Г. Гудков, С. Г. Веснин, Ю. В. Соловьев и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 531—547.

1. Введение

В настоящее время микроволновые радиотермографы используются диагностики и контроля лечения заболеваний молочных желез [1—3], для обследования сонных артерий с целью выявления воспаленных атеросклеротических бляшек и пациентов с высоким риском инсульта [4—5], для измерения температуры головного мозга [6—8], в том числе при лечении инсульта и черепно-мозговых травм [9—10], для мониторинга температуры головного мозга в процессе гипотермии [11], для диагностики воспалительных заболеваний суставов [12—13], для диагностики пузырно-мочеточникового рефлюкса у детей [14—15], для оценки функциональной активности бурого жира [16], для диагностики и мониторинга лечений болей поясницы [17—29], для диагностики и мониторинга лечения пациентов с легочными заболеваниями при COVID-19 [20]. К сожалению, стационарные микроволновые радиотермометры невозможно использовать в процессе активной жизнедеятельности человека. Вместе с тем, в последние годы это направление очень востребовано и появились статьи по разработке миниатюрных носимых приборов, которые можно устанавливать на теле человека для проведения динамического мониторинга внутренней температуры [21—27]. В частности, Z. Popovic в статье, посвященной перспективам создания носимых беспроводных радиотермометров [24], отмечает, что миниатюризация с использованием монолитной интеграции возможна.

Что касается физиологических особенностей распределения температуры в организме человека, то разница между температурой органов, например, сердца, и кожи варьируется до $\pm 2^\circ \text{C}$ в течение циркадного цикла для условно здорового человека [28]. Нарушение циркадного ритма может привести к сезонным аффективным расстройствам [29], диабету [30], сердечным заболеваниям [31]. Космонавты, спортсмены, пожарные, солдаты и моряки при работе в сложных условиях и при активных тренировках могут подвергаться воздействию неблагоприятных факторов внешней среды, что приводит к переохлаждению, гипертермии, тепловому удару и обуславливает необходимость мониторинга внутренней температуры тела [1, 32—35].

Другие технологии для измерения внутренней температуры, как правило, инвазивны, неудобны, могут вызывать дискомфорт и дать большую ошибку измерения до 6°C [36—39], либо имеют высокую стоимость. Однако и разработанные радиотермографы имели ряд недостатков: недостаточная чувствительность и точность измерения температуры, низкая помехозащищенность, значительный вес и большие габаритные размеры. Попытки решения этих проблем предпринимались в [21, 24] за счет разработки компактной версии радиометра на основе схемы R. Dicke [40, 41].

По данным работы [24] монолитная интеграция возможна, но именно на монолитных интегральных схемах *GaAs* (*MMICs*). Все компоненты могут быть интегрированы в один небольшой чип. Готовые микросхемы имеют небольшие размеры и могут быть установлены и соединены на гибкой подложке с зондом. Следует заметить, что это не является чипом, т. е. МИС, а лишь ГИС с квазимонолитным исполнением. Для повышения эффективности МР в медицинской практике необходимо создание миниатюрного многоканального многочастотного радиотермографа, обеспечивающего получение информации о внутренних температурах и динамики их изменения во времени в нескольких точках на различной глубине одновременно. При этом ставится задача получения информации о характере распределения температуры по глубине исследуемой области организма за счет построения послойных термокарт или трехмерных температурных полей. Это позволит перейти к динамической МР внутренних тканей и органов и проводить оценку их состояния под влиянием различных нагрузок и функциональных проб.

2. Основная часть

Проведенные исследования показали, что построение многочастотного многоканального радиотермографа зависит от ряда факторов: от возможности использования современных технологий МИС СВЧ, от физических параметров исследуемых тканей и органов человека, вида заболевания, а также условий эксплуатации, помеховой обстановки и требований, предъявляемых к разрешающей способности и точности метода. Метод МР можно использовать там, где другие методы сложно или невозможно эксплуатировать: космос, МЧС, Арктика, судебная медицина, спорт, носимые устройства, включая персональную медицину и т. д.

Исследования проводились по следующим направлениям:

1. Поиск оптимальных принципов построения медицинского радиотермографа, предназначенного для измерения радиоярких температур при диагностике новообразований на ранних стадиях развития и который бы позволил в реальном масштабе времени оценивать изменение температуры по глубине.

2. Исследования по созданию медицинских антенн различных видов для построения многоканальных микроволновых антенных решеток, работающих на нескольких частотах и предназначенных для съема сигналов собственного излучения тела человека в многоканальных многочастотных радиотермографах.

3. Разработка алгоритма работы и программного обеспечения 3D-визуализации данных измерений в многоканальных и многочастотных режимах радиометрии. Разработка алгоритма и программы интерполяции в пространстве 3D распределения и радиояркостной температуры в глубине тела человека с учетом специфики параметров многоканального и многочастотного радиометрического приемника.

4. Разработка, изготовление, проведение исследовательских испытаний и апробации прототипа многоканального многочастотного радиотермографа на основе монолитных интегральных схем для нахождения 3D распределения и динамики радиояркостной температуры в глубине тела человека.

Результаты характеризуются представленными ниже данными. На рис. 1 показана структурная схема унифицированного электронного модуля многоканального СВЧ тракта для систем радиотермокартирования.

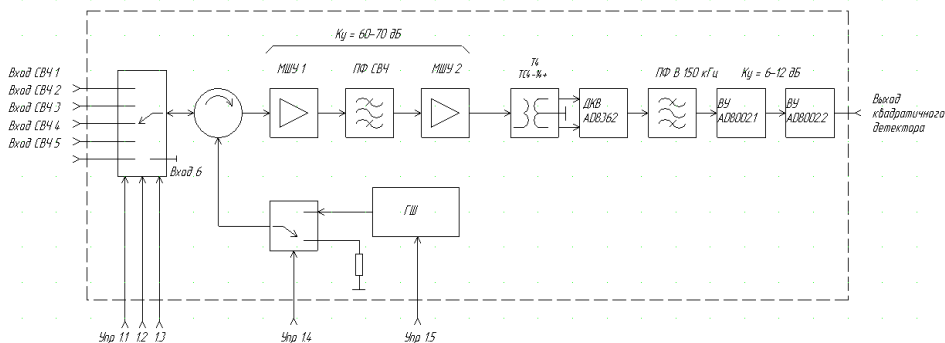


Рис. 1. Структурная схема унифицированного электронного модуля многоканального СВЧ тракта для систем радиотермокартирования.

Fig. 1. Structural diagram of a unified electronic module of a multichannel microwave path for radio thermal mapping systems

На рис. 2 представлена структурная схема прототипа трехканального двухчастотного радиотермографа.

На рис. 3 представлена структурная схема миниатюрного радиометрического приемника.

На рис. 4—5 представлены поля температур головного мозга, полученных с помощью прототипа многоканального многочастотного радиотермографа и антенн-аппликаторов с применением разработанного программного обеспечения 3D-визуализации данных измерений в многоканальных и многочастотных режимах радиометрии.

Для дальнейшего развития метода МР необходимо решить задачи по следующим направлениям:

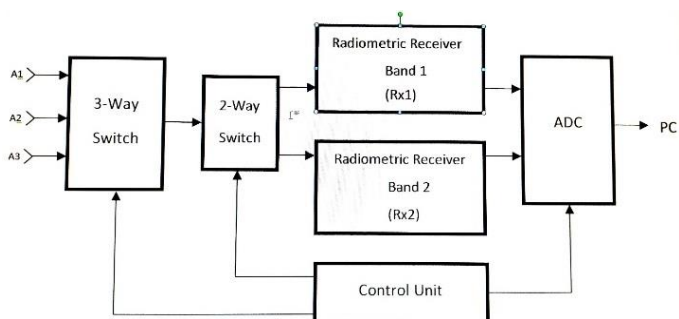


Рис. 2. Структурная схема прототипа трехканального двухчастотного радиотермографа.

Fig. 2. Structural diagram of the prototype three-channel dual-frequency radiothermograph

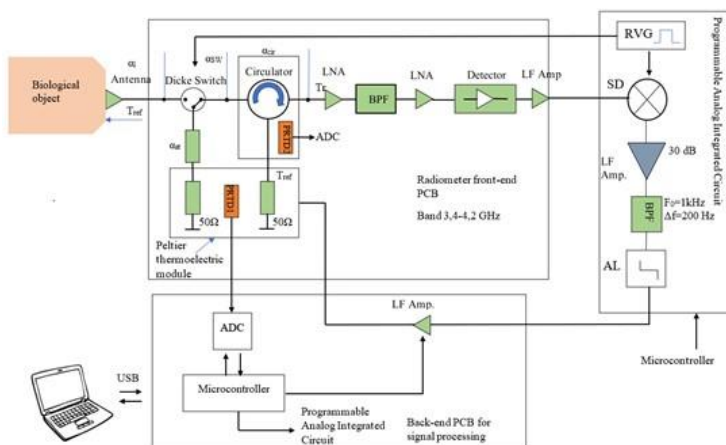


Рис. 3. Структурная схема миниатюрного радиометрического приемника: SD — synchronous detector, SA — selective amplifier; BPF — band-pass filter; RVG — reference voltage generator, PRTD — platinum resistance temperature sensor, LF amp — low frequency amplifier.

Fig. 3. Structural diagram of a miniature radiometric receiver: SD — synchronous detector, SA — selective amplifier; BPF — band-pass filter; RVG — reference voltage generator, PRTD — platinum resistance temperature sensor, LF amp — low frequency amplifier

1. Комплексное исследование помеховой обстановки, выбор метода подавления помех с последующей разработкой алгоритмов и программ обработки принимаемых радиометрических сигналов, обеспечивающих помехоустойчивость радиотермографа;

2. Исследование процессов тепловыделения и теплопередачи в глубине тела человека и разработка методики повышения точности определения радиоярких температур при 3D-визуализации температурных полей в процессе выявления злокачественных новообразований методом микроволновой радиотермометрии;

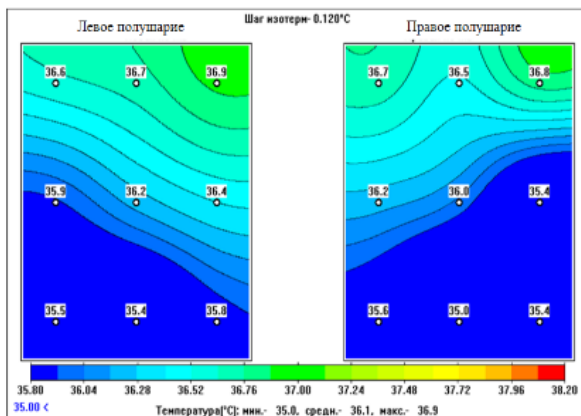


Рис. 4. Поле температуры головного мозга здорового мужчины.

Fig. 4. Temperature field of the brain of a healthy man

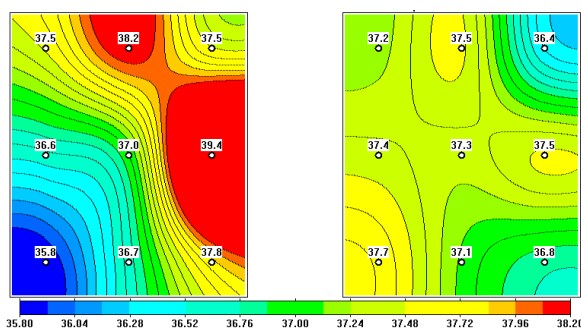


Рис. 5. Поле температуры мозга пациента с ишемическим инсультом.

Fig. 5. Temperature field of the brain of a patient with ischemic stroke

3. Исследование процессов тепловыделения в радиометрическом приемнике на основе МИС технологий, проведение теоретических и экспериментальных исследований по снижению энергопотребления радиометрических приемников на основе МИС, снижению собственных шумов, оценке динамического диапазона в условиях помех и выбор оптимальных схем построения и конструктивных решений.

К важнейшим ожидаемым результатам реализации проекта по первому направлению относятся: результат комплексных исследований на стенде помеховой обстановки с записью спектрограмм помех в частотных диапазонах радиотермометрии; разработанный алгоритм и программный модуль подавления помех при проведении радиотермометрических измерений; скорректированная программа 3D-визуализации температурных полей по глубине биологического объекта с интегрированием в нее модуля подавления помех.

К важнейшим ожидаемым результатам реализации проекта по второму направлению относятся: результат исследований влияния неоднородности диэлектрической проницаемости тканей человека, включая кожу, на точность измерения внутренней температуры; смоделированные процессы тепловыделения и теплопередачи в глубине тела человека при наличии злокачественных новообразований; разработанные методики повышения точности измерения радиоярких температур с помощью многоканального многочастотного радиотермографа на основе совершенствования методов калибровки с применением специального стенда; разработанный фантом злокачественного новообразования для измерения 3D-поля температур внутри тела человека методом микроволновой радиотермометрии; разработанный алгоритм восстановления термодинамической температуры на основе результатов измерения радиояркой температуры на нескольких частотах для построения 3D-поля температур внутри тела пациента; результат комплексных исследований с использованием фантома злокачественного новообразования и стенда, направленных на повышение точности измерения радиояркой температуры многоканального многочастотного радиотермографа на глубине.

К важнейшим ожидаемым результатам реализации проекта по третьему направлению относятся: результат исследования процессов тепловыделения в радиометрическом приемнике на основе МИС технологий; результат исследования влияния погрешностей изготовления на параметры транзисторов для монолитных интегральных схем СВЧ и выявление ключевых факторов, определяющих стабильность работы транзистора для МИС СВЧ в составе миниатюрного радиотермографа; результат численного моделирования перспективных транзисторных гетероструктур в системе широкозонных полупроводниковых материалов группы A^3B^5 для использования в составе активных элементов монолитных микроволновых интегральных схем (МИС СВЧ) энергоэффективного малошумящего усилителя; результат численного моделирования основных параметров малошумящего транзистора с низким потреблением для энергоэффективного усилителя в составе миниатюрного радиотермографа; создание экспериментального образца малошумящего транзистора.

Следует отметить, что даже при полученных сокращениях в размерах прибора тепловыделение сократилось незначительно: температура самого прибора повысилась до 40—50 °С. Это приводит к нагреву окружающих тканей и может исказить картину реального поля внутренних температур биообъекта. Наиболее значимым источником тепловыделения является малошумящие усилители, у которых потребление может достигать сотен милливатт при усилении 20 дБ. Другим значительным источников тепла в

миниатюрном радиометре является референсный источник шума, реализованный на базе согласованной нагрузки, установленной на элементе Пельтье. При высоком коэффициенте усиления петли обратной связи температура согласованной нагрузки в определенные моменты времени может достигать 55°C , что безусловно повышает общую температуру радиометра. Таким образом, для дальнейшей миниатюризации микроволновых радиотермометров необходимо разработка новых подходов к построению радиометров и разработки малошумящих усилителей с низким потреблением, которые обеспечат существенное снижения тепловыделения изделия.

К усилительному тракту радиотермографа традиционно предъявляются чрезвычайно высокие требования. Радиотермографы для медицинского применения имеют, кроме того, еще ряд особенностей (требования высокой миниатюрности; низкой стоимости; погрешности определения температуры тела, не превышающей десятые доли кельвина; рекордно низкого уровня собственных шумов в СВЧ диапазоне и пр.), что еще более ужесточает характеристики усилительного тракта [42—44]. Даже при использовании самых современных схемотехнических решений в области построения медицинских радиотермографов, которые решают многие проблемы предыдущих реализаций, в области требований к самому усилительному тракту не происходит радикального упрощения. Более того, при построении миниатюрного медицинского радиотермографа, возникают дополнительные ограничения.

Одним из существенных ограничений, связанных с наличием внешних активных помех, является требование к динамическому диапазону радиометрического приемника. Это связано с тем, что внешние помехи могут привести к перегрузке усилительных каскадов, возникновению перекрестных помех, и, в конечном счете, к существенным ошибкам измерения уровней собственного излучения тела человека. Известно, что при уменьшении тока потребления уменьшается динамический диапазон малошумящих усилителей, характеризующийся относительным уровнем интермодуляционных искажений (или точкой пересечения третьего порядка). Это приводит к необходимости поиска компромисса между уменьшением энергопотребления и уменьшением динамического диапазона. В рамках продолжения проекта планируется поиск оптимальных соотношений между указанными параметрами.

Низкий уровень принимаемых сигналов собственного излучения тела человека приводит к необходимости обеспечения коэффициента усиления приемного тракта порядка 80 дБ при минимальных уровнях собственных шумов. Построение такого тракта даже на самых современных монолитных МШУ производства ведущих мировых фирм требует нескольких

микросхем с общим потреблением тока в рабочем режиме порядка сотен миллиампер. Такое потребление тока усилительных каскадов в миниатюрном корпусе радиотермографа при существующим на сегодня КПД этих микросхем приводит к значительному повышению температуры внутри корпуса с находящимся там опорным источником шума. Это является значительной проблемой для конструкторов современных миниатюрных медицинских радиотермографов. Существующую проблему можно решить созданием новых активных элементов специализированных монолитных СВЧ микросхем — малощумящих транзисторов, для которых уже при проектировании гетероструктур будут учитываться требования высокой энергоэффективности, прежде всего низкого тепловыделения в окружающее пространство, малого уровня шумов и достаточного коэффициента усиления [45, 46].

Перспективной системой материалов для решения указанной выше задачи можно вполне обоснованно считать гетероструктуры полупроводников группы A^3B^5 . Накопленный авторами опыт успешного математического моделирования и практической реализации гетероструктурных СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов [47, 48] позволяет говорить об обоснованной вероятности успешного решения поставленной выше проблемы создания специального малощумящего СВЧ транзистора с пониженным тепловыделением.

3. Заключение

Таким образом, проведен анализ по решению фундаментальной научной задачи — разработке научных основ и методологии создания не имеющего аналогов в мире прототипа аппаратно-программного комплекса неинвазивного выявления и локализации патологий живых тканей человека на основе динамического радиотермокартирования, предназначенного для ранней диагностики онкологических заболеваний и мониторинга процессов их лечения, что внесет реальный вклад в решение проблемы разработки и организации производства прибора для персонализированной медицины.

Представленные новые подходы к разработке принципиально нового устройства — многоканального многочастотного радиотермографа на основе технологии МИС — требуют применения современного программного обеспечения и технологии монолитных интегральных схем СВЧ.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения соглашения № 19-19-00349-П.

Список литературы

1. Carr K. L. Microwave radiometry : Its importance to the detection of cancer // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1989ю Vol. 37, no. 12, P. 1862—1869.
2. Modern microwave thermometry for breast cancer. Journal of Molecular Imaging & Dynamics / S.Vesnin et al. 2017. URL: <https://www.longdom.org/open-access/modern-microwave-thermometry-for-breast-cancer-2155-9937-1000136.pdf>.
3. Passive microwave radiometry in biomedical studies / I. Goryanin et al. // Drug Discovery Today. 2020. Vol. 25(4). P. 757—763.
4. Noninvasive detection of increased carotid artery temperature in patients with coronary artery disease predicts major cardiovascular events at one year : Results from a prospective multicenter study // K. Toutouzas et al. // Atherosclerosis 2017. Vol. 262. P. 25—30.
5. The role of microwave radiometry in carotid artery disease. Diagnostic and clinical prospective / M. Drakopoulou et al. // Current Opinion in Pharmacology. 2018. Vol. 39. P. 99—104.
6. Real-time passive brain monitoring system using near-field microwave radiometry / E. Groumpas et al. // IEEE Trans. on Biomedical Engineering. 2019. Vol. 67, no.1. P. 158—165.
7. Kublanov V. S., Borisov V. I. Biophysical evaluation of microwave radiation for functional research of the human brain // Proc. IFMBE. 2017. P. 1045—1048.
8. Use of multichannel microwave radiometry for functional diagnostics of the brain / A. G. Gudkov et al. // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53, no.2. P. 108—111.
9. Diagnostic opportunities of noninvasive brain thermomonitoring / D.V. Cheboksarov et al. // Anesteziologiya i Reanimatologiya. 2015. Vol. 60 (1). P. 66—69.
10. Therapeutic Hypothermia Systems / O. A. Shevelev et al. // Biomed. Eng. 2021. Vol. 54. P. 397—401.
11. Microwave radiometry for noninvasive monitoring of brain temperature / D. B. Rodrigues et al. In : Emerging electromagnetic technologies for brain diseases diagnostics, monitoring and therapy. Springer, Cham, 2018. P. 87—127.
12. Joint microwave radiometry for inflammatory arthritis assessment / K. Laskari et al. // Rheumatology. 2020. Vol.59 (4). P. 839—844.
13. Ravi V. M., Sharma A. K., Arunachalam K. Pre-clinical testing of microwave radiometer and a pilot study on the screening inflammation of knee joints // Bioelectromagnetics. 2019. Vol. 40, no. 6. P. 402—411.
14. Detection of vesicoureteral reflux using microwave radiometry—system characterization with tissue phantoms / Arunachalam K. et al. // IEEE Transactions on biomedical engineering. 2011. Vol. 58, no. 6. P. 1629—1636.
15. Jacobsen S., Klemetsen Ø., Birkelund Y. Vesicoureteral reflux in young children: a study of radiometric thermometry as detection modality using an ex vivo porcine model // Physics in Medicine & Biology. 2012. Vol. 57, no. 17. P. 5557—5573.
16. Measurement of brown adipose tissue activity using microwave radiometry and 18F-FDG PET/CT / J. P. Crandall et al. // Journal of Nuclear Medicine. 2018. Vol. 59, no. 8. P. 1243—1248.
17. Andreev V. V., Barantsevich E. R. Treatment of acute and chronic pain syndromes in lumbosacral radiculopathy // Effect. Pharmacother. 2018. Vol. 4. P. 42—49.
18. Influence of Ambient Temperature on Recording of Skin and Deep Tissue Temperature in Region of Lumbar Spine / A. V. Tarakanov et al. // European Journal of Molecular & Clinical Medicine. 2020. Vol. 7(1). P. 21—26.
19. Microwave Radiometry (MWR) temperature measurement is related to symptom severity in patients with Low Back Pain (LBP) / A. V. Tarakanov et al. // Journal of Bodywork and Movement Therapies. 2021. Vol. 26. P. 548—552.

20. Passive Microwave Radiometry for the Diagnosis of Coronavirus Disease 2019 Lung Complications in Kyrgyzstan / B. Osmonov et al. // *Diagnostics*. 2021. No. 11(2). P. 259.
21. Momenroodaki P. Noninvasive internal body temperature tracking with near-field microwave radiometry // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2018. Vol. 66 (5). P. 2535—2545.
22. Stable microwave radiometry system for long term monitoring of deep tissue temperature / P. R. Stauffer et al. // *Proc. SPIE* 2013, P. 8584.
23. Wireless system for continuous monitoring of core body temperature / W. Haines et al. // *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. June 4–9, 2017, Honolulu, USA. 2017. P. 541—543.
24. Popovic Z., Momenroodaki P., Scheeler R. Toward wearable wireless thermometers for internal body temperature measurements // *IEEE Communications Magazine*. 2014. Vol. 52 (10). P. 118—125.
25. Momenroodaki P., Haines W., Popovic Z. Non-invasive microwave thermometry of multi-layer human tissues. In *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, June 4–9, 2017. Honolulu, USA. P. 1387—1390.
26. Ravi V. M., Arunachalam, K. A low noise stable radiometer front-end for passive microwave tissue thermometry // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 33(6). P. 743—758.
27. Maccarini P.F. et al. A novel compact microwave radiometric sensor to noninvasively track deep tissue thermal profiles. In *2015 European Microwave Conference (EuMC)*. 2015, pp. 690–693.
28. Functional link between distal vasodilation and sleep-onset latency? / K. Kräuchi et al. // *Amer. J. Physiol. – Reg., Integr. Comparative Physiol.* 2000. Vol. 278, no. 3, P. R741—R748.
29. Effects of light treatment on core body temperature in seasonal affective disorder / N. E. Rosenthal et al. // *Biol. Psychiatry*. 1990. Vol. 27, no. 1. P. 39—50.
30. Disruption of circadian rhythms accelerates development of diabetes through pancreatic beta-cell loss and dysfunction / J. E. Gale et al. // *J. Biol. Rhythms*. 2011. Vol. 26, no. 5. P. 423—433.
31. Circadian rhythms govern cardiac repolarization and arrhythmogenesis / D. Jeyaraj et al. // *Nature*. 2012. Vol. 483, no. 7387. P. 96—99.
32. Detection of extravasation of antineoplastic drugs by microwave radiometry / J. Shaeffer et al. // *Cancer Lett.* 1986. Vol. 31, no. 3. P. 285—291.
33. Jacobsen S., Stauffer P. R. Multifrequency radiometric determination of temperature profiles in a lossy homogeneous phantom using a dual-mode antenna with integral water bolus // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2002. Vol. 50, no. 7. P. 1737—1746.
34. Non-invasive temperature profiling using multi-frequency microwave radiometry in the presence of water-filled bolus / S. Mizushima et al. // *IEICE Trans. Electron.* 1991. Vol. 74, no. 5. P. 1293—1302.
35. Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling / J. W. Hand et al. // *Phys. Med. Biol.* 2001. Vol. 46, no. 7. P. 1885—1903.
36. Moran D. S., Mendal L. Core temperature measurement // *Sports Med.* 2002. Vol. 32, no. 14. P. 879—885.
37. Byrne C., Lim C. L. The ingestible telemetric body core temperature sensor : A review of validity and exercise applications // *Brit. J. Sports Med.* 2007. Vol. 41, no. 3. P. 126—133.
38. The effect of cool water ingestion on gastrointestinal pill temperature / D. M. Wilkinson et al. // *Med. Sci. Sports Exercise*. 2008. Vol. 40, no. 3. P. 523—528.

39. Accurate temperature imaging based on intermolecular coherences in magnetic resonance / G. Galiana et al. // *Science*. 2008. Vol. 322, no. 5900. P. 421—424.
40. Kraus J. D. *Radio Astronomy*, 2nd ed. Cygnus-Quasar Books, 1976, P. 1—3, 20—23, 66.
41. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. *Microwave Remote Sensing : Active and Passive*, Vol. 1 : *Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*. Artech House, 1981, P. 1—3, 20—24, 93—94, 112, 122—123.
42. Klemetsen O. Design and evaluation of a medical microwave radiometer for observing temperature gradients subcutaneously in the human body : PhD thesis. University of Tromso, faculty of science department of physics and technology. Tromso, 2011. 92 p.
43. Development of a miniature microwave radiothermograph for monitoring the internal brain temperature / M. Sedankin et al. // *Восточно- в ропейский журнал передовых технологий*. 2018. Т. 3(5). С. 26—36.
44. Chupina D. N., Sedankin M. K., Vesnin S. G. Application of modern technologies of mathematical simulation for the development of medical equipment. In 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). P. 1—5.
45. Gawande R., Bradley R. Low-Noise Amplifier at 2.45 GHz // *Microwave Magazine*. 2009. Vol 11. P. 122—126.
46. A ultrawideband 3–10 GHz low-noise amplifier MMIC using inductive-series peaking technique / Chia-Song Wu et al. // *Electric Information and Control Engineering IEEE*. 2020. Vol. 2. P. 5667—5670.
47. Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation / V. Tikhomirov et al. // *Semiconductors*. 2016. Vol. 50, no. 2. P. 244—248.
48. Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation / V G. Tikhomirov et al. // *Journal of Physics Conference Series*. 2019. Vol. 1410. Iss. 1. P. 012191.

Информация об авторах

Гудков Александр Григорьевич, профессор Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

Веснин Сергей Георгиевич, старший научный сотрудник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

Соловьев Юрий Владимирович, заместитель директора по науке АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Тихомиров Владимир Геннадьевич, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Попов Владимир Васильевич, президент ПАО «Светлана», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Prospects of Microminiaturization of Multichannel Multi-Frequency Radiothermographs

A. G. Gudkov¹, S. G. Vesnin¹, Yu. V. Solov'ev^{1,2},
V. G. Tikhomirov³, and V. V. Popov²

¹ Bauman Moscow State Technical University
5, 2nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation
chigikov95@mail.ru

² JSC "Svetlana-Electronpribor"
5, Prof. Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation

³ St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI»
27, Engels ave., St. Petersburg, 194156, Russian Federation

Received: May 20, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: This work is devoted to solving a fundamental scientific problem – the development of scientific foundations and methodology for creating a prototype of a hardware and software complex for noninvasive detection and localization of pathologies of living human tissues based on dynamic radiothermic mapping, designed for early diagnosis of oncological diseases and monitoring of their treatment processes, and can also be used in personalized medicine. The use of modern software and technology of monolithic integrated microwave circuits will allow us to apply new approaches to the development of a fundamentally new device – a multi-channel multi-frequency radiothermograph based on MIC technology.

Keywords: radiothermometry, radiothermograph, multi-channel, multi-frequency.

For citation (IEEE): A. G. Gudkov, S. G. Vesnin, Yu. V. Solov'ev, V. G. Tikhomirov, and V. V. Popov, "Prospects of Microminiaturization of Multichannel Multi-Frequency Radiothermographs," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 531–547, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.38. (In Russ.).

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation under agreement No. 19-19-00349-II.

References

- [1] K. L. Carr, "Microwave radiometry: its importance to the detection of cancer," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 37, no. 12, pp. 1862–1869, 1989, doi: 10.1109/22.44095.

- [2] S. Vesnin et al., “Modern microwave thermometry for breast cancer,” *Journal of Molecular Imaging & Dynamics*, 2017. URL: <https://www.longdom.org/open-access/modern-microwave-thermometry-for-breast-cancer-2155-9937-1000136.pdf>.
- [3] I. Goryanin et al., “Passive microwave radiometry in biomedical studies,” *Drug Discovery Today*, vol. 25, no. 4, pp. 757–763, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.drudis.2020.01.016.
- [4] K. Toutouzas et al., “Noninvasive detection of increased carotid artery temperature in patients with coronary artery disease predicts major cardiovascular events at one year: Results from a prospective multicenter study,” *Atherosclerosis*, vol. 262, pp. 25–30, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.atherosclerosis.2017.04.019.
- [5] M. Drakopoulou, C. Moldovan, K. Toutouzas, and D. Tousoulis, “The role of microwave radiometry in carotid artery disease. Diagnostic and clinical prospective,” *Current Opinion in Pharmacology*, vol. 39, pp. 99–104, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.coph.2018.02.008.
- [6] E. Groumpas, M. Koutsoupidou, I. S. Karanasiou, C. Papageorgiou, and N. Uzunoglu, “Real-Time Passive Brain Monitoring System Using Near-Field Microwave Radiometry,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 67, no. 1, pp. 158–165, Jan. 2020, doi: 10.1109/tbme.2019.2909994.
- [7] V. S. Kublanov & V. I. Borisov, “Biophysical evaluation of microwave radiation for functional research of the human brain”, in *Proc. IFMBE*, pp. 1045–1048, 2017.
- [8] A. G. Gudkov et al., “Use of Multichannel Microwave Radiometry for Functional Diagnostics of the Brain,” *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 108–111, Jul. 2019, doi: 10.1007/s10527-019-09887-z.
- [9] D. V. Cheboksarov et al., “Diagnostic opportunities of noninvasive brain thermomonitoring”, *Anesteziologiya i Reanimatologiya*, vol. 60 (1), pp. 66–69, 2015
- [10] O. A. Shevelev et al., “Therapeutic Hypothermia Systems,” *Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 6, pp. 397–401, Mar. 2021, doi: 10.1007/s10527-021-10048-4.
- [11] D. B. Rodrigues et al., “Microwave radiometry for noninvasive monitoring of brain temperature” in *Emerging electromagnetic technologies for brain diseases diagnostics, monitoring and therapy*, Springer, Cham, 2018.
- [12] K. Laskari et al., “Joint microwave radiometry for inflammatory arthritis assessment,” *Rheumatology*, vol. 59, no. 4, pp. 839–844, Sep. 2019, doi: 10.1093/rheumatology/kez373.
- [13] V. M. Ravi, A. K. Sharma, and K. Arunachalam, “Pre-Clinical Testing of Microwave Radiometer and a Pilot Study on the Screening Inflammation of Knee Joints,” *Bioelectromagnetics*, Jul. 2019, doi: 10.1002/bem.22203.
- [14] K. Arunachalam et al., “Detection of Vesicoureteral Reflux Using Microwave Radiometry—System Characterization With Tissue Phantoms,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 58, no. 6, pp. 1629–1636, Jun. 2011, doi: 10.1109/tbme.2011.2107515.
- [15] S. Jacobsen, Ø. Klemetsen, and Y. Birkelund, “Vesicoureteral reflux in young children: a study of radiometric thermometry as detection modality using an ex vivo porcine model”, *Physics in Medicine & Biology*, vol. 57, no. 17, p. 5557, 2012.
- [16] J. P. Crandall et al., “Measurement of Brown Adipose Tissue Activity Using Microwave Radiometry and 18F-FDG PET/CT,” *Journal of Nuclear Medicine*, vol. 59, no. 8, pp. 1243–1248, Feb. 2018, doi: 10.2967/jnumed.117.204339.
- [17] V. V. Andreev, and E. R. Barantsevich, “Treatment of acute and chronic pain syndromes in lumbosacral radiculopathy,” *Effect. Pharmacother.*, vol. 4, pp. 42–49, 2018.
- [18] A. V. Tarakanov et al., “Influence of Ambient Temperature on Recording of Skin and Deep Tissue Temperature in Region of Lumbar Spine,” *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, vol. 7(1), pp. 21–26, 2020.

- [19] A. V. Tarakanov, A. A. Tarakanov, S. Vesnin, V. V. Efremov, I. Goryanin, and N. Roberts, "Microwave Radiometry (MWR) temperature measurement is related to symptom severity in patients with Low Back Pain (LBP)," *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, vol. 26, pp. 548–552, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jbmt.2021.02.005.
- [20] B. Osmonov et al., "Passive Microwave Radiometry for the Diagnosis of Coronavirus Disease 2019 Lung Complications in Kyrgyzstan," *Diagnostics*, vol. 11, no. 2, p. 259, Feb. 2021, doi: 10.3390/diagnostics11020259.
- [21] P. Momenroodaki, W. Haines, M. Fromandi, and Z. Popovic, "Noninvasive Internal Body Temperature Tracking With Near-Field Microwave Radiometry," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 5, pp. 2535–2545, May 2018, doi: 10.1109/tmtt.2017.2776952.
- [22] P. R. Stauffer et al., "Stable microwave radiometry system for long term monitoring of deep tissue temperature" *Energy-based Treatment of Tissue and Assessment VII. – International Society for Optics and Photonics*, vol. 8584, p. 85840R, 2013.
- [23] W. Haines et al., "Wireless system for continuous monitoring of core body temperature", in *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, USA, June 4–9, 2017.
- [24] Z. Popovic, P. Momenroodaki, and R. Scheeler, "Toward wearable wireless thermometers for internal body temperature measurements," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 10, pp. 118–125, Oct. 2014, doi: 10.1109/mcom.2014.6917412.
- [25] P. Momenroodaki, W. Haines, Z. Popovic, "Non-invasive microwave thermometry of multi-layer human tissues" in *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, USA, June 4–9, 2017.
- [26] V. M. Ravi, and K. Arunachalam, "A low noise stable radiometer front-end for passive microwave tissue thermometry," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 33(6), pp. 743–758, 2019.
- [27] P. F. Maccarini et al., "A novel compact microwave radiometric sensor to noninvasively track deep tissue thermal profiles," in *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 690–693, 2015.
- [28] K. Kräuchi et al., "Functional link between distal vasodilation and sleep-onset latency?" *Amer. J. Physiol. — Reg., Integr. Comparative Physiol.*, 2000, vol. 278, no. 3, pp. R741–R748.
- [29] N. E. Rosenthal et al., "Effects of light treatment on core body temperature in seasonal affective disorder," *Biological Psychiatry*, vol. 27, no. 1, pp. 39–50, Jan. 1990, doi: 10.1016/0006-3223(90)90018-w.
- [30] J. E. Gale, H. I. Cox, J. Qian, G. D. Block, C. S. Colwell, and A. V. Matveyenko, "Disruption of Circadian Rhythms Accelerates Development of Diabetes through Pancreatic Beta-Cell Loss and Dysfunction," *Journal of Biological Rhythms*, vol. 26, no. 5, pp. 423–433, Sep. 2011, doi: 10.1177/0748730411416341.
- [31] D. Jeyaraj et al., "Circadian rhythms govern cardiac repolarization and arrhythmogenesis," *Nature*, vol. 483, no. 7387, pp. 96–99, Feb. 2012, doi: 10.1038/nature10852.
- [32] J. Shaeffer, A. M. El-Mahdi, A. E. Hamwey, and K. L. Carr, "Detection of extravasation of antineoplastic drugs by microwave radiometry," *Cancer Letters*, vol. 31, no. 3, pp. 285–291, Jun. 1986, doi: 10.1016/0304-3835(86)90149-7.
- [33] S. Jacobsen and P. R. Stauffer, "Multifrequency radiometric determination of temperature profiles in a lossy homogeneous phantom using a dual-mode antenna with integral water bolus," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 7, pp. 1737–1746, Jul. 2002, doi: 10.1109/tmtt.2002.800424.

- [34] S. Mizushina et al., “Non-invasive temperature profiling using multi-frequency microwave radiometry in the presence of water-filled bolus,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. 74, no. 5, pp. 1293–1302, May 1991.
- [35] J. W. Hand et al., “Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 46, no. 7, pp. 1885–1903, Jun. 2001, doi: 10.1088/0031-9155/46/7/311.
- [36] D. S. Moran and L. Mendal, “Core Temperature Measurement,” *Sports Medicine*, vol. 32, no. 14, pp. 879–885, 2002, doi: 10.2165/00007256-200232140-00001.
- [37] C. Byrne and C. L. Lim, “The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications,” *British Journal of Sports Medicine*, vol. 41, no. 3, pp. 126–133, Mar. 2007, doi: 10.1136/bjsm.2006.026344.
- [38] D. M. Wilkinson, J. M. Carter, V. L. Richmond, S. D. Blacker, and M. P. RAYSON, “The Effect of Cool Water Ingestion on Gastrointestinal Pill Temperature,” *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 40, no. 3, pp. 523–528, Mar. 2008, doi: 10.1249/mss.0b013e31815cc43e.
- [39] G. Galiana, R. T. Branca, E. R. Jenista, and W. S. Warren, “Accurate Temperature Imaging Based on Intermolecular Coherences in Magnetic Resonance,” *Science*, vol. 322, no. 5900, pp. 421–424, Oct. 2008, doi: 10.1126/science.1163242.
- [40] J. D. Kraus, *Radio Astronomy*, 2nd ed. Cygnus-Quasar Books, 1976.
- [41] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume 1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*, Artech House, 1981.
- [42] O. Klemetsen, *Design and evaluation of a medical microwave radiometer for observing temperature gradients subcutaneously in the human body*: PhD thesis. University of Tromsø, faculty of science department of physics and technology, Tromsø, 2011.
- [43] M. Sedankin, D. Chupina, S. Vesnin, I. Nelin, and V. Skuratov, “Development of a miniature microwave radiothermograph for monitoring the internal brain temperature,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 5 (93), pp. 26–36, Jun. 2018, doi: 10.15587/1729-4061.2018.134130.
- [44] D. N. Chupina, M. K. Sedankin, S. G. Vesnin, “Application of modern technologies of mathematical simulation for the development of medical equipment,” in *2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, p. 1–5, 2017.
- [45] R. Gawande and R. Bradley, “Low-Noise Amplifier at 2.45 GHz [TC Contests],” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 122–126, Feb. 2010, doi: 10.1109/mmm.2009.935619.
- [46] Chia-Song Wu, Tahyeong Lin, Chien-Huang Chang, and Hsien-Ming Wu, “A ultrawide-band 3–10 GHz low-noise amplifier MMIC using inductive-series peaking technique,” *Electric Information and Control Engineering*, vol. 2, pp. 5667–5670, 2020.
- [47] V. G. Tikhomirov et al., “Optimization of the parameters of HEMT GaN/AlN/AlGaIn heterostructures for microwave transistors using numerical simulation,” *Semiconductors*, vol. 50, no. 2, pp. 244–248, Feb. 2016, doi: 10.1134/s1063782616020263.
- [48] V. G. Tikhomirov, A. G. Gudkov, S. V. Agasieva, D. D. Dynaiev, M. K. Popov, and S. V. Chizhikov, “Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1410, no. 1, p. 012191, Dec. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1410/1/012191.

Information about the authors

Alexander G. Gudkov, professor at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Sergey G. Vesnin, senior researcher at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Yuriy V. Solov'ev, Deputy Director for Science at JSC «Svetlana-Electronpribor», Saint Petersburg, Russian Federation.

Vladimir G. Tikhomirov, associate Professor at Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russian Federation.

Vladimir V. Popov, president at PJSC «Svetlana», Saint Petersburg, Russian Federation.

Радиационно-стойкие СБИС СнК и ОЗУ — особенности проектирования по КМОП технологиям объемного кремния

Герасимов Ю. М., Петричкович Я. Я.

*АО НПП «Электронные вычислительно-информационные системы» («ЭЛВИС»)
ул. Конструктора Лукина, д. 14, стр.14, муницип. округ Силино,
Москва, г. Зеленоград, 124460, Российская Федерация
YGerasimov@elvees.com, ymger29@mail.ru*

Получено: 19 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Проанализировано влияние различных видов излучения и тяжелых ядерных частиц (ТЧ) на СБИС, изготавливаемых по КМОП технологиям объемного кремния (ОК) уровня 250—90 нм. Разработаны и аттестованы на тестовых кристаллах (ТК) конструктивно-топологические и схемотехнические решения элементов цифровых библиотек, сложно-функциональных (СФ) блоков ОЗУ и периферийных блоков смешанного сигнала для проектирования радиационно-стойких СБИС типа «система-на-кристалле» (СнК) и ОЗУ категории РС2 (изделия с повышенным уровнем радиационной стойкости). Получила дальнейшее развития методология радиационно-стойкого проектирования (РСП). Для средств САПР создана среда проектирования СБИС категории РС2 для изготовления на российских фабриках по доступным КМОП технологиям ОК. На основе данной среды проектирования созданы конкурентоспособные радиационно-стойкие высокопроизводительные процессорные КМОП СБИС СнК и СБИС ОЗУ. Базовые технические решения защищены патентами РФ.

Ключевые слова: объемный кремний, эффект «защелкивания», радиационная стойкость, радиационно-стойкое проектирование, сложно-функциональный блок, СБИС «система-на-кристалле», СБИС ОЗУ, тяжелые ядерные частицы.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Герасимов Ю. М., Петричкович Я. Я. Радиационно-стойкие СБИС СнК и ОЗУ — особенности проектирования по КМОП технологиям объемного кремния // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 4. С. 548—569.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Герасимов, Ю. М. Радиационно-стойкие СБИС СнК и ОЗУ — особенности проектирования по КМОП технологиям объемного кремния / Ю. М. Герасимов, Я. Я. Петричкович // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 548—569.

1. Введение

Высокопроизводительные радиационно-стойкие процессорные КМОП СБИС СнК и ОЗУ категории PC2 [1] широко востребованы для нужд авионики, аэрокосмической отрасли, атомных энергетических установок и других гражданских применений. Спрос на такие СБИС неуклонно растет. Проведенные в АО НПЦ «ЭЛВИС» в течение последних 30 лет исследования и разработки показали, что КМОП технологии объемного кремния (ОК) с нанометровыми проектными нормами $\chi \leq 250$ нм и толщиной подзатворного окисла $t_{ок} \leq 6$ нм (далее нано-СБИС) обеспечивают достижение требований данной категории PC2, являются наиболее дешевыми, технологичными и доступны в России.

«Радиационная стойкость (РС) — это свойство изделия сохранять работоспособность в процессе и после воздействия радиационных факторов с нормированными характеристиками [1]».

Категория PC2 это «Изделия с повышенным уровнем РС — требования РС соответствуют группам 3Ус—4Ус и являются приоритетными для потребителя. Катастрофические отказы изделий в процессе и после радиационного воздействия не допускаются, но возможно наличие у них кратковременных сбоев. При создании изделий используются базовые технологические процессы с применением специальных конструктивно-топологических и схмотехнических решений по обеспечению РС» [1].

Проектирование таких СБИС возможно для изготовления по стандартным КМОП технологиям ОК и производится по особым правилам на основе специальных библиотек элементов и СФ-блоков, разрабатываемых с использованием методологии радиационно-стойкого проектирования (РСП) [2—4], основанной на имеющихся представлениях о физической природе (моделях) радиационных эффектов в приборах и элементах КМОП СБИС [4—6], а также на результатах многочисленных экспериментальных исследований специальных тестовых структур и кристаллов [7].

2. Радиационные эффекты в КМОП нано-СБИС СнК ОК

Современные КМОП нано-СБИС СнК, кроме обязательных процессорных ядер, синтезируемых, как правило, на основе библиотеки стандартных цифровых элементов (БЭ), содержат также большое число компилируемых СФ-блоков памяти различных типов, площадь которых в ряде СБИС СнК составляет более 70 % площади ядра кристалла (рис. 1). По периферии кристалла располагаются интерфейсные СФ-блоки смешанного сигнала, работающие с различной частотой передачи данных. К таким блокам, в частности, относятся синтезаторы частот на основе ФАПЧ (PLL),

высокоскоростные приемопередатчики последовательных каналов мультипротокольных портов *SpaceFibre* и *gigaSpaceWire (RUS)* и др.

При воздействии ионизирующих излучений различной интенсивности и тяжелых ядерных частиц различных типов (ТЧ) в КМОП СБИС ОК проявляются следующие нарушения работоспособности [4—6].

1. «Защелкивание» паразитных тиристорных *p-n-p-n* структур (*SEL*) при воздействии ТЧ, приводящее к существенному возрастанию тока потребления и, как следствие, к катастрофическим отказам. Этот эффект достаточно подробно исследован в литературе [4—6]. При уменьшении проектных норм данный эффект несколько ослабевает, однако, в нано-СБИС ОК он все еще наблюдается.

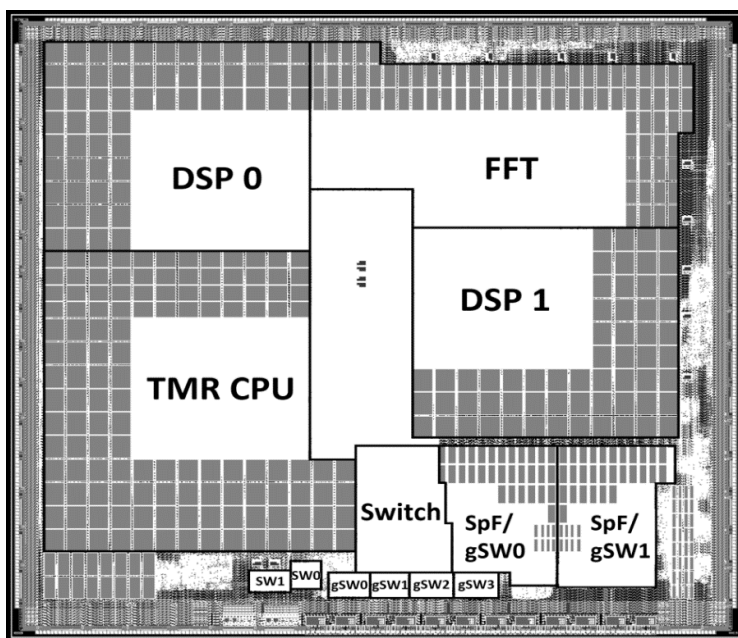


Рис. 1. Сигнальный микропроцессор 1892BM15AФ категории PC2:
Объемный кремний — 180 нм, $S_{кр} = 17,5 \times 17,5 \text{ мм}^2$, $N_{mp} \approx 60 \text{ млн.}$

Fig. 1. Signal microprocessor 1892BM15AФ category radiation tolerant:
Bulk silicon — 180 nm, $S_{кр} = 17.5 \times 17.5 \text{ мм}^2$, $N_{mp} \approx 60 \text{ million}$

2. При воздействии стационарного ионизирующего излучения нарушение работоспособности КМОП нано-СБИС определяется исключительно допустимыми суммарными собственными статическими и динамическими токами потребления, а также радиационными токами утечки паразитных *n*-МОП транзисторных структур [2—4].

Существенный рост общего энергопотребления выше допустимого в высоко интегрированных СБИС связан с накоплением положительного заряда в толстых окислах паразитных n -МОП транзисторных структур [3, 4]. В ряде случаев это может приводить к нарушению функционирования из-за просадки напряжения питания (*IR-drop*) внутри СБИС. Нарушение функционирования СБИС при облучении, как правило, — низкое качество проектирования.

Следует особо отметить, что в подзатворном окисле приборных МОП транзисторов накопления заряда и образования поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник и связанных с этим изменений их электрических параметров не происходит. Поэтому отсутствует изменение параметров элементов СБИС и параметрическое и/или функциональное нарушение их работоспособности.

3. Усиление влияния одиночных событий при воздействии ТЧ на работоспособность СБИС, наличие одиночных и множественных сбоев. Проблема повышения сбоеустойчивости (уменьшение частоты сбоев) в быстродействующих КМОП нано-СБИС ОК с использованием методов РСР в настоящее время выдвигается на передний план.

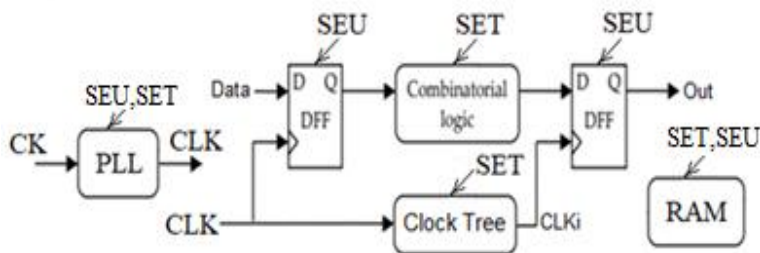


Рис. 2. Виды сбоев в конвейере передачи данных СБИС СнК.

Fig. 2. Types of failures in the data transmission pipeline of VLSI SoC

На рис. 2 приведена обобщенная структурная схема СБИС СнК в виде конвейера передачи данных в процессорных ядрах, блоков памяти (RAM) и синтезатора тактовых частот на основе ФАПЧ (PLL) с деревом синхронизации (*Clock Tree*), которые в настоящее время являются обязательными блоками современных СБИС СнК. Синтезаторы частот типа PLL являются также основным блоком в составе интерфейсов DDR2/3, *SpaceWire* и др.

В современных нано-СБИС СнК плотно упакованные СФ-блоки памяти занимают большую часть площади ядра кристалла — до 70 % (рис. 1) и в значительной мере определяют ее параметры РС.

При воздействии ТЧ в элементах и блоках СБИС наблюдаются следующие виды сбоев (рис. 2, 3) [6]:

SEU — частотно-независимые сбои в ячейках памяти (ЯП) ОЗУ и элементах последовательностной логики — триггерах-защелках;

SET — частотно-зависимые помехи («иголки») в быстродействующих критических логических (комбинационных) трактах и трактах синхронизации.

В низкочастотных трактах СБИС преобладают сбои в ячейках памяти, в высокоскоростных СБИС — сбои в логических цепях и трактах синхронизации (рис. 3).

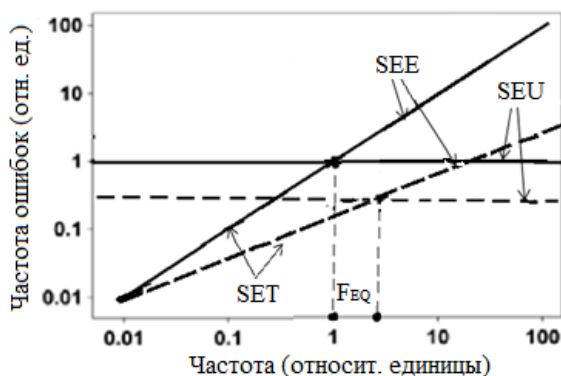


Рис. 3. Зависимость частоты сбоев (*SEE*) от рабочей частоты: пунктир — результат уменьшения частоты сбоев при радиационно-стойком проектировании.

Fig. 3. Dependence of the failure rate (*SEE*) on the operating frequency: dotted line is the result of reducing the failure rate in radiation-hardened design

3. Ослабление радиационных эффектов

В [2—4] рассмотрены методы РСП, применяемые при создании элементов библиотек и СФ-блоков ОЗУ для проектирования РС КМОП нано-СБИС ОК. Использование оптимальной совокупности этих методов позволяет добиться высоких показателей радиационной стойкости не хуже категории РС2 без существенного ухудшения потребительских характеристик. Стиль проектирования зависит от особенностей технологии изготовления, типа блока и степени его интеграции.

Отсутствие эффекта «защелкивания» (катастрофического отказа) обязательно для всех элементов и блоков в составе СБИС. Дозовые эффекты, в частности, утечки паразитных структур принципиальны для элементов и блоков, занимающих основную часть активной площади кристалла:

память и процессоры, а также некоторые прецизионные аналоговые блоки. Сбои при воздействии ТЧ принципиальны для триггеров и СФ-блоков ОЗУ, цепей синхронизации и ряда управляющих блоков СБИС.

Наиболее эффективным общим методом РСП для ослабления отмеченных выше радиационных эффектов, является применение «жестких» p^+ охраны в p -подложке и n^+ охраны в n -«карманах» с максимально возможным числом контактов к шинам земли и питания, а также контактов между областями n -well – n^+ и $n^+ - n^+$ [2—4]. Оптимальное расположение областей охраны и контактов к ним позволяет повысить порог «защелкивания» элементов в большинстве случаев без существенного увеличения площади элементов на кристалле, снизить токи утечки паразитных структур, повысить их сбоеустойчивость.

На рис. 6. приведены известные в настоящее время конструктивно-топологические решения библиотечных элементов, где показаны области внутритранзисторных и межтранзисторных утечек n -МОП транзисторов в инверторе в состоянии лог. «0» на входе после облучения в состоянии лог. «1» [2].

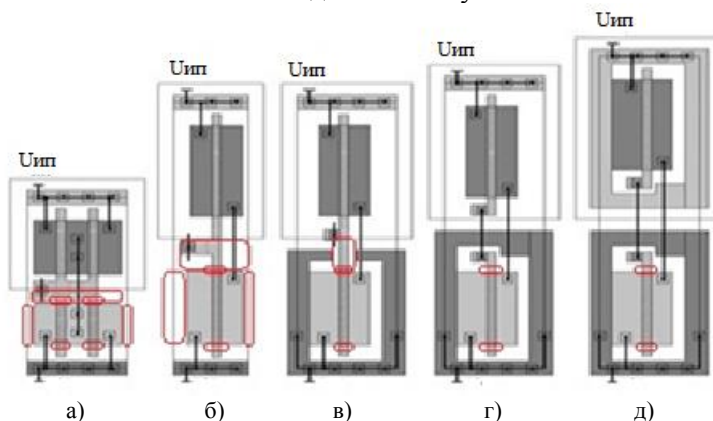


Рис. 4. Варианты конструкции КМОП элементов на ОК:
 а), б) — коммерческие; в), г), д) — радиационно-стойкие.

Fig. 4. Design options for CMOS elements based on bulk silicon:
 а), б) – commercial; в), г), д) – radiation-hardened

Коммерческие варианты а) и б) занимают наименьшую площадь на кристалле, однако они не всегда пригодны для РС применений из-за значительных утечек при воздействии ионизирующих излучений и возможного «защелкивания» паразитных p - n - p - n структур при воздействии ТЧ. Для РС применений компромиссным является вариант в), в котором межтранзисторная утечка $n^+ - n$ -карман значительно меньше внутритранзисторной, а утечки $n^+ - n^+$ отсутствуют [8].

На рис.5 приведен вариант конструкции двух смежных логических элементов в состояниях лог. «0» и лог. «1» соответственно, где показаны внутритранзисторные (а, б) и межтранзисторные (в) утечки. В настоящее время для СБИС категории РС2 при воздействии ТЧ наиболее эффективно использование данной конструкции (вариант в) на рис. 4), где может быть достигнут минимально требуемый для категории РС2 уровень стойкости по эффекту «защелкивания» $LET_0 \geq 60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$. При достижении уровня $LET_0 \geq 99 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ СБИС считают не чувствительными к этому эффекту (*Immune Latchup* — IL).

Дозовая стойкость СБИС СнК зависит от большого числа факторов [2, 3] и, в первую очередь, от состава элементов ее высоко интегрированного ядра: числа библиотечных элементов в нерегулярной процессорной части ($N_{\text{биб}}$) и емкости ОЗУ ($N_{\text{бум}}$), а также от электрического режима их работы.

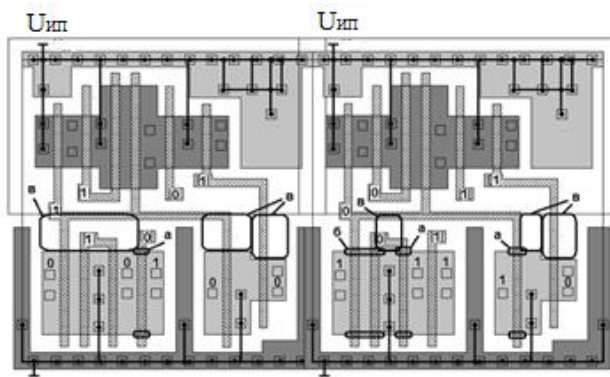


Рис. 5. Вариант базовой конструкции радиационной стойкости библиотечных элементов [8].

Fig. 5. Variant of the basic design of the radiation hardened of library elements [8]

На рис. 6 приведены типовые электрические режимы работы паразитных n -МОП транзисторов в реальных схемах [2, 4]. Режимы 2 и 4 используются в инверторах и простейших логических элементах, режимы 1, 3, 4, 6 — в двунаправленных ключах, режим 5, в котором протекает сквозной ток через транзистор, практически не используется.

Критерием дозовой РС для СБИС, как правило, выступает максимальный суммарный ток потребления — $I_{\text{СБИС}}^{\text{макс}}$. Суммарная величина этого тока утечки существенно зависит как от ширин областей $n^+ - n^+$, $n^+ - n\text{-well}$ и расстояний между ними, так и от общего числа n -МОП транзисторов в элементе. Число возможных комбинаций режимов облучения и измерения тока утечки m -входного логического элемента равно 2^m , а общее число режимов исследования $i = 2^{2m}$. Наихудшим является случай, когда

при облучении на затвор n -МОП транзистора подается лог. «1» (режимы 4, 5 на рис. 6), а ток утечки измеряется при его переключении в состояние лог. «0» (режим 2) [4]. Ток утечки минимален при облучении и измерении в одинаковых режимах.

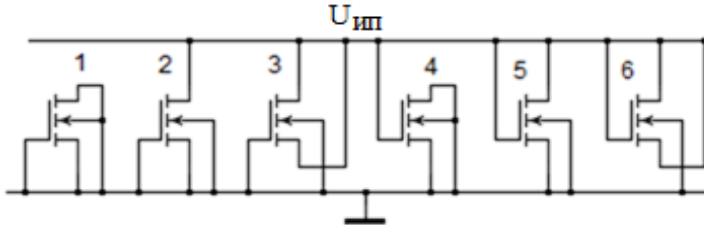


Рис. 6. Типовые режимы работы n -МОП транзистора.

Fig. 6. Typical modes of operation of the n -MOS transistor

Для каждого из этих режимов суммарную утечку элемента можно представить в следующем виде:

$$I_{\Sigma}^i = I_{nn}^i \times W_{nn} / L_n + I_{nw}^i \times W_{nw} / L_w + 2I_t^i \times (N_{par} + 2N_{seq} / k_j), \quad (1)$$

где

I_t^i , I_{nn}^i , I_{nw}^i , — удельные «внутриприборные» и «межприборные» токи утечки паразитных структур, W_{nn} , W_{nw} , L_n , L_w — эффективные ширины и длины «канала» паразитных транзисторных структур;

N_{par} , — число отдельных и параллельно соединенных n -МОП транзисторов в элементе;

N_{seq} — число последовательных групп транзисторов в элементе;

k_j — число последовательно соединенных транзисторов в j группе.

Для характеристики многовходовых и многокаскадных элементов библиотек по этим токам достаточно определять утечки при двух комбинациях входных сигналов: при облучении на входах все лог. «1» и все лог. «0», а при измерении переключать входные сигналы в противоположное состояние, при этом взять среднее значение. Наиболее корректно параметры, входящие в (1), определяются по результатам исследования специальных тестовых кристаллов [7]:

$$I_{СБИС}^{\max} \approx N_{\text{биб}} \times I_{\text{биб}}^{\max} + N_{\text{бит}} \times I_{\text{бит}}^{\max},$$

где $I_{\text{биб}}^{\max}$, $I_{\text{бит}}^{\max}$ — усредненные максимальные удельные токи потребления на один библиотечный элемент и/или бит. Например, при максимально допустимом увеличении статического тока потребления в СФ-блоке до 100 мА и числе элементов в нем 100 млн., допустимое увеличение удельного

тока потребления составляет не более $I_{\text{бнб}} \approx 1$ нА/элемент для цифровых блоков. Для блоков памяти при их суммарной емкости на кристалле 64 Мбит $I_{\text{бит}} \approx 1,56$ нА/бит, что значительно меньше рабочих токов элементов.

В табл. 1 приведены результаты измерения удельных токов утечки после облучения одно- и двухпортовых ячеек памяти (ЯП) на тестовом кристалле (ТК), где: № 1, 2 — коммерческие ЯП и № 3—5 — собственные радиационно-стойкие, разработанные с использованием методологии РСП. Вариант № 5 использует кольцевые (КТ) n -МОП транзисторы [4].

Приведенные в табл. 1 результаты позволяют заключить, что разработанные радиационно-стойкие ЯП с транзисторами прямоугольной конфигурации, использующие оригинальные конструктивно-топологические решения, позволяют уменьшить удельный ток потребления на 2—3 порядка, а при использовании кольцевых транзисторов — до 6—7 порядков. К сожалению, в технологиях уровня ниже 130 нм использование транзисторов такой конфигурации не допускается.

Таблица 1 — Table 1

№ п/п	Тип ячейки памяти на ТК	Относительная площадь ЯП	Ток утечки после 128 крад, $I_{\text{бит}}$, нА/бит
1.	Коммерческий 1-port $6T_n$	S_0	64
2.	Коммерческий 2-port $8T_n$	$2,38 \cdot S_0$	27
3.	Стойкий 1-port $6T_n$ РСП	$1,54 \cdot S_0$	0,043
4.	Стойкий 2-port $8T_n$ РСП	$2,19 \cdot S_0!$	0,082
5.	Стойкий 1-port $8T_p$ КТ РСП	$3,06 \cdot S_0$	$< 0,00002!$

3. Моделирование сбоев в элементах СБИС

При попадании ТЧ в чувствительные области стока n -МОП или p -МОП транзистора возникает ионизационный фототок в этих областях (рис. 7), который может приводить к сбоям в логических цепях (SET) или переключению триггеров и ячеек памяти ОЗУ в противоположное состояние (SEU). Зависимость ионизационного фототока от времени описывается следующим выражением [9—12]:

$$I_{SEE}(t) = I_0 \left(\exp(-t/\tau_{\text{сп}}) - \exp(-t/\tau_{\text{фр}}) \right), \quad (2)$$

где $\tau_{\text{фр}}$ — определяется дрейфовыми процессами собирания носителей в обедненной области p - n перехода и на некотором расстоянии от него, $\tau_{\text{сп}}$ — определяется диффузионными процессами собирания носителей, $I_0 = Q_{\text{част}}/(\tau_{\text{сп}} - \tau_{\text{фр}})$, где $Q_{\text{част}}$ — заряд, создаваемый частицей в чувствитель-

ном объеме. В первом приближении при $\tau_{\text{сп}} \gg \tau_{\text{фр}}$ можно считать $Q_{\text{част}} \approx I_0 \times \tau_{\text{сп}}$. Функция (2) имеет экстремум при

$$I_{\text{макс}} = I_0 \times (\alpha^{\alpha/(1-\alpha)} - \alpha^{1/(1-\alpha)}), t_{\text{макс}} = \alpha \times \ln \alpha / (\alpha - 1), \alpha = \tau_{\text{фр}} / \tau_{\text{сп}},$$

Например, при $\alpha = 0,1$ — $I_{\text{макс}} = 0,70 \cdot I_0$, при $\alpha = 0,2$ — $I_{\text{макс}} = 0,54 \cdot I_0$. В соответствии с рис. 7 для КМОП технологии ОК уровня 180 нм при $LET_0 \approx 25 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ можно считать что: $I_{\text{макс}} \approx 0,5 \text{ мА}$, $t_{\text{макс}} \approx 100 \text{ пс}$, $\tau_{\text{фр}} = 50 \text{ пс}$, $\tau_{\text{сп}} = 500 \text{ пс}$, а $I_0 \approx 0,7 \text{ мА}$.

Для наличия сбоя в элементе при воздействии ТЧ заряд от частицы, выделяемый в чувствительном узле, должен превышать критический:

$$Q_{\text{част}} > Q_{\text{крит}} \approx C_{\text{узел}} \times U_{\text{ип}} + I_{\text{хр}} \times t_{\text{пер}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{узел}}$ — суммарная нагрузочная емкость в узле элемента, $U_{\text{ип}}$ — напряжение питания, $I_{\text{хр}}$ — ток транзистора в элементе, поддерживающий потенциал в узле и зависящий от напряжения на входе элемента, $t_{\text{пер}}$ — время переключения элемента в противоположное логическое состояние.

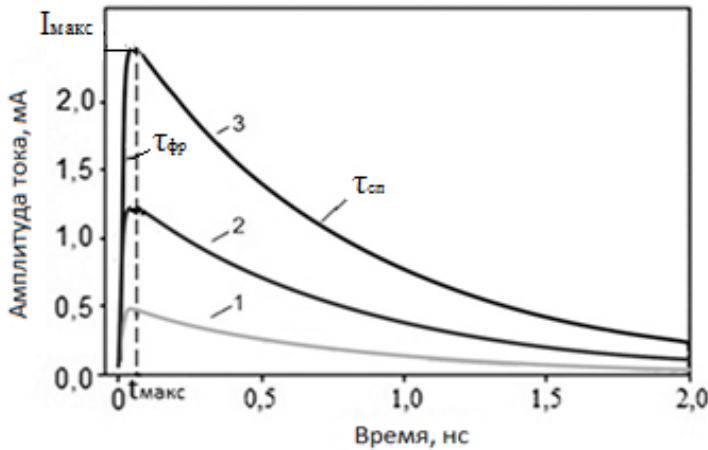


Рис. 7. Модель токового воздействия в чувствительных узлах [11] при различных LET_0 (в $\text{МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$): 1 — $LET_0 = 25$, 2 — $LET_0 = 50$, 3 — $LET_0 = 100$.

Fig. 7. Model of current action in sensitive nodes [11] at different LET_0 (in $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$): 1 — $LET_0 = 25$, 2 — $LET_0 = 50$, 3 — $LET_0 = 100$

Параметры, входящие в (2, 3), зависят не только от энергии частицы и особенностей технологии изготовления, но также и от схемотехники и конструктивного-топологического исполнения элементов в критических трактах СБИС. Корректно рассчитать величину ионизационного фототока

Любую логическую цепь с разветвлениями можно представить в виде цепочки эквивалентных инверторов (рис. 9) с собственными параметрами: t_d — собственная задержка элемента, m_i — коэффициент разветвления на входе, n_i — коэффициент объединения по выходу, P_i — коэффициент мощности элемента (его размеры $\sim W_p + W_n$) [13]. Оптимальной по быстродействию является равномерная логическая цепь — цепь, в которой абсолютные размеры эквивалентных инверторов (P_i) возрастают в геометрической прогрессии с постоянным коэффициентом нагрузки $M_0 = \sqrt[n]{M_L}$, причем «критическим» считается наиболее длинный и нагруженный тракт с $M_L \approx (C_H/C_{вх0}) \times \prod_1^n m_i$.

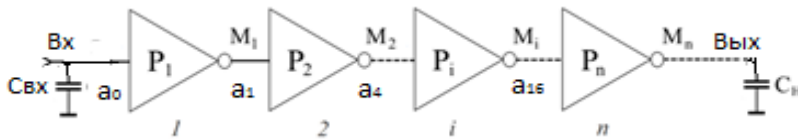


Рис. 9. Цепочка эквивалентных инверторов: a_0 — вход цепи, $a_1 - a_n$ — внутренние узлы цепи.

Fig. 9. A chain of equivalent inverters: a_0 is the input of the circuit, $a_1 - a_n$ are the internal nodes of the circuit

В зависимости от длительности импульса помехи при воздействии ТЧ и параметров цепи она может быть формирующей или затухающей. Граничной длительностью импульса помехи, передаваемой цепочкой инверторов без искажений, можно считать:

$$t_{мин} \approx 3t_{a0} \times (\gamma_{вх0} + \gamma_{вх0} \times M_0),$$

где t_{a0} — средняя асимптотическая задержка, $\gamma_{вх0}$ и $\gamma_{вх0}$ — коэффициенты, зависящие от соотношения входной и выходной емкостей элемента [13].

Оптимизация размеров элементов в логической цепи по сбоеустойчивости сводится к правильному выбору соотношения эквивалентных размеров групп p -МОП и n -МОП транзисторов (W_p/W_n) в элементах, размера первого каскада (P_1) и коэффициента нагрузки в критическом тракте (M_0).

С целью проверки эффективности влияния абсолютных (P_i) и относительных (β) размеров транзисторов в инверторе на его сбоеустойчивость в однородной цепочке проведено моделирование схемы на рис. 9 на основе программы *Spectre* с параметрами транзисторов для базовой КМОП технологии ОК уровня 90 нм ($f_{пред} \approx 10$ ГГц) при различных значениях этих параметров. В табл. 2 приведены значения максимальных рабочих токов транзисторов I_n , I_p и токов сбоя $I_{макс}$ для инвертора ($U_{вх}$ постоянно) и триггера ($U_{вх}$ изменяется при воздействии ТЧ) для состояний лог. «0» и лог. «1», рассчитанных по результатам моделирования.

Из приведенных в табл. 2 результатов моделирования можно сделать вывод о том, что токи сбоя ($I_{\text{макс}}$) пропорциональны коэффициенту мощности P_i элемента в цепи и для инвертора приблизительно равны рабочим токам соответствующих транзисторов, а для триггера — на 30 % меньше. Токи сбоя в состояниях лог. «0» и лог. «1» зависят от соотношения рабочих токов транзисторов n -типа и p -типа и могут существенно отличаться. Оптимальным является случай равенства этих токов. Для данной технологии это случай $\beta \approx 2$.

На рис. 10 приведены результаты моделирования переходных процессов в узлах цепочки инверторов на рис. 9, размеры которых P_i возрастают с постоянным коэффициентом нагрузки $M_0 = 4$ при подаче на вход $a0$ меандра с периодом $T_{in} = 4$ нс ($f_{in} \approx 250$ МГц) и при последовательном воздействии в узлы $a1$ — $a256$ токовых импульсов с $I_0 = 2,0$ мА, $\tau_{\text{фр}} = 100$ пс, $\tau_{\text{сп}} = 600$ пс ($I_{\text{макс}} = 1,15$ мА). Из приведенных результатов следует, что существенные сбои наблюдаются на выходах инверторов в узлах $a1$ и $a4$ ($P_i = 1$ и 4), искажения в узле $a16$ ($P_i = 16$) незначительны, в остальных узлах с $P_i > 16$ искажения не наблюдаются.

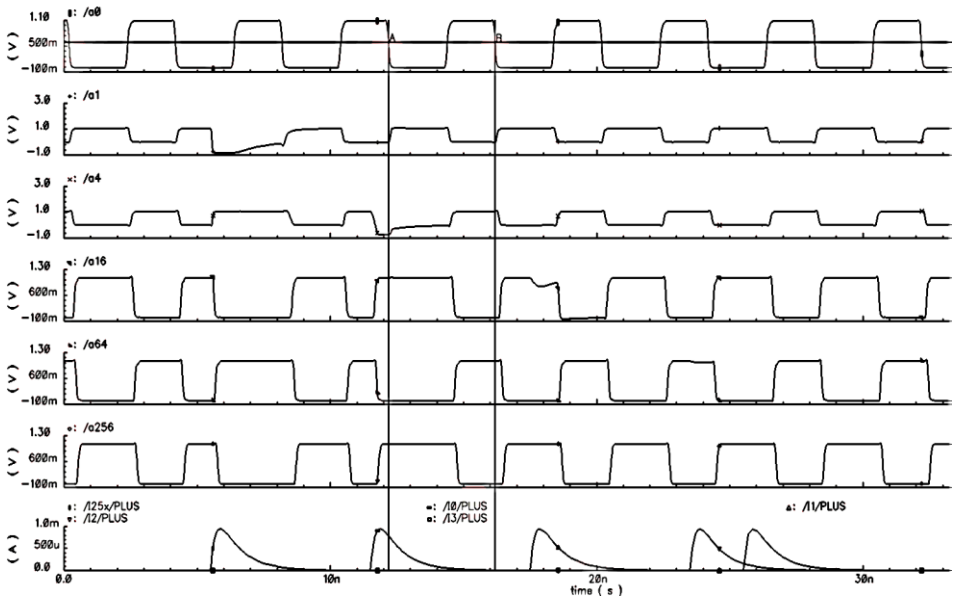


Рис. 10. Переходные процессы в узлах цепочки инверторов при последовательном воздействии в узлы $a1$ — $a256$ токовых импульсов.

Fig. 10. Transient processes in the nodes of the chain of inverters under the sequential action of current pulses in the nodes $a1$ — $a256$

Таблица 2 — Table 2

Параметры сбое- устойчивости	Рабочие токи транзисторов и токи сбоев, мкА				
	$P_i = 1,$ $\beta = 2$	$P_i = 2,$ $\beta = 1$	$P_i = 2,$ $\beta = \sqrt{2}$	$P_i = 2,$ $\beta = 2$	$P_i = 4,$ $\beta = 2$
Ток кз. лог.«1», I_n	232	692	575	473	923
Ток сбоя $I_{\text{макс}}^0$ в инверторе	230	655	550	453	940
Ток сбоя $I_{\text{макс}}^0$ в триггере	200	574	485	404	810
Ток кз. лог.«0», I_p	215	344	409	460	987
Ток сбоя $I_{\text{макс}}^1$ в инверторе	188	313	362	417	882
Ток сбоя $I_{\text{макс}}^1$ в триггере	158	264	305	394	663

4. Повышение сбоеустойчивости СФ-блоков ОЗУ

СФ-блоки ОЗУ различных типов в современных СБИС СнК занимают большую часть активной площади кристалла (рис. 1). Основным элементом этих блоков является ячейка памяти (ЯП), от схемотехники и конструктивно-топологического исполнения которой зависят основные параметры блоков ОЗУ, в том числе и параметры РС. Отличительной особенностью стандартной однопортовой шеститранзисторной ЯП (6Т) является наличие ограничений на соотношение размеров транзисторов для обеспечения условий записи и неразрушающего считывания, что затрудняет производить их выбор, исходя из условия повышенной сбоеустойчивости при воздействии ТЧ.

На рис. 11, а приведен вариант топологии 6Т ЯП минимальных размеров, выполненной по специальным правилам проектирования. На рис. 11, б показан вариант РС ЯП [14], выполненной по стандартным правилам, в которой используется «жесткая» p^+ охрана, увеличены абсолютные и относительные размеры ($\beta = W_p \cdot L_n / W_n \cdot L_p$) транзисторов в триггере ЯП. Площадь РС ЯП на рис. 11, б приблизительно на 50 % больше, чем у стандартной ЯП на рис. 11, а (табл. 1, № 1 и 3). Однако площадь СФ блоков ОЗУ в ядре кристалла при использовании ЯП рис. 11, б увеличивается всего на 20 %.

При оптимизации параметров сбоеустойчивости блоков ОЗУ необходимо также обеспечить правильный выбор архитектуры ОЗУ и параметров элементов в критических трактах выборки и управления моментом включения усилителей записи-чтения информации в накопитель ОЗУ.

Использование разработанных РС ЯП в составе накопителей в СБИС СнК и ОЗУ 1657PY2Y [15] позволило достигнуть параметры стойкости, соответствующие верхней границе категории PC2 и $LET_0 > 1,5 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, что обеспечило нечувствительность СБИС к воздействию α -частиц.

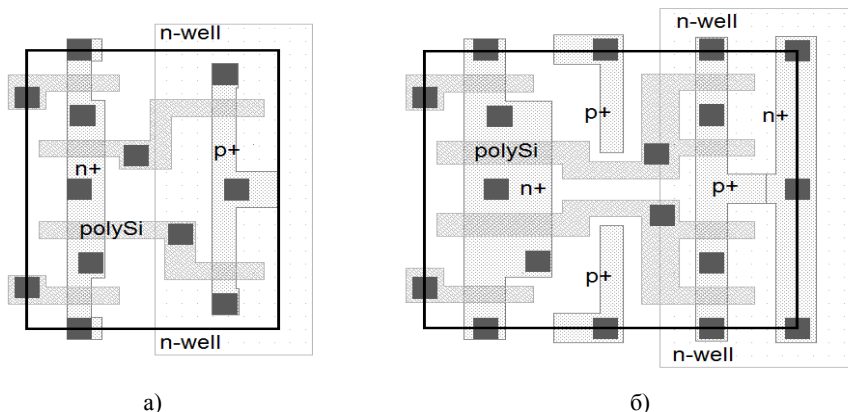


Рис. 11. Топология однопортовой 6Т ячейки памяти:
а) стандартная, б) радиационно-стойкая.

Fig. 11. Topology of a single-port 6T memory cell:
a) standard, b) radiation-hardened

5. Сбоеустойчивость блоков смешанного сигнала

Важными блоками в современных КМОП СБИС СнК являются периферийные интерфейсные СФ-блоки, функциональные узлы в которых работают с различной частотой (блоки смешанного сигнала): СФ-блоки генерации и подстройки частоты и фазы тактовых сигналов (*PLL* и *DLL*), а также высокоскоростные последовательные интерфейсы *SpaceFiber*, *SpaceWire RUS* и др., сбои в которых при воздействии ТЧ могут приводить к нарушению синхронизации и функциональному прерыванию.

СФ-блоки смешанного сигнала содержат статические (аналоговые), низкочастотные, средне- и высокочастотные функциональные узлы, обладающие различной величиной LET_0 и сечением насыщения сбоя σ_0 . СФ-блоки *PLL* в зависимости от архитектуры и конструктивно-топологических особенностей могут обладать как более высокой, так и пониженной по сравнению с другими блоками СБИС сбоеустойчивостью при воздействии ТЧ. Представляется возможным создание СФ-блоков *PLL* со сбоеустойчивостью не хуже, чем у дерева синхронизации СБИС.

По степени сбоеустойчивости элементы в СФ-блоках и СБИС условно можно разделить на следующие:

— элементы, сбои в которых не происходят,
 — элементы, сбои в которых не влияют на работоспособность блока,
 — критичные элементы и тракты, сбои в которых нарушают работоспособность блока и СБИС.

Структурная схема СФ-блока синтезатора частот на основе ФАПЧ (PLL) приведена на рис. 12, где

VCO — генератор, управляемый напряжением;

ChPmp — зарядно-разрядное устройство;

N — программируемый сигналами SEL делитель выходной частоты;

ФЧД — фазочастотный детектор;

C — интегрирующая емкость;

C_0R_0 — демпфирующая цепь;

LOCK — формирователь сигнала захвата фазы и частоты (рис. 13).

Сигнал *LOCK* соответствует лог. «0» — признак того, что разность фаз $\Delta\phi$ между сигналами f_{VCO} и F_{ref} в течение интервала времени, равного $2^n/F_{ref}$, находится в заданном интервале $[-\tau; \tau]$ и PLL вошел в режим.

Сигнал *LOCK* соответствует лог. «1» — признак того, что PLL находится в режиме рассогласования с F_{ref} ($> 0,5\%$).

На основе анализа и моделирования работы СФ-блока PLL600 установлено, что наиболее подвержен сбоям при воздействии ТЧ генератор *VCO*, тогда как сбои ФЧД и попадание ТЧ на выход блока *ChPmp* не влияют на работоспособность PLL. Сбои в счетчиках делителей частоты сдвигают фазу тактового сигнала обратной связи на входе ФЧД на величину, ограниченную периодом ФЧД (частота PLL изменяется незначительно). Восстановление рабочего состояния PLL600 (захват фазы) требует времени 10—20 мкс, что в большинстве случаев недопустимо.

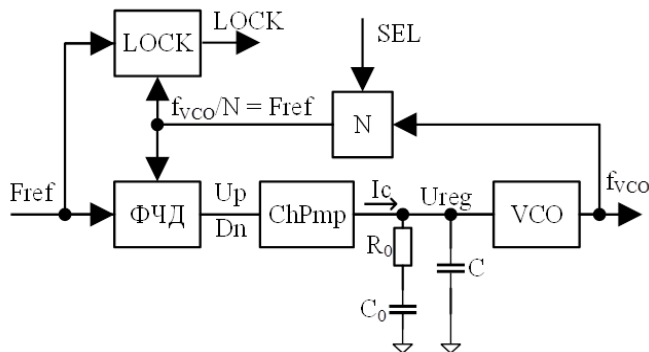


Рис. 12. Структурная схема сложно-функционального блока PLL.

Fig. 12. Structural diagram of the complex-functional block PLL

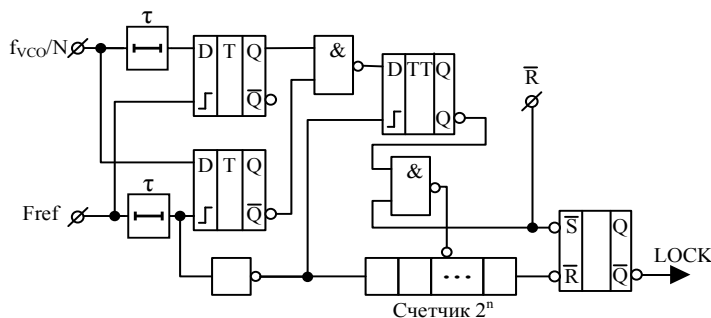


Рис. 13. Схема формирования сигнала LOCK.

Rice. 13. LOCK signal generation circuit

Моделирование влияния сбоев в различных узлах блока *LOCK* показало, что в зависимости от его локализации наблюдаются следующие эффекты.

1. Сбои в делителе частоты (счетчике) могут приводить к задержке формирования *LOCK*, что может значительно увеличить время выхода *PLL* в режим, но не приводит к катастрофическому отказу.

2. Сбои в элементах логики, элементах задержки и *D*-триггерах приводят к небольшой задержке формирования *LOCK* по отношению к типовому времени установления *PLL*.

3. Сбои в выходном *RS*-триггере приводят к следующим ошибкам.

При переключении *LOCK* из состояния лог. «1» в лог. «0» — индикация захвата частоты и фазы до фактического выхода *PLL* в режим — приводит к ошибкам синхронизации всех последующих цепей.

При переключении *LOCK* из состояния лог. «0» в лог. «1» — индикация потери захвата частоты и фазы во время работы — приводит к отказу, поскольку требует формирования внешнего сигнала сброса $\bar{R}$.

Для повышения сбоеустойчивости данного блока выходной *RS*-триггер в нем желательно делать *DICE*-типа.

Разработан сбоеустойчивый СФ-блок *PLL600H*, на основе оригинального тролируемого управляемого напряжением генератора *VCO_H* [16] без использования мажоритарного элемента, но с использованием счетчиков на основе *DICE* триггеров и схемы блока *ChPmp* типа *V-CP* [17]. При этом увеличение площади данного блока на кристалле незначительно по сравнению с исходным.

По результатам моделирования разработанной схемы СФ-блока *PLL600H* при попадании ТЧ в критические узлы блока установлено, что для КМОП технологии ОК уровня 90 нм сбоев в его работе не наблюдалось, по крайней мере, до $LET_0 \sim 10\text{—}15 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$.

6. Заключение

Создана и аттестована среда проектирования радиационно-стойких КМОП СБИС для стандартных техпроцессов объемного кремния уровня 250—90 нм, позволяющая обеспечить отсутствие эффекта «зашелкивания» до $LET_0 \geq 99$ МэВ·см²/мг, дозовую стойкость более 300 крад и повышенную сбоеустойчивость. Использование разработанной среды проектирования позволило создать конкурентоспособные СБИС СнК и ОЗУ категории не хуже РС2.

На конкурсах «ЗОЛОТОЙ ЧИП» в номинации «Лучшее изделие ЭКБ» АО НПЦ «ЭЛВИС» неоднократно присуждались призовые места.

Работа выполнена за счет собственных средств АО НПЦ «ЭЛВИС».

Список литературы

1. Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В. Требования радиационной стойкости — экзотика для гурманов или гарантия наличия и технического уровня результата разработки для всех категорий потребителей ЭКБ? // Наноиндустрия. 2018. № S (82). С. 39—41.
2. Радиационно-стойкое проектирование высокопроизводительных нанометровых КМОП СБИС «система-на-кристалле» / Ю. М. Герасимов и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 1. С. 33—51.
3. Герасимов Ю. М., Григорьев Н. Г., Петричкович Я. Я. Радиационно-стойкое проектирование нанометровых КМОП СБИС : реалии и мифы // Наноиндустрия. 2020. Том 13, № S5-2 (102). С. 319—324.
4. От первых КМОП транзисторов до радиационно-стойких нанометровых КМОП СБИС СнК / Ю. М. Герасимов и др. // Наноиндустрия. 2019. № S (89). С. 268—274.
5. Радиационная стойкость изделий ЭКБ / под ред. А. И. Чумакова. М. : НИЯУ МИФИ, 2015. 512 с.
6. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М. : Радио и связь, 2004. 320 с.
7. Тестовые кристаллы для расчетно-экспериментальной оценки радиационной стойкости нанометровых КМОП СБИС СнК / Ю. М. Герасимов и др. // Наноиндустрия. 2019. № S (89). С. 202—210.
8. Пат. 2674415 (РФ). Радиационно-стойкая библиотека элементов на комплементарных метал-окисел-полупроводник транзисторах / Герасимов Ю. М. и др. Оpubл. в Б. И., 2018. № 34.
9. Modeling of Single Event Transients With Dual Double-Exponential Current Sources: Implications for Logic Cell Characterization / D. A. Black et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2015. Vol. 62, no. 4. P. 1540—1549.
10. Messenger G. C. Collection of charge on junction nodes from ion tracks // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1982. Vol. 29, no. 6. P. 2024—2031.
11. Single event transient pulsewidths in digital microcircuits / M. J. Gadlage et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. Vol. 51, no. 6. P. 3285—3290.
12. Zoutendyk J. A., Smith L. S., Soli G. A. Experimental evidence for a new single-event upset (SEU) mode in CMOS SRAM obtained from model verification // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1987. Vol. NS-34, no. 6. P. 1292—1299.

13. Особенности проектирования сбоеустойчивых, сверхбыстродействующих логических цепей КМОП СБИС СнК / Ю. М. Герасимов и др. // Наноиндустрия. 2020. № S (96). Ч. I. С. 220—228.
14. Пат. 2692307 (РФ). Радиационно-стойкий элемент памяти для статических оперативных запоминающих устройств на комплементарных металл-окисел-полупроводник транзисторах / Ю. М. Герасимов и др. Оpubл. в Б. И. 2019. № 18.
15. Радиационно-стойкое КМОП статическое ОЗУ 16 Мбит 1657РУ2У / Ю. М. Герасимов и др. // Наноиндустрия. 2020. № S (96). Ч. I. С. 169—174.
16. Пат. 2763038 (РФ) Управляемый напряжением блок кольцевых генераторов на комплементарных метал-окисел-полупроводник (КМОП) транзисторах / В. Д. Байков и др. Оpubл. в Б. И. 2022. № 36.
17. A Single-Event-Hardened Phase-Locked Loop Fabricated in 130 nm CMOS / T. D. Lovelless et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2007. Vol. 54, no. 6. P. 2012—2020.

Информация об авторах

Герасимов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории АО НПП «ЭЛВИС», Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-6026-4820.

Петричкович Ярослав Ярославович, доктор технических наук, профессор, президент АО НПП «ЭЛВИС», Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-6502-6370.

Radiation-Hardened VLSI SoC and RAM – Design Features for Bulk Silicon CMOS Technologies

Yu. M. Gerasimov and Ya. Ya. Petrichkovich

JSC SPC “Electronic Computing and Information Systems” (“ELVIS”)
14, Konstruktor Lukin st., building 14, munic. Silino,
Moscow, Zelenograd, 124460, Russian Federation
YGerasimov@elvees.com, ymger29@mail.ru

Received: May 19, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: The effect of various types of radiation and heavy nuclear particles on VLSI fabricated using CMOS technologies for bulk silicon at a level of 250–90 nm is analyzed. Developed and certified on test crystals (TC) are constructive-topological and circuit solutions for elements of digital libraries, complex-functional RAM blocks and peripheral mixed-signal blocks for designing radiation-hardened VLSI of the “system-on-chip” (SoC) type and RAM of category RT (products with an increased level of radiation resistance). The methodology of radiation-hardened by design (RHBD) has been further developed. For CAD tools, a design environment for VLSI of the RT category was created for manufacturing at Russian factories using available CMOS bulk technologies. Based on this design environment, competitive radiation-hardened high-performance processor CMOS VLSI SoC and VLSI RAM were created. Basic technical solutions are protected by RF patents.

Keywords: bulk silicon, latch up, radiation hardness, radiation-hardened design, smart-functional block, VLSI system-on-a-chip, VLSI RAM, heavy nuclear particles.

For citation (IEEE): Yu. M. Gerasimov and Ya. Ya. Petrichkovich, “Radiation-Hardened VLSI SoC and RAM – Design Features for Bulk Silicon CMOS Technologies,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 548–569, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.39. (In Russ.).

References

- [1] A. Y. Nikiforov, V. A. Telets, and D. V. Boychenko, “Radiation Hardness Requirements — the Exotica for Gourmets or a Guarantee of the Design Result Success and High Technical Level for all Categories of Consumers?,” *Nanoindustry Russia*, pp. 39–41, 2018, doi: 10.22184/1993-8578.2018.82.39.41. (In Russ.).
- [2] Y. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, A. V. Kobylatskiy, Ya. Ya. Petrichkovich, and T. V. Solokhina, “Radiation-Hardening-By-Design of the High-Performance CMOS Nanometer System-on-chip,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 33–51, 2019, doi: 10.15826/icrt.2019.02.1.04. (In Russ.).

- [3] Yu. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, and Ya. Ya. Petrikovich, "Radiation Hardened by Design of Nanometer CMOS VLSI: Reality and Myths," *Nanoindustry Russia*, vol. 13, no. 5s, pp. 319–324, Dec. 2020, doi: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.319.324. (In Russ).
- [4] Yu. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, A. V. Kobylatskiy, Ya. Ya. Petrikovich, and T. V. Solokhina, "From the First CMOS Transistors to the Radiation-Hardened Nanometer CMOS Systems-on-Chip," *Nanoindustry Russia*, vol. 13, no. 5s, pp. 268–274, 2019, doi: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.268.274. (In Russ).
- [5] Radiation resistance of ECB products, /ed. A. I. Chumakov, Moscow: MEPhI, 2015. (In Russ).
- [6] A. I. Chumakov, *Action of space radiation on integrated circuits*, Moscow: Radio i svyaz', 2004. (In Russ).
- [7] Yu. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, A. V. Kobylatskiy, and Ya. Ya. Petrikovich, "Test Chips for Experiment-Based Radiation Hardness Calculation of Nanometer Systems-on-Chip," *Nanoindustry Russia*, pp. 202–210, 2019, doi: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.202.210. (In Russ).
- [8] Yu. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, A. V. Kobylatskiy, and Ya. Ya. Petrikovich, pat. no. 2674415 (RF), "Radiation-resistant library of elements on complementary metal-oxide-semiconductor transistors, published in Bulletin of Inventions," no. 34, 2018. (In Russ.).
- [9] D. A. Black, W. H. Robinson, I. Z. Wilcox, D. B. Limbrick, and J. D. Black, "Modeling of Single Event Transients With Dual Double-Exponential Current Sources: Implications for Logic Cell Characterization," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 62, no. 4, pp. 1540–1549, Aug. 2015, doi: 10.1109/tns.2015.2449073.
- [10] G. C. Messenger, "Collection of Charge on Junction Nodes from Ion Tracks," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 29, no. 6, pp. 2024–2031, Dec. 1982, doi: 10.1109/tns.1982.4336490.
- [11] M. J. Gadlage et al., "Single event transient pulse widths in digital microcircuits," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 51, no. 6, pp. 3285–3290, Dec. 2004, doi: 10.1109/tns.2004.839174.
- [12] J. A. Zoutendyk, L. S. Smith, G. A. Soli, and R. Y. Lo, "Experimental Evidence for a New Single-Event Upset (SEU) Mode in a CMOS SRAM Obtained from Model Verification," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 34, no. 6, pp. 1292–1299, 1987, doi: 10.1109/tns.1987.4337468.
- [13] Yu. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, A. V. Kobylatskiy, Ya. Ya. Petrikovich, and D. K. Sergeev, "High-Speed Heavy-Ion Tolerant CMOS Logic Circuit Design Features," *Nanoindustry Russia*, vol. 96, no. 3s, pp. 220–228, Jun. 2020, doi: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.220.228. (In Russ.).
- [14] Yu. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, A. V. Kobylatskiy, and Ya. Ya. Petrikovich, patent no. 2692307 (RF). "Radiation-resistant memory element for static RAM based on complementary metal-oxide-semiconductor transistors," published in Bulletin of Inventions, no 18, 2019. (In Russ).
- [15] Yu. M. Gerasimov, N. G. Grigoryev, A. V. Kobylatskiy, and Ya. Ya. Petrikovich, "Radiation-Hardened CMOS SRAM 16MBIT 1657RY2Y," *Nanoindustry Russia*, vol. 96, no. 3s, pp. 169–174, May 2020, doi: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.169.174. (In Russ.).
- [16] V. D. Baykov, Yu. M. Gerasimov, Ya. Ya. Petrikovich, and N. Yu. Rannev, pat. no. 2763038 (RF), "Voltage Controlled Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) Ring Oscillator Unit," published in Bulletin of Inventions, no 36, 2022. (In Russ).
- [17] T. D. Loveless et al., "A Single-Event-Hardened Phase-Locked Loop Fabricated in 130 nm CMOS," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 54, no. 6, pp. 2012–2020, Dec. 2007, doi: 10.1109/tns.2007.908166.

Information about the authors

Yuri M. Gerasimov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory of JSC SPC "ELVIS", Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-6026-4820.

Yaroslav Ya. Petrichkovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, President of JSC SPC "ELVIS", Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-6502-6370.

УДК 621.396(091)

Конструкторская деятельность крымских радиолюбителей

Пузанков Л. А.

*Российский телеграфный клуб
Симферополь, Крым, Российская Федерация
r7ka@mail.ru*

Получено: 11 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Исходя из основного определения радиолюбительского движения в мире, в докладе рассматриваются основы возникновения конструкторской деятельности радиолюбителей в нашей стране в начале XX века и в послевоенный период. Среди задач, стоявших перед радиолюбителями, были дела общегосударственного значения — создание радиоконструкций для народного хозяйства, радиофикация и телефонизация страны, участие в широкомасштабных научных экспериментах и решение специфических проблем, касающихся развития радиоспорта и популяризации его среди населения. В настоящей статье отражена конструкторская деятельность крымских радиолюбителей.

Ключевые слова: радиолюбительское движение, радиофикация, телефонизация.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пузанков Л. А. Конструкторская деятельность крымских радиолюбителей // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 4. С. 570—586.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пузанков Л. А. Конструкторская деятельность крымских радиолюбителей / Л. А. Пузанков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 570—586.

1. Введение

Радиолюбительство, в том числе и коротковолновая радиосвязь, стали активно развиваться в начале XX века, практически сразу же после изобретения радио. 18 апреля 1925 года была утверждена Конституция Международного радиолюбительского союза (*International Amateur Radio Union* — IARU). Это стало официальным «днем рождения» IARU, который отмечается сейчас как Всемирный день любительского радио. В 2022 году

организации исполнилось 97 лет. Позднее в принятом международном «Регламенте радиосвязи» дано четкое определение радиолюбительского движения: «Любительская служба: служба радиосвязи для целей самосовершенствования, взаимной связи и технических исследований, осуществляемая любителями, т.е. лицами, имеющими на это должное разрешение и занимающимися радиотехникой исключительно из личного интереса и без извлечения материальной выгоды».

2. Начало развития радиолюбительства в России и СССР

В нашей стране после Великой Октябрьской социалистической революции вопросы развития радиолюбительства прозвучали 9 октября 1921 года на VIII Всероссийском электротехническом съезде, на котором профессор Петроградского электротехнического института (ныне — Санкт-Петербургский электротехнический университет им. М. А. Бонч-Бруевича) Имант Григорьевич Фрейман (1890—1929) выступил с докладом «Любительская радиостанция как средство распространения электротехнических знаний среди широких кругов населения». В то время, когда за рубежом радиолюбительская связь уже пользовалась большой популярностью у населения, эти рекомендации профессора были весьма актуальны для нашей страны. В решениях съезда было записано: «Признать желательным допустить устройство любительских радиостанций».

Президент Академии наук СССР академик Сергей Иванович Вавилов (1891—1951) характеризовал радиолюбительское движение следующими словами: «Ни в одной области человеческих знаний не было такой массовой общественно-технической самодеятельности, охватывающей людей самых различных возрастов и профессий, как в радиотехнике. Радиолюбительство — это могучее движение, которое привело к участию в радиоэкспериментах тысячи энтузиастов, посвящающих свой досуг технике...» [1].

В стране стали создаваться кружки и появились энтузиасты радиотехники. Так 4 ноября 1922 года в Петрограде по инициативе профессоров И. Г. Фреймана и Алексея Алексеевича Петровского (1873—1942) был создан радиолюбительский кружок при «Обществе мироведения».

В сентябре 1922 года в подмосковной Лосиноостровской показательной средней школе 2-й ступени (бывшая французская гимназия) учитель физики Евгений Николаевич Горячкин (1895—1961) организовал первый в стране радиокружок. Впоследствии Е. Н. Горячкин стал членом-корреспондентом Академии педагогических наук СССР.

В октябре того же года аналогичный радиокружок был создан в подмосковной детской колонии «Искра». В 1924 г., собрав приемник и

изучив телеграф, кружковцы сначала приняли сигналы SOS с корабля, терпевшего бедствие в Балтийском море, а позже — первую опытную передачу радиостанции имени «Коминтерна».

28 июля 1924 года Совет народных комиссаров (СНК) СССР принял «Закон о свободе эфира», на основании которого вышло Постановление «О частных приемных радиостанциях», которое разрешало гражданам СССР пользоваться индивидуальными радиоприемниками. В феврале 1926 года СНК СССР принял Постановление «О радиостанциях частного пользования», что разрешило радиолюбителям использовать индивидуальные радиопередатчики. Так как передатчиков и радиоприемников для радиолюбителей нашей промышленностью не выпускалось, многие активисты стали изготавливать их самостоятельно. В этом неоценимую помощь оказывали многие популярные журналы по радиотехнике, где публиковались описания различных радиоконструкций, которые можно было повторить в домашних условиях.

3. Деятельность региональных отделений

Судя по информации из довоенных радиолюбительских журналов: «Радиолюбитель», «Радио всем», «РАДИОФронт», «Радіо», в Крыму после 1927 года появилось много энтузиастов, увлекающихся радиотехникой [3]. Как отмечает Георгий Члиянц, «...1927 г. — начинают организовываться секции коротких волн (СКВ). Сначала в Нижнем Новгороде, затем в Симферополе, Томске и других городах». Поэтому мы считаем, что радиолюбительскому движению в Крыму в 2022 году исполняется 95 лет! С 1927 года радиолюбители-коротковолновики появляются не только в столице Крыма, но и во многих других городах полуострова. Общество друзей радио (ОДР) открыло в Симферополе коллективную радиостанцию *eu5KAT*, в Ялте — *eu5KBL*. В середине сентября 1929 года при ОДР была создана секция коротких волн в Феодосии, в 1930 году — в Севастополе (руководитель — Нагель Георгий Якубович).

В мартовском номере журнала «Радиолюбитель» за 1927 год в числе опубликованных новых позывных радионаблюдателей-коротковолновиков мы читаем: «*RK-82* — Мурский Леонид Евгеньевич (г. Симферополь, ул. Троцкого, дом 5, кв. 6; приемник регенеративный 0-V-2)». Естественно, радиоприемник Л. Е. Мурский собрал самостоятельно. В 1928 году Мурский выехал в Москву, где построил радиопередатчик и получил позывной *26RB*.

Первым радиолюбителем-коротковолновиком в Крыму, получившим разрешение на эксплуатацию передающей радиостанции, является симферополец Антон Семенович Прокопенко (1901—1993) (Рис. 1).



Рис. 1. А. С. Прокопенко (фото 80-х гг.).

Fig. 1. A. S. Prokopenko (photo from the 80s)

В 1928 году он собрал приемник и передатчик и получил свой первый позывной 33RB. Стал активно проводить радиосвязи. В журнале «Радиолюбитель № 9 за 1928 год о нем писали: «33RB/(т. Прокопенко, Симферополь). Передатчик сделан по двухтактной схеме мощностью 14 ватт, хотя иногда мощность и увеличивается. Лампы UE15. QSB — AC (400 в). Антенна Г-образная, наклонная 20×35 м. Работает иногда с противовесом (два наклонных луча по 8 метров) иногда с землей. Результаты получаются почти одинаковые. Волна обычно от 42,5 до 41 м, но пробовал работать и на других волнах (32,35 и 51,5 м). На волне 50,5 м идет очень уверенная связь с Москвой (с 93RA) и с Нижним Новгородом (12RA), с которыми проводит ряд опытов. 33RB — прекрасный морзист и имеет за два месяца работы 158 QSO. DX — почти вся Европа E, AS, AG, AU, FT, FM». На карточках-квитанциях (QSL), которые радиолюбители направляли почтой своим корреспондентам с информацией о подтверждении радиосвязи, часто указывались краткие технические данные передатчиков и приемников (Рис. 2). В тот период было принято к QSL прикладывать и небольшое фото. Благодаря этому мы видим многих радиолюбителей того периода.

Из довоенных радиолюбителей Крыма можно выделить еще одного удивительного человека — Валентина Дионисовича Самборского (1924—2022) из города Феодосия (28 февраля 2022 года на 98-м году жизни он ушел из жизни). Путь в радио Валентин начинал с увлечения радиотехникой и сборкой простых радиоприемников прямого усиления. Не ограничиваясь созданием радиоприемников, молодой радиолюбитель задумывает построить радиопередатчик. С этой целью в начале 1941 года он пишет письмо в редакцию журнала «Радиофронт» (Москва) с просьбой помочь ему в создании радиопередатчика. В марте 1941 года Валентин Самборский получил

ответ из Центральной консультации при редакции журнала за подписью Н. В. Казанского с разъяснением порядка оформления разрешения на постройку радиопередатчика. Буквально за несколько дней до начала Великой Отечественной войны он получил из ЦС Союза ОСОАВИАХИМ СССР и РСФСР удостоверение коротковолновика-наблюдателя с позывным *URS-5-7/KP*. Война прервала мирное увлечение радиолубительством Валентина Самборского. Приобретенный опыт в радиолубительстве помог ему качественно выполнять боевые задачи в период военной службы на фронтах Великой Отечественной войны [5].

SKW QRA *A. S. Prokopenko, Simferopol Crimea, Kalinin's str. n. 3.* **USSR**

TO RADIO *Ef 8 big* Your sigs hrd at *21.26* GMT on *9/7* 1928
 Working *Eu 33-26* QRK R *6* QRH *31.4* m QSB *200*
 Calling - QSS *to 24* QRM - QRN *21* QRB *2010* km
 QSSS - QSS *to 24* QRM - QRN *21* QRB *2010* km

RECEIVER **TRANSMITTER**

O - V - l. Circuit *Schnell* Circuit *Hartley p.p.* Input *14* w
 Aerial *Г. 20 x 358* Cps - Plate *400 ac* V *70* m A
 DX red *W.W.* Aerial curr - QRH *30.5* m
 Tests at *2000 to 0000 ant.* Aerial of *rev* Cps *gnd.*
 Remarks *ry tail of fr qso! my first qso 30 mhz band!*
 QRK *Eu 33-26 ?* Best 73's es DX OM!
 Pse QSL crd via SKW Moscow Op. *10/5/28*
 QSL. No *128* **EU, AS, AG, QSL-QRA: Moscow, USSR-SKW** QSO No *165*

Рис. 2. Карточка-квитанция А. С. Прокопенко.

Fig. 2. A. S. Prokopenko's card-receipt

3. Нижегородская региональная организация

По возвращении в Феодосию после войны Валентин продолжает заниматься радио и получает разрешение на постройку радиопередатчика. В 1947 году передатчик был готов. За В. Д. Самборским закрепляется позывной *UA6SF*. Конструкция передатчика, использовавшего передовые достижения того времени, была подробно описана в журнале «Радио» № 10 1949 года. Передатчик В. Д. Самборского — 4-каскадный. В передатчике применяется два генератора: кварцевый на постоянную частоту около 3000 кГц и длинноволновый с плавной настройкой на среднюю частоту около 500 кГц. В результате сложения этих частот задающий генератор дает очень стабильную частоту порядка 3500 кГц, которая может изменяться в пределах

любительского диапазона. Оба генератора работают на лампах 6Л6. После двух удвоителей частоты на лампах 6Л6 сигнал подается на мощный каскад на двух лампах Г-807. Передатчик работает и в телефонном режиме с амплитудной модуляцией. Модулятор 4-каскадный на лампах 6SQ7, 6Н7 и двух 6Л6. Модуляция экранная на выходной каскад.

С постройкой передатчика Валентин стал активно работать в эфире. Часто к нему в гости приходил его верный друг, также активный радиолюбитель в Феодосии, самостоятельно собравший себе передатчик, Павел Васильевич Гуленко (1922—2010), UA6SJ, (Рис. 3).



Рис. 3. В. Д. Самборский за работой на радиостанции. Справа — П. В. Гуленко.

Fig. 3. V. D. Samborsky at work at the radio station. Right – P. V. Gulenko

С учетом дефицита времени (поездки в Москву по учебе на заочном отделении института и частые призывы на военную переподготовку, когда требовалось всегда официально каждый раз закрывать радиостанцию) в 1952 году В. Д. Самборский написал заявление и закрыл радиостанцию, а передатчик передал в Крымский радиоклуб на коллективную радиостанцию, где аппарат эксплуатировался в течение длительного времени. Свои первые радиосвязи телеграфом на этом передатчике проводил с декабря 1956 года на радиостанции клуба UB5KKA и автор настоящей статьи.

Страна после победы в Великой Отечественной войне стала быстро восстанавливать разрушенное. Накануне Дня Победы в пятидесятилетний юбилей изобретения радио нашим соотечественником А. С. Поповым было

опубликовано специальное Постановление Совета Министров СССР, в котором, в частности, говорилось о «важнейшей роли радио, о необходимости популяризации достижений отечественной науки и техники, о необходимости поощрения радиолобительства среди широких слоев населения». В связи с этим Постановлением 7 мая стало принято считать Днем Радио. Были также учреждены «Золотая медаль им. А. С. Попова» и знак «Почетный радист СССР». Важное для радиолобителей страны решение вновь разрешить в стране использование любительских радиостанций было принято Советом Министров СССР 9 марта 1946 года. К апрелю были уже готовы не только все практические документы, регулирующие любительскую радиосвязь, в частности, «Положение о радиоклубах», но и бланки необходимых анкет и проч. Начали восстанавливаться радиосекции и радиоклубы. Пошел процесс оформления первых послевоенных разрешений на эксплуатацию радиостанций индивидуального и коллективного пользования. Среди задач, стоящих перед радиолобителями, были дела общегосударственного значения — создание радиоконструкций для народного хозяйства, радиофикация и телефонизация страны, участие в широкомасштабных научных экспериментах и решение специфических проблем, касающихся развития радиоспорта и популяризации его среди населения.

7 мая 1946 года приказом Председателя Крымского облсовета ОСОАВИАХИМ был подписан приказ об организации в Крыму радиоклуба. Позднее, в 1951 году, для Крымского радиоклуба был впервые составлен паспорт. Согласно паспорту штатных работников в радиоклубе было пять: начальник радиоклуба, старший инженер-инструктор, начальник коллективной радиостанции, инженер-инструктор, инструктор. В тот период в радиоклубе насчитывалось всего 167 членов. В клубе были организованы следующие секции:

— секция коротких волн (28 членов), председатель секции — Борис Федорович Павленко (1924—1985), имел позывной коротковолновика-наблюдателя;

— секция конструкторской работы (65 членов), председатель секции — Федор Григорьевич Божко;

— квалификационная комиссия, председатель комиссии — опытный радиоспециалист, находившийся в тот период на военной службе, гвардии капитан Михаил Васильевич Мызников, (1918—1986), имел позывной коротковолновика-наблюдателя.

Радиоклуб был зарегистрирован по адресу: Симферополь, Керченский переулок, дом 6, и располагал всего двумя помещениями, одно из которых было выделено под коллективную радиостанцию. В 1957 году Крымский радиоклуб получил несколько помещений по адресу Севасто-

польская, 2, и на Севастопольской, 6. На Севастопольской, 2 располагались радиоклассы для курсов по подготовке радистов-операторов, а на первом этаже в здании по адресу Севастопольская, 6 (ранее здесь размещался областной авиаклуб ДОСАВ) разместилось руководство радиоклуба, лаборатория, склады, любительская радиостанция. Здесь же был большой вестибюль, где прежде под потолком был укреплен небольшой одномоторный самолет с демонтированным одним крылом.

Исходя из принципов радиолюбительства, практически все крымские радиолюбители конструкторской и коротковолновой секций занимались радиоконструированием, создавая новые конструкции и совершенствуя имевшиеся. Часто пользовались измерительной аппаратурой, которая имелась в лаборатории клуба. Приборы можно было брать и домой.

Здесь следует отметить наиболее активных радиолюбителей Крыма.

— Мызников Михаил Васильевич, *UB5SI*, много лет работал инженером в лаборатории Крымэнерго. Как радиоконструктор постоянно создавал различные приборы, совершенствовал свою радиостанцию, внедряя в аппаратуру новшества.

— Мартычук Николай Александрович (1921—1996), *RB5AGO*, работал главным инженером Крымского радиоцентра, позднее перешел на научную работу в Крымскую астрофизическую обсерваторию (пос. Научный). Увлекался работой на УКВ, создавая УКВ приемники (конверторы), передатчики.

— Осмоловский Релен Викторович (1927—2017), *UB5JO*, работая учителем физики в средней школе № 3, организовал радиокружок, увлек в радиолюбительство многих школьников, которые смонтировали в школе радиоузел, разрабатывали различные приборы, используя их на уроках физики. Релен Викторович сам создавал различные конструкции приемников и передатчиков для любительской радиосвязи. За свои разработки имел дипломы высших степеней с Всесоюзных радиовыставок и ВДНХ.

— Норштейн Борис Самойлович (1935—1997), *UB5SN*, работал в областном телеателье, позднее мастером производственного обучения в радиоклубе. Организовал в Дворце пионеров телестудию, создавал аппаратуру для радиосвязи на УКВ и др.

В конце 50-х годов в радиоспорте нашей страны появилось увлечение новым видом соревнований — «охотой на лис» (современное название: «спортивное радиопеленгование — СРП»). Большое количество коротковолновиков и ультракоротковолновиков Крыма стали подключаться к этой разновидности радиоспорта: М. В. Мызников (*UB5SI*), В. П. Шевченко (*UB5TP*), А. В. Рыженко (*RB5AGV*), Э. И. Пачин (*RB5AHM*), В. С. Гресь (*UB5JJ*), В. И. Разумов (*UT5LA*) и другие. Для участия в соревнова-

ниях необходимо было создавать специфические радиоприемники и антенны на диапазон 80 и 2 метра для «охоты на лис», к чему и приступили наши спортсмены. Здесь уместно выделить талантливого конструктора аппаратуры для «охоты на лис» Николая Викторовича Бирюкова, который, будучи еще студентом Севастопольского приборостроительного института, создал уникальные радиоприемники и автоматизированные передатчики для «охоты на лис». Следует отметить, что крымские «охотники» с его приемниками добиваются и сейчас высоких спортивных результатов на соревнованиях.

На первых в Советском Союзе соревнованиях по «охоте на лис» под Киевом летом 1957 года от Крыма выступали М. В. Мызников (Рис. 4) и Владислав Петрович Шевченко, *УБ5ТР*. К сожалению, в число призеров наши «лисятники» не попали.



Рис. 4. М. В. Мызников на дистанции поиска.

Fig. 4. M. V. Myznikov at the search distance

В период с 1959 по 1973 гг. в нашей области и республике проводилось большое количество соревнований по «охоте на лис». Во многих соревнованиях крымчане имели высокие спортивные результаты. Анатолий Рыженко стал Чемпионом Украины и был включен в сборную Украины (Рис. 5).



Рис. 5. А. В. Рыженко за настройкой приемника.

Fig. 5. A. V. Ryzenko for receiver tuning

Об отношении радиоклуба к радиоконструированию может ярко свидетельствовать важное событие в жизни клуба. Известие о том, что крымских радиоспортсменов приглашают на международные соревнования на УКВ было принято в Симферополе с восторгом. Такое предложение поступило многим радиоклубам Украины. Предстояло соревноваться с радиоспортсменами Венгерской Народной республики, Центральный радиоклуб которой выступил с инициативой. При этом участники соревнований должны были находиться в пределах своих государств. Для размещения команд были выбраны Карпаты.

Получив информацию за месяц до планируемого в мае 1959 года мероприятия, областные радиоклубы приступили к подготовке. За короткий срок предстояло изготовить каждому участнику приемо-передающую аппаратуру и антенны на диапазон 144 и 425 МГц. Такой аппаратуры для работы в полевых условиях не было у многих спортсменов, даже у ультракоротковолновиков Крыма. На соревнования должны были выехать спортсмены-активисты, в основном, из города Симферополя. Потенциальные кандидаты на поездку приступили к изготовлению аппаратуры или приспособлению имеющейся к работе в полевых условиях. Настройка аппаратуры производилась в помещениях Крымского областного радиоклуба на Севастопольской, дом 6. Для этого прямо в вестибюле были установлены столы, на которых разместили все имеющиеся в клубе радиоизмеритель-

ные приборы, изготовлены длинные линии для измерения точных частот радиопередатчиков и их мощности. Так как многие спортсмены днем работали на предприятиях города, то помещения клуба были открыты в течение суток и не закрывались даже на ночь. Для передатчиков иногда использовались блоки от списанных морских радиолокационных устройств «Факел». В выходном каскаде передатчиков чаще всего применяли лампу ГУ-29. Времени, как обычно бывает в таких случаях, не хватило для окончательной отладки техники. Часть аппаратуры решили подстроить на месте.

Согласно жеребьевке команда Крымского радиоклуба должна была прибыть в Закарпатье, в город Мукачево. Во главе с начальником Крымского областного радиоклуба Михаилом Константиновичем Зозулей (1918—1979) на международные соревнования выехали: начальник клубной коллективной радиостанции *UB5KKA* Виктор Денисович Гришин, *UB5JG*; начальник коллективной радиостанции средней школы № 3 Алексей Федорович Ефанов (*RB5KKN*, 1907—1973); начальник коллективной радиостанции той же школы *UB5KKN* Релен Викторович Осмоловский, *RB5AHN*; Анатолий Андреевич Корпусенко, *UB5JD*; Николай Александрович Мартынчук (1921—1996), *RB5AGO*; Эдуард Иванович Пачин, *RB5AHM*; Анатолий Васильевич Рыженко, *RB5AGV* и автор этой статьи. Всю аппаратуру и антенны погрузили в грузовые машины с тентами и направились в Закарпатье.

По прибытии в Мукачево до соревнований в выделенном временном помещении удалось подстроить аппаратуру, после чего выехали в горы, поставили палатки, установили мачты с антеннами и подключили аппаратуру. В назначенное время вышли в эфир и состязание началось. По итогам соревнований Украина вышла победителем.

4. Конструкторская деятельность радиолюбителей и радиовыставки

В соответствии с задачами, стоящими перед радиолюбителями, фундаментом массового радиолюбительского движения в нашей стране стало радиоконструирование и радиоспорт. Радиоконструкторская деятельность увлеченных радио оценивалась на организуемых выставках творчества радиолюбителей. Как правило, вначале проводились выставки, организуемые местными организациями и комитетами оборонного общества, затем шли выставки городского, областного, республиканского и всесоюзного масштаба.

7 мая 1925 года в Ленинградском электротехническом институте открылась радиовыставка, на которой впервые один из разделов был посвя-

щен радиолюбительской аппаратуре. В июне того же года в Москве в залах политехнического музея открылась первая Всесоюзная радиовыставка, на которой был также отдел радиолюбительства. Среди экспонатов демонстрировался и передатчик первого коротковолновика нашей страны Федора Лбова, *R1FL*.

23 мая 1927 года в Политехническом музее открылась Московская межсоюзная губернская радиовыставка, на которой было представлено свыше 300 экспонатов, изготовленных радиолюбителями тринадцати профсоюзных организаций [2].

На первой Всесоюзной конференции коротковолновиков, состоявшейся в декабре 1928 года, демонстрировались радиолюбительские конструкции некоторых участников. Этот пример способствовал началу массового проведения радиолюбительских выставок в различных городах Советского Союза: Баку, Витебске, Воронеже, Ереване, Киеве, Ленинграде, Минске, Свердловске, Ташкенте, Тбилиси, Туле, Харькове и др.

Редакция журнала «Радиофронт» (предшественник журнала «Радио») в 1935 году стала проводить заочные радиолюбительские выставки, ставшие традиционными. В выставках принимали участие многие радиолюбители союзных республик.

В 1937 году была проведена 3-я Всесоюзная радиовыставка, на которую было представлено 12 экспонатов аппаратуры на УКВ (из 43 по совместному разделу «КВ и УКВ»).

После Великой Отечественной войны Всесоюзная заочная радиовыставка (ВЗР) конструкций и приборов радиолюбителей состоялась в 1947 году. На радиовыставку поступило около 400 описаний экспонатов со всех регионов СССР. Как правило, выставки приурочивались ко Дню Радио, то есть к 7 мая. Если в 1948 году выставком получил около 600 экспонатов, то к концу марта 1949 года на 8-ю ВЗР их пришло уже около 1000.

Сбор описаний на выставку обеспечивали, в основном, радиоклубы, для чего на местах проводилась большая организационная и практическая работа. Тематика работ, представленных радиолюбителями на 8-ю радиовыставку, отличалась огромным разнообразием: от детекторных радиоприемников, в которых остро нуждались сельские районы страны, до сложнейших разработок широкополосных радиоприемников и телевизоров на батарейных и сетевых радиолампах. Здесь были представлены также радиоизмерительная аппаратура, коротковолновые любительские радиостанции, звукозаписывающая аппаратура, радиолы, приборы для различных отраслей промышленности, наглядные пособия для подготовки специалистов области радиотехники. Несколько расширилось число экспонатов для УКВ диапазона, который еще не очень активно использовался

в тот период. Крымский радиоклуб также принял участие в радиовыставке. Из Симферополя в Москву были направлены материалы на некоторые экспонаты, в том числе на магнитофон «МБФ-2-48», разработчиком которого был Ф. Г. Божко — руководитель секции радиоконструирования Крымского радиоклуба. «За успешную работу в области развития радиолюбительства и радиотехники» Комитет по радиофикации и радиовещанию наградил знаком «Почетный радист СССР» радиолюбителей-конструкторов, получивших первые и вторые призы на 8-й ВЗР. Среди них были и крымские радиолюбители Ф. Г. Божко и М. В. Мызников.

Отобранные на местных выставках лучшие экспонаты отправлялись на Всесоюзные выставки, организуемые Центральным Радиоклубом СССР совместно с Выставкой достижений народного хозяйства (ВДНХ), журналом «Радио», ЦК ДОСААФ. Показательно, что руководители министерств, ведающих электроникой, автоматикой, радиотехнической промышленностью, считали своим неперенным долгом лично знакомиться с экспонатами. Наиболее удачные конструкции попадали с выставок прямо в производственные цеха заводов и научные лаборатории, а их авторы получали приглашения в НИИ и КБ. Кроме того, выставки служили мощным средством пропаганды радиолюбительства среди молодежи. Всего было проведено 34 Всесоюзных выставок.

На 9-й Всесоюзной радиовыставке ряд крымских радиолюбителей-конструкторов также были отмечены дипломами второй степени. Среди них были В. С. Цветков, представивший на выставку радиолу, Г. А. Панасенко — передатчик коротковолновика, А. Н. Абраменко — авометр, Ф. Г. Божко — радиокомпаратор, В. К. Пылев — ГСС и измеритель емкостей и сопротивлений, К. А. Шарапов — генератор спектра частот и Н. В. Тронов — ветрозлектродвигатель.

К юбилейной 10-й Всесоюзной выставке радиолюбительского творчества, проводившейся в 1952 году, члены Крымского радиоклуба ДОСААФ стали активно готовиться заранее. Активист клуба Михаил Мызников конструирует звукозаписывающий аппарат. Над созданием супергетеродинного приемника 1-го класса с автоматической настройкой работает симферопольский радиолюбитель Константин Цырда. Валентин Пылев начал изготовление универсального измерительного прибора. Андрей Андреевич Василенко (инженер радиоклуба) работает над созданием генератора стандартных сигналов. Конструкции современных радиоприемников готовят на Всесоюзную радиовыставку Владимир Цветков, Михаил Раков и другие. Активно готовятся к предстоящей радиовыставке и юные радиолюбители Крымской области. Вопрос о подготовке к областной выставке и участии в 10-й Всесоюзной радиовыставке был специально обсужден на

заседании Совета радиоклуба, на котором были намечены конкретные мероприятия по широкому привлечению крымских радиолюбителей к этой выставке. После проведения областной радиовыставки жюри направило несколько экспонатов крымских радиолюбителей на 10-ю Всесоюзную радиовыставку.

Из представленных экспонатов был отмечен 10-ламповый супергетеродин с двойным преобразованием частоты члена Крымского областного радиоклуба Георгия Александровича Панасенко, *UA6SC*. Жюри выставки отметило аккуратное и эстетичное внешнее оформление приемника. За свою конструкцию Г. А. Панасенко был отмечен дипломом второй степени. Инструктор радиоклуба Юлий Евгеньевич Черкасов (1935—2007) изготовил на нувисторах конвертер для работы в УКВ диапазоне на 2 метрах. По результатам областной радиовыставки его конструкция была направлена на Всесоюзную радиовыставку. Экспонат был высоко оценен и занял первое место. Вообще Юлий Черкасов всегда занимался конструкторской деятельностью. Готовясь к очным Чемпионатам СССР на УКВ, он создавал новые конструкции, которые привели его к чемпионскому титулу. Как правило, за свою уникальную аппаратуру, используемую на соревнованиях, он также неоднократно поощрялся редакцией журнал «Радио».

50 лет назад (в 1972 году) ЦК ДОСААФ утвердил «Положение о единой Всесоюзной технической классификации радиолюбителей-конструкторов ДОСААФ СССР» (ЕВТК). Стало присваиваться звание «Мастер-радиоконструктор ДОСААФ СССР» за занятое первое место по одному из разделов радиовыставки (на первых порах только на Всесоюзных выставках творчества радиолюбителей-конструкторов). Среди первых крымчан это почетное звание получили Михаил Мызников (*UB5SI*), Юлий Черкасов, Анатолий Рыженко (*RB5AGV*), Василий Бекетов (*UB5JIN*), Игорь Ершов (*UB5JMZ*) и другие. Кстати, призерам Всесоюзных радиовыставок за первые места вручались одновременно и дипломы ВДНХ СССР. Такими дипломами за свои разработки были награждены крымчане Василий Бекетов (за КВ — УКВ трансивер «Крым-82»), Борис Норштейн (*UB5SN*), Релен Осмоловский (*UB5JO*) (Рис. 6) и др. На республиканских и других выставках присваивались звания «Радиолюбитель-конструктор ДОСААФ СССР» (3-го, 2-го и 1-го разрядов) и «Юный радиолюбитель-конструктор ДОСААФ СССР».

Следует отметить очень важную работу по подготовке экспонатов на радиовыставки. Чаще всего эту работу проводили штатные работники радиоклуба на этапе принятия экспонатов на областную радиовыставку. Проверку конструкций на работоспособность и соответствия декларируемым параметрам чаще всего осуществлял как член жюри Юлий Черкасов

(Рис. 7). Многим участникам радиовыставок помогали выполнять очень важную для радиолюбителя-конструктора работу — составление описания экспоната — штатные инженеры-инструкторы радиоклуба: Андрей Андреевич Василенко, а позже — Олег Гимбертович Шапиро, *UT5LF*.



Рис. 6. Релен Осмоловский.

Fig. 6. Relen Osmolovsky



Рис. 7. Член жюри областной радиовыставки Юлий Черкасов.

Fig. 7. Member of the jury of the regional radio exhibition Yuly Cherkasov

5. Заключение

Изложенные материалы свидетельствуют об активной творческой работе в изложенном выше периоде практически всех радиолюбителей Крыма — радиоконструкторов и радиоспортсменов. В последние годы благодаря технической революции в радиоэлектронике и компьютерным технологиям необходимость в активном участии радиолюбителей в радио-конструировании значительно сократилась.

Список литературы

1. Пузанков Л. А. История радиолюбительского движения и радиоспорта в Крыму. Симферополь: изд. «Форма», 2010. 200 с.
2. Члиянц Г. Юбилейные и «круглые» даты в истории нашего хобби // Радио. 2022. № 1. С. 47—50.
3. Члиянц Г. Листая старый “USSR Call Book (1925—1941)”. Львов: изд. «Сполом», 2008. 304 с.
4. Пузанков Л. Прокопенко А. С. — первый радиолюбитель в Крыму // Радио. 2018. № 11. С. 50—51.
5. Пузанков Л. Самборский Валентин Дионисович — человек-легенда // Радио 2018. № 2. С. 47—49.

Информация об авторе

Пузанков Леонид Александрович, член Российского телеграфного клуба, Симферополь, Крым, Российская Федерация.

Design Activity of the Crimean Radio Amateurs

L. A. Puzankov

Russian Telegraph Club
Simferopol, Crimea, Russian Federation
r7ka@mail.ru

Received: May 11, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: Based on the basic definition of the amateur radio movement in the world, the report examines the foundations for the emergence of the design activity of radio amateurs in our country at the beginning of the 20th century and in the post-war period. Among the tasks facing radio amateurs were matters of national importance – the creation of radio structures for the national economy, radio and telephone installation of the country, participation in large-scale scientific experiments and solving specific problems related to the development of radio sports and its popularization among the population. This article reflects the design activities of the Crimean radio amateurs.

Keywords: amateur radio movement, radio equipment, telephonization.

For citation (IEEE): L. A. Puzankov, “Design Activity of the Crimean Radio Amateurs,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 570–586, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.40. (In Russ.).

References

- [1] L. A. Puzankov, *The history of the amateur radio movement and radio sports in the Crimea*. Simferopol: “Forma” publ. house, 2010. (In Russ.).
- [2] G. Chliyants, “Anniversaries and ‘round’ dates in the history of our hobby,” *Radio*, no. 1, pp. 47–50, 2022. (In Russ.).
- [3] G. Chliyants, *Leafing through the old “USSR Call Book (1925–1941)”*, Lvov: “Spolom” publ. house, 2008. (In Russ.).
- [4] L. Puzankov, “Prokopenko A. S. – the first radio amateur in the Crimea,” *Radio*, no. 11, pp. 50–51, 2018. (In Russ.).
- [5] L. Puzankov, “Samborsky Valentin Dionisovich – a man-legend,” *Radio*, no. 2, pp. 47–49, 2018. (In Russ.).

Information about the author

Leonid A. Puzankov, Member of the Russian Telegraph Club, Simferopol, Crimea, Russian Federation.

УДК 621.37-621.39(091)

Роберт Милликен и его роль в рождении современных радиоламп

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 27 июля 2022 г.

Отрецензировано: 30 июля 2022 г.

Принято к публикации: 30 июля 2022 г.

Аннотация: В статье основное внимание уделено работам Гарольда Вильсона, Роберта Милликена и его учеников, в частности, Луиса Беджемена и Харви Флетчера по определению величины элементарного электрического заряда. Обращено внимание на приоритет авторства в публикациях Р. Милликена и Х. Флетчера по результатам проведенных совместных исследований. Отмечена полемика вокруг результатов экспериментов Милликена по определению электрического заряда электрона. Описана ситуация с рекомендацией Р. Миллиkenом своего ученика Гарольда де Фореста Арнольда в исследовательскую группу WECo для разработки телефонного электронного ретранслятора.

Ключевые слова: электрон, заряд электрона, Гарольда Вильсона, Роберт Милликен, Луис Беджемен, Харви Флетчер, Гарольд де Форест Арнольд.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Роберт Милликен и его роль в рождении современных радиоламп // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 4. С. 587—610.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Роберт Милликен и его роль в рождении современных радиоламп / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 587—610.

1. Введение

В 1897 году британский экспериментатор Дж. Дж. Томсон открыл электрон и определил отношение его заряда e к массе m (e/m). Этот факт помог открытию электронного века. Отношение e/m электрона было связано с рядом других важных величин, представляющих интерес для ученых. Без знания заряда e и массы m электрона можно было получить только

набор относительных значений. Измерение заряда e электрона казалось невозможным. На рубеже 19 и 20 веков сам Дж. Дж. Томсон ($e = 6,5 \times 10^{-10}$ ед. CGSE, декабрь 1898), будучи руководителем Кавендишской лаборатории, а также другие ее сотрудники, пытались различными косвенными методами произвести измерения e , но результаты были неубедительны. Более того, пока не появился относительно прямой способ измерения заряда электрона, не было уверенности, что электрон действительно является «атомом электричества». Только через 13 лет требуемый метод был разработан американским физиком Робертом Милликеном (англ. *Robert Andrews Millikan*, 22.03.1868—19.12.1953). Его метод основывался на наблюдении за поведением капель масла в электрически заряженном поле.

Роберт Милликен придавал важное значение контактам университетской и промышленной науки. Сотрудничество Милликена с *West Electric Co.* в качестве консультанта по научным исследованиям оказало существенное влияние на рождение современных радиоламп. Это выразилось не только в фундаментальных исследованиях заряда электрона Милликеном, но и привлечении его учеников к научно-техническим разработкам в новой области знаний — радиоэлектронике.

2. Эксперимент Г. Вильсона

В 1903 году Гарольд Альберт Вильсон¹ (*Harold Albert Wilson*, 01.12.1874—1964), аспирант Дж. Дж. Томсона, следуя своему руководителю, провел исследование влияния электрического поля на заряженное облако водяных паров при воздействии рентгеновских лучей. Г. Вильсон усовершенствовал метод Дж. Дж. Томсона. Отличием работы Вильсона явилось определение скорости падения капли с учетом влияния на нее электрического поля. Это устранило необходимость измерения проводимости, создаваемой рентгеновскими лучами, а также сделало эксперимент независимым от точного расширения, используемого для получения капели. Эксперимент становится гораздо более аккуратным и самодостаточным. Ему нужно было просто измерить скорость падения капли с электрическим полем и без него. По словам Г. Вильсона, предложение использовать электрическое поле исходило первоначально от профессора Оксфордского университета Джона Таунсенда² (англ. *Sir John Sealy Edward Townsend*, (07.06.1868—16.02.1957) [1].

¹ Г. А. Вильсон не имеет никакого отношения к изобретателю туманной камеры Чарлзу Томсону Ризу Вильсону (англ. *Charles Thomson Rees Wilson*, 14.02.1869—15.11.1959).

² В 1897 г. Таунсенд разработал метод падающей капли для первого прямого определения элементарного ионного заряда e [2]. Его процедура, в которой использовались насыщенные пары воды, позже была усовершенствована и в конечном итоге привела к высокоточному методу капель масла, разработанному Робертом А. Милликеном из США.

До исследований Г. Вильсона [3] рядом ученых была определена величина заряда одного иона e , однако, полученные результаты разнились между собой. Таунсенд в статье [4] описал определение среднего заряда капель, составляющих облако, которое образуется при пропускании свежеприготовленного кислорода через воду. Было обнаружено, что этот заряд составляет около 3×10^{-10} ед. CGSE. Дж. Дж. Томсон в работах [5, 6] дал две оценки e , первая из которых основывалась на определении среднего заряда капель облака, образованного конденсацией водяного пара на ионах, образующихся в воздухе рентгеновскими лучами, а второе — аналогичным определением ионов, испускаемых цинковой пластинкой под действием ультрафиолетового света. Средний результат первого исследования составил $e = 6,5 \times 10^{-10}$ ед. CGSE [5], а второго $e = 6,8 \times 10^{-10}$ ед. CGSE [6]. В более ранних опытах Дж. Дж. Томсона [5, 6] облако формировалось в основном из отрицательных ионов, а не из положительных и отрицательных ионов, как предполагалось в то время, поэтому полученный им результат был почти в два раза больше, чем в работе [4].

Абсолютная величина e сама по себе представляет значительный интерес, так как из ее значения можно сразу определить число молекул в кубическом сантиметре газа. Этот факт указал на целесообразность проведения Г. Вильсоном нового экспериментального исследования для определения e другим методом, с целью уточнения величины заряда одного иона e , создаваемого рентгеновскими лучами.

Методика эксперимента была такой, как и у Дж. Дж. Томсона: основанная на факте, открытом Чарльзом Вильсоном, что ионы, образующиеся в воздухе под действием рентгеновских лучей, действуют как ядра при туманной конденсации водяного пара, когда в результате внезапного расширения происходит перенасыщение, превышающее определенную величину. Г. Вильсон предположил, что каждая из капель образовавшегося облака содержит один или несколько ионов. В этом случае капля, содержит один ион и, следовательно, имеет заряд e и массу m , которую можно определить, наблюдая за скоростью ее падения (скажем, v_1) в воздухе. Если теперь к этой капле приложить вертикальное электростатическое поле напряженностью X , то за счет поля на каплю будет действовать вертикальная сила, равная Xe , так что суммарная сила, действующая на каплю, будет равна $Xe + mg$, где g — ускорение свободного падения. Сила Xe считается положительной, когда ее направление совпадает с направлением силы веса mg . Теперь скорость установившегося движения капли в виде шара в вязкой жидкости пропорциональна действующей на него силе, так что скорость падения капли будет изменяться под действием электриче-

ского поля. Если скорость капли будет v_2 , то в этом случае можно записать следующее соотношение:

$$\frac{mg}{mg + Xe} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1)$$

Связь между m и v_1 определяется выражением [6, р. 561]:

$$m = 3,1 \times 10^{-9} \times v_1^{3/2}. \quad (2)$$

Тогда, подставляя (2) в (1), получим

$$e = 3,1 \times 10^{-9} \frac{g}{X} (v_2 - v_1) v_1^{1/2}. \quad (3)$$

Таким образом, если X известно и произведены измерения v_1 и v_2 , то подставив эти величины в (1) определим e .

Было обнаружено, что при использовании сильных рентгеновских лучей некоторые капли в облаке имели больший заряд, чем другие. На самом деле иногда оказывалось несколько наборов капель с зарядами, близкими к отношению 1:2:3. Таким образом, оказалось, что часть капель содержала один ион, часть — два иона и т. д. Это согласуется с наблюдением Дж. Дж. Томсона, что, когда сила рентгеновских лучей превышает определенную величину, то количество капель в облаках не увеличивается пропорционально количеству ионов, присутствующих в момент расширения. Поэтому Дж. Дж. Томсона использовал слабые лучи, так что в его экспериментах каждая капля, вероятно, содержала только один ион, что является необходимым условием успеха применяемого метода.

Принципиальные преимущества метода Г. Вильсона состояли в том, что не было необходимости оценивать ни количество капель в облаке, ни количество ионов, присутствующих в момент его образования, ни делать предположение, что каждая капля содержит только один ион. Обе эти оценки включают предположения, которые на практике могут быть верны лишь приблизительно, и всегда существует опасность того, что некоторые капли в облаке содержат более одного иона. Устройство аппарата, использовавшегося в эксперименте показано на рис. 1 [3].

В экспериментах всегда использовалось расширение от 16 до 17 см ртути, и все результаты относились к заряду отрицательных ионов. Все капли не всегда падали с одинаковой скоростью при приложении электрического поля. Так было почти всегда, но особенно это было заметно, когда использовались сильные лучи. Скорость падения самого многочисленного набора указывала на то, что капли в нем имели наименьшие заряды. Приведенные ниже наблюдения относятся только к этому набору. Поскольку облако

начинало испаряться вскоре после его образования, то очень важно было как можно быстрее измерить скорость его падения. Поэтому в эксперименте обычно допускалось падение облака только примерно на 0,5 см, а после этого прикладывалось электрическое поле в направлении, которое увеличивало скорость падения. Еще одна причина, по которой необходимо было использовать очень малое расстояние между дисками, заключалась в том, что доступное напряжение составляло всего 2000 вольт, так что если диски не находились близко друг к другу, электрическое поле между ними было недостаточно сильным, чтобы заметно изменить скорость их падения.

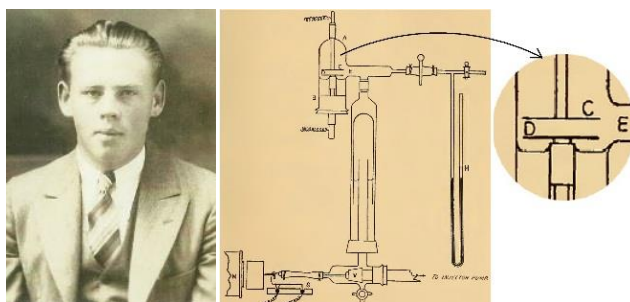


Рис. 1. Гарольд Альберт Вильсон и схема его установки для определения величины элементарного электрического заряда [3] (1903 г.). На схеме: C и D обкладки плоского конденсатора.

Fig. 1. Harold Albert Wilson and a diagram of its installation for determining the value of an elementary electric charge [3] (1903). In the diagram: C and D plates of a flat capacitor

Г. Вильсон сделал одиннадцать различных измерений и получил одиннадцать различных результатов. Его вычисления были сделаны исходя из усредненного поведения микроскопических капелек конденсата, а не одной капли, табл.1 [3].

Полученный разброс данных впоследствии был объяснен изменением количества ионизированных частиц в облаке водяных паров в зависимости от времени экспозиции рентгеновского излучения, а также расстояния до рентгеновской лампы.

Эксперимент, в котором Г. Вильсон вычислил скорость падения заряженных капель конденсата в электрическом поле между пластинами конденсатора в моменты его присутствия и отсутствия, позволил определить среднюю величину элементарного электрического заряда $e = 3,1 \times 10^{-10}$ ед. CGSE при давлении $p = 17$ см. Полученное значение элементарного заряда оказалось на 35 % меньше, чем ожидалось, от более точного, определенного позже Р. Милликеном (1911). Для того периода времени это было ценное определение величины заряда электрона.

Табл. 1. Данные Г. Вильсона, полученные в ходе эксперимента по определению величины заряда электрона. 1903 г.

Table 1. G. Wilson's data obtained during the experiment by determining the value of the electron charge. 1903

Расстояние между пластинами кон- денсатора d , cm	X , E.S. units	v_1 , cm/sec	v_2 , cm/sec	m , gram	e , E.S. units
0,45	13,3	$1,9 \times 10^{-2}$	$2,62 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-12}$	$2,3 \times 10^{-10}$
1,00	$\pm 6,7$		$4,36 \times 10^{-2}$	25×10^{-12}	$2,6 \times 10^{-10}$
0,50	13,3	$4,39 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-2}$	$28,6 \times 10^{-12}$	$4,4 \times 10^{-10}$
0,50	13,3	$2,68 \times 10^{-2}$	$3,41 \times 10^{-2}$	$13,6 \times 10^{-12}$	$2,7 \times 10^{-10}$
0,50	13,3	$3,4 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-2}$	$19,5 \times 10^{-12}$	$3,4 \times 10^{-10}$
0,55	12,1	$3,27 \times 10^{-2}$	$4,11 \times 10^{-2}$	$18,3 \times 10^{-12}$	$3,8 \times 10^{-10}$
0,40	16,7	$1,9 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-12}$	$3,8 \times 10^{-10}$
0,40	16,7	$1,93 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-2}$	$8,3 \times 10^{-12}$	$3,0 \times 10^{-10}$
0,40	16,7	$1,98 \times 10^{-2}$	$3,34 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-12}$	$3,5 \times 10^{-10}$
0,40	12,5	$1,26 \times 10^{-2}$	$2,00 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-12}$	$2,0 \times 10^{-10}$
0,44	15,2	$1,93 \times 10^{-2}$	$2,72 \times 10^{-2}$	$8,3 \times 10^{-12}$	$2,3 \times 10^{-10}$
				Mean.....	$3,1 \times 10^{-10}$

Г. Вильсону не удалось найти метод, который позволил бы провести все измерения на отдельной капле. После всех этих исследований вопрос о дискретности электрона и его заряде остался нерешенным.

Когда Г. Вильсон написал статью о проведенном исследовании [3], то Дж. Дж. Томсон сообщил ему о том, что недавно он сделал новое определение e своим оригинальным методом, но с использованием усовершенствованного аппарата, и попросил упомянуть полученный им результат в статье. Г. Вильсон очень любезно согласился на то, чтобы привести его в статье. Новое значение Дж. Дж. Томсон $e = 3,8 \times 10^{-10}$ ед. CGSE очень хорошо согласуется со средним результатом экспериментов Г. Вильсона, а именно, $e = 3,1 \times 10^{-10}$ ед. CGSE.

3. Эксперимент Р. Милликена и Л. Беджемена

После двенадцати лет работы (с 1896 г.) в Чикагском университете забеспокоился о своей исследовательской карьере помощник профессора физики Альберта Абрахама Майкельсона (*Albert Abraham Michelson*, 19.12.1852—09.05.1931), ассистент во вновь созданной *Ryerson Laboratory* в Чикагском университете Роберт Милликен, как он позже вспоминал в своей автобиографии [7], рис. 2. Он состоял в должности доцента с зарплатой до \$2000 и был недоволен своими достижениями в области физики. Ему требовался фундаментальный эксперимент, который бы принес оглушительный успех.

Внимание к проблеме определения величины элементарного электрического заряда появилось у Роберта Милликена не случайно. Произошло это еще во время годичного пребывания в октябре 1895 года в Берлине, где он прослушал цикл лекций Макса Планка (*Max Karl Ernst Ludwig Planck*, 23.04.1858—04.10.1947) о катодных лучах и заинтересовался их природой. Но наибольший интерес вызвала у Роберта Милликена основополагающая статья Дж. Дж. Томсона (1897 г.) по этой проблеме [8]. Эта статья стала отправной точкой в начале исследований Роберта Милликена по определению величины элементарного электрического заряда. Помимо Дж. Дж. Томсона, Бенджамин Франклин был источником вдохновения для Милликена, которому он приписал концептуализацию первой электрической частицы или атома [9].



Рис. 2. Лаборатория Ryerson Чикагского университета (1910 г.). Роберт Милликен (1925 г.).
Fig. 2. Ryerson Laboratory, University of Chicago (1910). Robert Millikan (1925)

Решение поставленной задачи происходило в два этапа. На каждом этапе в эксперименте вместе с Р. Милликоном принимали участие его аспиранты, которые писали свои научные диссертации для получения степени доктора философии по физике (*PhD*).

В конце 1907 года Р. Милликен вместе с аспирантом Луисом Беджеменом³ (*Louis Begeman*, 1865—1958) осуществили по методике Г. Вильсона (*Harold Albert Wilson*) эксперимент по определению электрического заряда частиц водяного пара (с учетом модернизации оборудования). Усовершенствованная установка Вильсона имела более высокий потенциал на пластинах конденсатора (3000 В), что позволяло не только замедлить скорость падения облака, но и при желании фактически обратить его вспять. Высокий потенциал, кроме прочего, позволил уменьшить в эксперименте ошибки из-за испарения.

³ После защиты диссертации Луис Беджемен принял должность профессора физики в педагогическом колледже штата Айова (*Iowa State Teachers College*), где проработал до 1957 г. Его жизнь была связана с колледжем в течение почти 58 лет, с учетом того, что он преподавал в нем до аспирантуры с 1899 г.

Во время проведения эксперимента некоторые заряженные капли двигались вверх, некоторые быстро двигались вниз, в то время как незаряженные капли оставались незатронутыми и продолжали дрейфовать вниз. Несколько капель, которые несли заряд определенной величины, и сила тяжести на них почти равнялась силе электрического поля, оставались в поле зрения. Изменяя потенциал пластин от 1600 В до 3000 В, Милликен мог просто уравновесить эти капли. Эта ситуация оказалась значительным улучшением эксперимента, поскольку позволила проводить все измерения на одной капле. Используя этот метод сбалансированных капель, Милликен смог наблюдать свойства отдельных ионов и определить, несут ли разные ионы один и тот же заряд.

Расстояние между пластинами конденсатора в камере Вильсона было установлено фиксированным — 5 мм, а разность потенциалов на конденсаторе колебалась от 1600 до 3000 вольт.

Заряды создавались ионизацией нейтральных молекул воздуха потоком радиоактивного излучения. В качестве ионизатора был использован кусок минерала радия весом 200 г, вместо рентгеновского излучения, которое присутствовало в эксперименте Г. Вильсона. При этом измерялся заряд ионов, захваченных каплями.

В результате проведенного эксперимента после обработки полученных данных средняя величина заряда электрона составила $e = 4,03 \times 10^{-10}$ ед. CGSE.

Летом 1908 года Р. Милликен с Л. Беджеменом продолжили совершенствовать методику проведения эксперимента. Одна из интересных особенностей этого периода заключается в определении заряда отдельно падающих капель водяного облака в условиях воздействия и отсутствия электрического поля. Было проведено 400 пар наблюдений с электрическим полем и без него при расстоянии между пластинами конденсатора в паровой камере 0,575 см и давлении в ней $p = 17$ см. После обработки данных средняя величина заряда электрона составила $e = 4,54 \times 10^{-10}$ ед. CGSE. При этом было отмечено, что скорость падения капель была очень небольшой, в связи с этим возможно полученное значение имеет некоторую погрешность из-за неучета процесса испарения. Другим важным результатом стал факт того, что единица положительного электростатического заряда имеет такую же величину, что и отрицательная.

В первых числах июня 1909 года в *Ryerson Laboratory* была установлена новая более совершенная установка для определения заряда электрона методом облака, которая отличалась по конструкции от ранее применявшейся для этих целей, рис. 3.

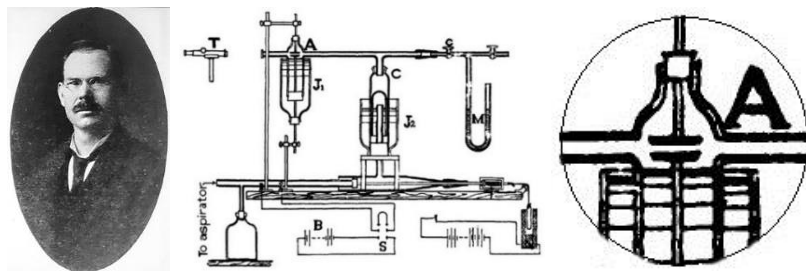


Рис. 3. Луис Беджемен. Схема установки Р. Милликена и Л. Беджемена для определения заряда электрона. 1909 г. [10]. На схеме: А — плоский конденсатор

Fig. 3. Louis Begeman. Scheme of R. Milliken and L. Bedgeman setup for determining the charge of an electron in 1909 [10]. In the diagram: A – flat capacitor

Ученые усовершенствовали методику проведения эксперимента. В процессе исследования было установлено, что существует разница между массовой скоростью облака и скоростью отдельной капли. Милликен быстро понял, что измерение заряда отдельных ионизированных капель гораздо лучше, чем определение среднего заряда капель в облаке. Оказалось, что физическо-химические параметры облака в большей степени зависят от испарения [11, 12]. Все это было в дальнейшем учтено при определении заряда электрона. Расчетная величина элементарного электрического заряда в этом эксперименте получилась $e = 4,668 \times 10^{-10}$ ед. CGSE, что отличается от более точного значения, полученного позже Р. Миллиkenом (1911) всего на 2,29 %. Было также установлено, что заряды водяных капель были кратны наименьшему электрическому заряду, то есть заряду электрона. Однако самым важным аспектом этих экспериментов было наблюдение Милликена того, как поднимающаяся капля внезапно меняет свою скорость. Изменение скорости капли можно было бы легко вызвать, если поместить рядом с ней радиоактивный источник. Это говорило о том, что капля «захватила» ион, и тем самым изменила свой заряд и соответственно скорость.

В июле 1910 года материалы диссертации Л. Беджемена были изданы в виде препринта⁴. Вскоре в Чикагском университете состоялась успешная защита его докторской диссертации на тему «Экспериментальное определение заряда электрона облачным методом» (*An Experimental*

⁴ Препринт (реже *предпубликация*) - научное издание, обычно небольшого объема, которое посвящено какой-либо теме, с которой автор хочет ознакомить заинтересованных лиц и специалистов. Выпускается в свет до публикации статьи в рецензируемом научном журнале или до выхода полноценной монографии. Как правило, препринты не рецензируются перед выходом в свет, поэтому они могут содержать ошибки и поэтому зачастую не учитываются в отчетах в качестве публикаций. Электронный препринт (препринт, размещаемый в Интернете) иногда называют е-принтом.

Determination of the Charge of an Electron by the Cloud Method) и он получил степень доктора философии по физике (*PhD*). Материалы диссертации были также опубликованы в журнале Американского физического общества (*The American Physical Society*) «*Physical Review*» [10]. Л. Беджемену на получение фундаментального результата понадобилось почти 4 года непрерывной кропотливой работы (1907—1910).

4. Эксперимент Р. Милликена и Х. Флетчера

Осенью 1909 года Милликен и Беджемен завершили цикл экспериментальных работ по измерению элементарного электрического заряда (заряда электрона) на основе водяных капель [13]. В этот период времени в аспирантуру Чикагского университета, благодаря поддержке Роберта Милликена, был принят недавний выпускник Университета Бригама Янга⁵ (*Brigham Young University* или *BYU*, город Прово (англ. Provo) в округе Юта, штат Юта, США) Харви Флетчер (*Harvey Fletcher*, 11.09.1884—23.07.1981), рис. 4.

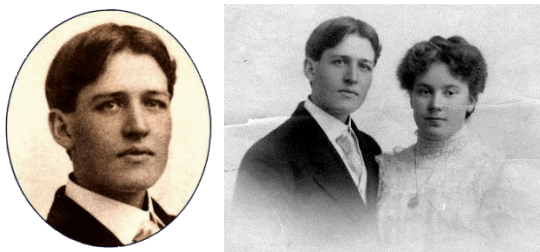


Рис. 4. Харви Флетчер с женой Лореной Чипман вскоре после их свадьбы. Сентябрь 1908 г.

Fig. 4. Harvey Fletcher and wife Lorena Chipman shortly after their wedding. September. 1908

Харви Флетчер был достаточно амбициозным и самолюбивым молодым человеком. В декабре 1909 года ему удалось договориться с Милликеном о встрече, на которой планировал обсудить тему его будущей докторской диссертации (*PhD*). Встреча была назначена в лаборатории, где в это время Милликен с Беджеменом проводили эксперименты по определению заряда электрона. Обсуждение коснулось повышения точности эксперимента по методу облака. Ученые пришли к выводу, что капельный метод имеет один серьезный недостаток, который связан с быстрым испарением водяных капель. Из этого следовало, что для эксперимента следует найти такие вещества, которые испаряются более медленно, чем вода. Милликен поручил Флетчеру разработать методику эксперимента с использованием различных веществ, в частности, ртути, глицерина и масла.

⁵ В настоящее время университет является третьим по величине частным университетом в США.

Распылять вещества в камере было решено пульверизатором. Это устройство использовал в своих исследованиях по броуновскому движению еще в 1908 году Дж. Ли (*J. Y. Lee*), другой аспирант Милликена.

Флетчер нашел оригинальный выход из ситуации. Он пошел в аптекарский магазин, где купил распылитель для духов и немного масла для смазки часов. Пробное распыление масла в камере установки произвело фурор. В микроскоп можно было наблюдать броуновское движение медленно падающих капель масла. Милликен увидев все это воочию, сразу прекратил все работы с водяными каплями и сосредоточился на совершенствовании метода на основе падения масляных капель. При помощи пульверизатора удалось получить капли масла радиусом 1—2 мкм.

Экспериментальная установка представляла собой большой и емкий плоский конденсатор из двух металлических пластин, рис. 5. На верхней пластине располагалась камера, в которой происходило сначала распыление воды, а затем масла. Образовавшиеся капельки жидкости заряжались в ионизированном воздухе одним или несколькими электронами. Капли жидкости электризовались благодаря трению.

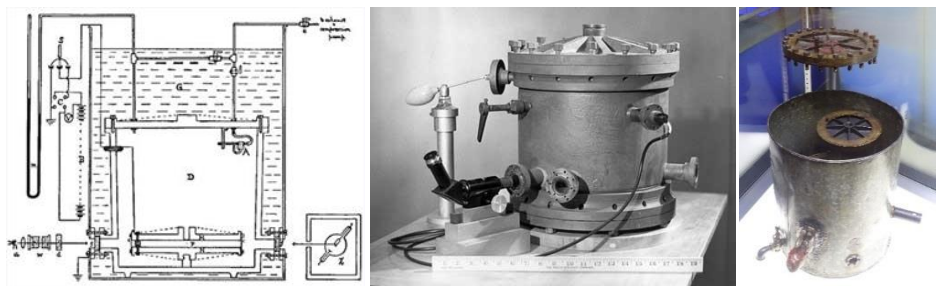


Рис. 5. Схема устройства аппарата Милликена «Капли масла» [14]. Аппарат Милликена «Капли масла», ок. 1916 г., использовался Робертом Милликеном и Харви Флетчером в нескольких экспериментах по измерению заряда электрона.

Музей науки и промышленности (Чикаго).

Fig. 5. Scheme of the apparatus of the Millikan apparatus «Drops of oil» [14]. Millikan's Oil Drop apparatus, ab. 1916, used by Robert Millikan and Harvey Fletcher in several experiments to measure an electron's charge. Museum of Science and Industry (Chicago)

Под действием веса капли через отверстие в пластине конденсатора попадали в пространство между его обкладками, на которые подавалось постоянное напряжение от мощной батареи. Положение капель в пространстве конденсатора определялось с помощью катетометра. Исходя из этого определялась скорость ее движения с одной стороны под действием силы тяжести, а с другой — под действием силы электрического поля. Меняя направление электрического поля, можно было заставить одну и ту

же каплю двигаться вверх или вниз по несколько раз. Это давало возможность определить заряд капли с большой точностью.

В эксперименте при постепенном понижении внешнего напряжения происходило периодическое «выпадение в осадок» капель масла. По градиентам шкалы напряжения, при которых осаждается очередная порция аэрозоля, судили об абсолютной величине единичного заряда, поскольку дробного заряда наэлектризованные капельки нести на себе не могут. Повторив эксперимент для нескольких капель, ученые подтвердили, что общий заряд капель складывается из нескольких элементарных. Отсюда следовало, что величина заряда капель будет кратна единичному заряду электрона.

5. Определение величины элементарного электрического заряда

Значение величины элементарного электрического заряда Р. Милликен получил, основываясь на подходе Г. Вильсона [15]. Он также рассмотрел скорость падения капли в электрическом поле, только не водяного пара, а масла. Скорость падения масляной капли массой m в пространстве между обкладками конденсатора зависит от воздействия на нее силы тяжести и силы электрического поля напряженностью E . Если v_1 – скорость капли только от действия силы тяжести, а v_2 – скорость капли, когда, кроме силы тяжести, на нее действует еще и электрическое поле напряженностью E и капля при этом движется в верх. В этом случае можно записать следующее соотношение:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{Ee_n - mg}, \quad (4)$$

откуда

$$e_n = \frac{mg}{E} \left(\frac{v_1 + v_2}{v_1} \right). \quad (5)$$

Из (5) видно, что для вычисления электрического заряда масляной капли необходимо из эксперимента определить скорости v_1 и v_2 по вышеописанной методике.

Если считать, что масляная капля представляет собой небольшую сферу радиусом a и падает под действием собственного веса, то установившаяся скорость достигается, когда сила Стокса ($F_C = 6\pi\eta av_1$) совместно с силой Архимеда ($F_A = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho g$) точно уравновешивается силой ее веса ($P = mg = \frac{4}{3}\pi a^3 \sigma g$). Тогда из условия равновесия небольшой масляной капли, находящейся под действием силы тяжести, силы Стокса и силы однородного электрического поля напряженностью E , найдем скорость v_1 :

$$v_1 = \frac{2}{9} \frac{ga^2}{\mu} (\sigma - \rho). \quad (6)$$

где σ — плотность масла, ρ — плотность воздуха, μ — коэффициент вязкости воздуха, g — ускорение свободного падения.

Теперь, подставив (6) в (5), после преобразований получим:

$$e_n = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{9\mu}{2} \right)^{3/2} \left(\frac{1}{g(\sigma - \rho)} \right)^{1/2} \frac{(v_1 + v_2)v_1^{1/2}}{E}. \quad (7)$$

Формула (7) справедлива только для очень малых масляных капель при их равномерном движении. Эта формула приводится в статье Р. Милликена, из нее он и вычислял величину электрического заряда масляных капель. Одной из особенностей исследования было то, что на каплях находилось неопределенное число электрических зарядов, величины которых невозможно было вычислить. Если для всех вычисленных значений зарядов масляных капель можно найти наибольший общий делитель, то тогда заряд капли можно представить в виде $e_n = n \cdot e$, где $n=1,2,3,\dots$, а e — элементарный электрический заряд. То есть различные капли могут нести на себе заряды, кратные e . В рамках классической электродинамики не существует заряда, выраженного дробным числом элементарных зарядов.

Милликен после обработки экспериментальных данных определил, что заряд на любой капле масла всегда представляет собой целое кратное величины $1,5924(17) \times 10^{-19}$ Кл ($4,7772 \times 10^{-10}$ ед. CGSE), а это и есть заряд 1 электрона. Тем самым был установлен фундаментальный факт, что электрический заряд электрона является дискретным, а также найдена количественная характеристика дискретности. Этим подтверждалось существование электронов.

Милликен показал, что положительные и отрицательные заряды всегда кратны по величине одной и той же единице, то есть заряду электрона. Это представление до сих пор еще не опровергнуто какими-либо опытными данными.

Полученное Милликеном значение электрона в опыте 1910 года на 1 % отличается от современного значения $1,602176487(40) \times 10^{-19}$ Кл. ($e = 4,8 \times 10^{-10}$ ед. CGSE). Заряд электрона обычно принимают за элементарный электрический заряд.

Милликен сразу понял важность сделанного открытия для понимания основ природы электричества. Научное открытие принесло ученым известность. Многие видные ученые приходили в лабораторию понаблюдать за экспериментом. Нанес визит и Чарльз П. Штейнмец (англ. *Charles Proteus Steinmetz*, нем. *Carl August Rudolph Steinmetz*), рис. 6, «чародей» компании

General Electric, который не верил в существование электронов. Он мог объяснить все электрические явления в терминах природы теории эфира. Увидев воочию падение малых капель масла, он покачал головой и сказал: «Я никогда бы не поверил в это. Я никогда не поверил бы», а затем тихо ушел [16].



Рис. 6. Чарльз П. Штейнмец.
1915 г.

Fig. 6. Charles P. Steinmetz.
1915

С той ночи электрон, который до того времени в основном был игрушкой ученых, явно вошел в поле деятельности в качестве мощного средства для удовлетворения коммерческих и промышленных потребностей человека. Электронная лампа-усилитель теперь лежит в основе всей области связи, и это, в свою очередь, по крайней мере отчасти сделало возможным его применение в дюжине других областей. Это был великий день как для науки, так и для промышленности, когда они объединились благодаря разработке лампового электронного усилителя.

6. Публикация научных результатов

Вскоре статьи с описанием проведенного эксперимента Милликена и Флетчера, а также различных его аспектов были подготовлены для публикации в научных журналах. Основная статья о эксперименте с масляными каплями вышла за подписью Милликена [15], последующие две статьи были совместными (Милликен и Флетчер [17, 18]), и три — за подписью одного Флетчера [19—21].

Информация о делении научного материала между учеными и приоритетах ее публикации была изложена в опубликованных мемуарах Флетчера, которые появились через один год после его смерти [16, р. 43—47]. Если верить этим мемуарам, то инициатива в этом вопросе принадлежала Р. Милликену. Сейчас трудно сказать, насколько приведенная в них информация соответствует действительности. Возникает один вопрос, касающийся научной этики: почему он не опубликовал свои мемуары, когда был жив Милликен?

В своих мемуарах Флетчер (рис. 7) написал, что он наивно думал, что будет соавтором Милликена по всем публикациям. Радужные надежды его рассеялись, когда увидел профессора Милликена на крыльце своего дома. В скромной квартире аспиранта профессор расставил все точки над «i» в вопросе научных публикаций.

Хотя Флетчер и был разочарован тем, что его не включили в качестве соавтора в пионерскую работу, он в дальнейшем не испытывал ника-

кой неприязни к профессору Милликену. Милликен не остался в долгу. Он нашел Флетчеру хорошо оплачиваемую работу для покрытия всех его личных и аспирантских расходов в течение последних двух лет. Их крепкая дружба продолжалась на протяжении всей их жизни.



Рис. 7. На фото слева: Флетчер (слева крайний) и Крендалл (слева второй). Середина 30-х годов 20 века. На фото справа: Флетчер в 1936 году с Милликеном (слева от него) и дирижером Филадельфийского оркестра Леопольдом Стоковски, с которым он работал над записывающей аппаратурой [16].

Fig. 7. In the photo on the left: Fletcher (far left) and Krendall (second from left). Mid 1930s.

In the photo on the right: Fletcher in 1936 with Millikan (to his left) and conductor of the Philadelphia Orchestra Leopold Stokowski, with whom he worked on recording equipment [16]

Статья Р. Милликена с первыми предварительными результатами, была опубликована в сентябре 1910 в журнале *Science* [22], а полный формат статьи вышел в апреле 1911 года в журнале *Physical Review* [15]. До публикации результатов экспериментов по определению электрического заряда электрона Милликен не был широко известен в ученой среде, но после появления его фундаментальной работы его имя заняло достойное место в когорте выдающихся физиков.



Рис. 8. Австрийский физик Феликс Эренхафт.

Fig. 8. Austrian physicist
Felix Ehrenhaft

В тот же период времени, когда вышла статья Милликена в журнале *Science* [22], австрийский физик Феликс Эренхафт (*Felix Ehrenhaft*, 24.04.1879—04.03.1952, рис. 8) опубликовал статью, в которой утверждал о существовании еще меньшего элементарного электрического заряда, чем электрон [23]. Дебаты Эренхафта с Милликеном, не позволили последнему получить Нобелевскую премию по физике 1920 года из-за их нерешенности.

Начавшаяся полемика заставила Милликена вернуться к работе над новой серией эксперимен-

тов. К весне 1912 года он получил данные, которые должны были поставить точку в «окончательном абсолютном определении численного значения электрона» (*the final, absolute determination of the numerical value of the electron*). Результаты были опубликованы в августе 1913 года [14].

Споры в конечном итоге пошли на убыль, так как большая часть физиков верила в непоколебимость результатов Милликена. По этому поводу в конце 1940 г. Эйнштейн писал: «Относительно его результата о элементарном заряде, то я не верю его вычислениям [результатам физика Феликса Эренхафта — *авт.*], но я считаю, что никто не имеет четкого представления о причинах, приведших к очевидным суб-электронным зарядам (*sub-electronic charges*), которые он обнаружил в ходе кропотливого исследования» [24].

В 1923 году за научные исследования, проведенные в первом десятилетии 20 века, а также за проверку эйнштейновской корпускулярной теории света Милликен получил Нобелевскую премию по физике с формулировкой: «за работы по определению элементарного электрического заряда и фотоэлектрическому эффекту». В своей Нобелевской лекции он сказал, что «наука шагает вперед на двух ногах — на теории и эксперименте... Иногда вперед выдвигается одна нога, иногда другая, но неуклонный прогресс достигается лишь тогда, когда шагают обе» [25—26].

Эксперимент Милликена с масляными каплями был повторен в 1939—1940 гг. сотрудниками Университета Мельбурна преподавателем естественной философии (*Natural Philosophy*) В. Д. Хоппером (*V. D. Hopper*, 1913—??) и профессором Томасом Леби (*Thomas H. Laby*, 1880—1946). Это, по всей видимости, был последний случай, когда эксперимент был выполнен «основательно» и тщательно профессиональными физиками, а вся информация об этом нашла отражение в научных журналах [27, 28]. Время наблюдения за каплями в эксперименте было чрезвычайно коротким, так как использовались масла с малым испарением, такие как касторовое и апиэзонное масло. Капли из таких масел были способны нести большой заряд. Для эксперимента потребовалось 26 капель с радиусом от 3 до 10 мкм, но распылители давали гораздо большие капли. Обработка данных эксперимента показала, что погрешность в значении e , найденном методом капель, в основном была связана со значением вязкости воздуха. Значение e , полученное рентгеновским методом, оказалось не связанным с этим источником погрешностей.

7. Превратности судеб аспирантов Роберта Милликена

В университете Чикаго в то время, когда под руководством профессора Милликена проводился эксперимент с каплями масла, параллельно

шли другие научные исследования, в частности, связанные с законом Стокса. Занимался этой работой другой его аспирант, по фамилии Гарольд де Форест Арнольд (*Harold De Forest Arnold*, 03.09.1883—10.07.1933).

В начале своей научной карьеры Г. Арнольд был в аспирантуре у физика А. А. Майкельсона (рис. 9), но маститый ученый не уделял должного внимания своему ученику и не интересовался его исследованиями. Молодой Арнольд не смирился с таким положением дел и пришел к Р. Милликену, которому заявил, что собирается покончить жизнь самоубийством, так как он не в состоянии соответствовать предъявляемым требованиям Майкельсона. Роберт Милликен, спросив: «Не шутка ли это?» отнесся к этому серьезно и попросил повременить того с его намерениями.

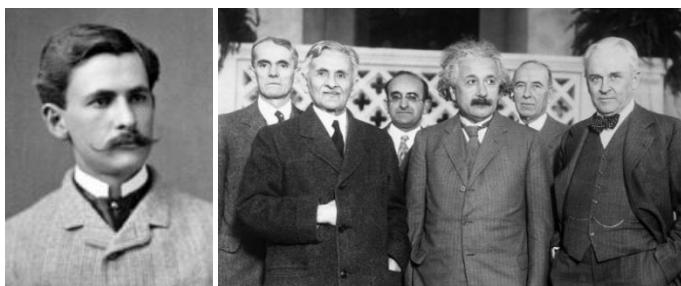


Рис. 9. Альберт Абрахам Майкельсон. Первый ряд слева Альберт А. Майкельсон, Альберт Эйнштейн и Роберт А. Милликен в Калифорнийском технологическом институте (1931 г.).

Fig. 9. Albert Abraham Michelson. First row from the left Albert A. Michelson, Albert Einstein and Robert A. Millikan at Caltech (1931)

После этого Р. Милликен бросился к Майкельсону и попросил его позволить ему взять на себя научное руководство исследованиями Арнольда. Для того, чтобы не обидеть Майкельсона, он спросил его с таким трепетом, что тот вынужден был сказать: «Ради Бога, заведи его с моих рук» [29].

Пионерские исследования в университете Чикаго находились в поле зрения *American Telephone & Telegraph Company* и *Western Electric Company*. В компании формировалось новое научное направление по электронике и разработке экспериментальных конструкций усилителей электрических сигналов. Поскольку никто из сотрудников компании не имел достаточных знаний в области молекулярной физики, то научный менеджер при главном инженере компании AT&T Фрэнк Джеветт обратился за помощью к Роберту Милликену с просьбой порекомендовать ему одного из лучших своих студентов с соответствующей квалификацией.

В начале Милликен рекомендовал доктора Флетчера, который первым убедительно продемонстрировал существование электрона, измерив его квантованный заряд, работая над докторской диссертацией. В 1911 году

Флетчеру после защиты диссертации была присуждена ученая степень доктора философии (*PhD*) в Чикагском университете. В том же году он получил предложение о работе от *Western Electric Company*, но, не теряя вре-



Рис. 10. Гарольд де Форест Арнольд.

Fig. 10. Harold De Forest Arnold

мени, вместо этого в 1911 году вернулся в город Прово (*Provo*) и возобновил свою преподавательскую карьеру в университете имени Бригама Янга (*Brigham Young University*). В университете он занял должность заведующего кафедрой физики. Позже Флетчер жалел о своем отказе. В ответ Роберт Милликен порекомендовал своего ученика Гарольда де Фореста Арнольда (*Harold De Forest Arnold*, 03.09.1883—10.07.1933, рис. 10), который недавно получил докторскую степень (*PhD*) по физике в университете Чикаго [30]. Арнольд принял предложение, и в течение трех лет, опираясь на исследования в Чикаго, разработал вакуумную электронную лампу.

Харви Флетчер, узнав об этом, несколько задумчиво сказал: «Это, возможно, было мое изобретение, а не его, если бы я согласился на работу, предложенную тогда» [31].

Флетчер, работая в университете, продолжал интересоваться электронной физикой и той ролью, которую электроника будет играть в человеческом общении. Он понял, что его потенциал не будет полностью реализован в Университете Бригама Янга. Предложение Джеветта Флетчеру присоединиться к *AT&T* возобновлялось в январе каждого года. Таким образом, в 1916 году благодаря этой сильной ежегодной поддержке со стороны Джеветта, Флетчер пришел в *Western Electric Research Laboratories* и работал с Ирвингом Крендаллом⁶ (*Crandall Irving B.*, 1890—1927), который стал его наставником и коллегой по акустике. Среди своих коллег Флетчер был известен как дядя Харви. Это прозвище ему нравилось и доставляло удовольствие его коллегам. Помимо своих профессиональных успехов, у дяди Харви была исключительно хорошо сбалансированная и приносящая удовлетворение личная жизнь. У Флетчера и его жены Лорены Чипман было шестеро детей — пятеро

⁶ Крендалл скончался 22 апреля 1927 г., как раз перед вторым изданием его книги о речи (*Crandall Irving B. Theory Of Vibrating Systems And Sound. New York. Publisher D. Van Nostrand Company. 1926. 296 p.*), и Флетчер взял на себя работу Крендалла по улучшению разборчивости и качества телефонной сети. Упомянутая книга Крендела считается классическим трудом инженерной мысли в области акустики. Перевод этого труда на русском языке издавался неоднократно, в частности, под названием: Крендалл И. Б. Акустика. Пер. с англ. Изд. 5. М.: Изд-во ЛЕНАНД. 2017. 168 с. URL: [https:// soundmain.ru/resources/krendall-i-b-akustika.398/download](https://soundmain.ru/resources/krendall-i-b-akustika.398/download) (27.07.2022).

сыновей⁷ и одна дочь, которые выросли и стали достойными членами общества.

Справедливости ради следует отметить, что именно Милликен организовал для Флетчера переход в *Bell Telephone Laboratories*, где он стал, по словам доктора Джонта Аллена⁸ (*Jont Allen B.*), «исключительной интеллектуальной силой в развитии современных средств связи, акустики и телефонии» [32].

8. Заключение

Эксперимент Милликена с каплей масла, как это обычно бывает в процессе развития науки, был разработан на основе идей и работ ученых, которые предшествовали ему. Каждая модернизация Милликоном экспериментальной техники, каждое усовершенствование его аппарата, каждое написанное им слово, публичное или частное, были направлены только на одну цель: максимально точное измерение заряда электрона.

В науке есть много творческих аспектов, в частности, творчество Милликена относится к области экспериментальных разработок, то есть к созданию новой методики и оборудования для надежного измерения того, что не удалось сделать другим. Милликен был экспериментатором, и поэтому его работа была полностью эмпирической. Его исследования привели к выводу, что замысел всего, от атома до Вселенной, был работой Бога, которого Милликен называл «благодетельным творцом» и «Великим Архитектором» в знак признания Его творческой силы и Его роли в творении [7, p. 274].

Личность Милликена была более сложной, чем признают его недоброжелатели. Как и у любого, у него были свои сильные стороны и свои недостатки. Он был недостаточно великодушен, чтобы ставить интересы своего ученика выше своих собственных в критический момент своей карьеры. Описывая результаты своего эксперимента с каплей масла, он несколько увлекся, доказывая правильность своей эмпирической поправки к закону Стокса.

Настоящим соперником Милликена был не злополучный Эренхафт, а скорее Дж. Дж. Томсон — не потому, что они расходились во мнениях с научной точки зрения, а потому, что оба хотели, чтобы их запомнили в истории как отцов электрона.

⁷ Один из его сыновей, Джеймс Чипман Флетчер, два срока, с 1971 по 1977 год, занимал должность директора Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА), а затем с 1964 по 1971 год был президентом Университета штата Юта.

⁸ Джонта Аллен был сотрудником отдела акустических исследований в *AT&T Laboratories* с 1974 по 1997 год.

Список литературы

1. Thomson G. P. Harold Albert Wilson. 1874–1964. Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society. November 1965. Vol. 11. P. 195.
2. Townsend J. S. On electricity in gases and the formation of clouds in charged gases // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1897. Vol. 9. P. 244–258.
3. Wilson H. A. A Determination of the Charge on the Ions Produced in air by Rontgen Rays // Philosophical Magazine. Series 6. 1903. Vol. 5. P. 429–441.
4. Townsend J. S. Electrical properties of newly prepared gases // Philosophical Magazine. Series 5. February 1898. Vol. 45. P. 125–151.
5. Thomson J. J. On the Charge carried by the Ions produced by Röntgen Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. December 1898. Vol. 46. No. 283. P. 528–545.
6. Thomson J. J. On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. December 1899. Vol. 48. No. 295. P. 547–567.
7. Millikan R. A. The autobiography of Robert A. Millikan. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc, 1950. P. 69.
8. Thomson J. J. Cathode Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. 1897. Vol. 44. P. 293–316.
9. Millikan R. A. The electron : Its isolation and measurement and the determination of some of its properties. Chicago: University of Chicago Press, 1917. P. 15.
10. Begeman L. An Experimental Determination of the Charge of an Electron by the Cloud Method // Physical Review. Series 1. July 1910. Volume 31, iss. 1. P. 41–54.
11. Millikan R. A., Begeman L. On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas // Physical Review. 1908. Vol. 26, no. 2. P. 197–198.
12. Heering P., Osewold D. Constructing Scientific Understanding Through Contextual Teaching. Frank & Timme GmbH, 2007. P. 345.
13. Millikan R. A. A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of That Charge // Philosophical Magazine. Series 6. February 1910. Vol. 19, no. 110. P. 209–228.
14. Millikan R. A. On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant // Physical Review. August 1913. Vol. II, no. 2. P. 122.
15. Millikan R. A. The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of Its Charge, and the Correction of Stokes's Law // Physical Review. Series 1. April 1911. Vol. 32, no. 4. P. 349–397.
16. Fletcher H. My work with Millikan on the oil-drop experiment // Physics Today. June 1982. P. 46.
17. Millikan R. A., Fletcher H. Causes of Apparent Discrepancies and Recent Work on the Elementary Electrical Charge // Physikalische Zeitschrift. January 1911.
18. Millikan R. A., Fletcher H. On the Question of Valency in Gaseous Ionization // Philosophical Magazine. Series 6. June 1911. Vol. 21, no. 126. P. 753–770.
19. Fletcher H. Some Contributions to the Theory of Brownian Movements, with Experimental Applications // Physikalische Zeitschrift. January 1911.
20. Fletcher H. A Verification of the Theory of Brownian Movements and a Direct Determination of the Value of Ne for Gaseous Ionization // Physical Review. Series I. August 1911. Vol. 32, iss. 2. P. 239.
21. Fletcher H. Vérification de la théorie du mouvement brownien et détermination de la valeur de Ne pour l'ionisation des gaz // Le Radium. 1911. Vol. 8. P. 279–286.
22. The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of It's Charge and the Correction of Stokes' Law (Preliminary Report) // Science. September 30, 1910. Vol. 32, no. 822. P. 436–448.

23. Ehrenhaft F. Über die Messung von Elektrizitätsmengen, die kleiner zu sein scheinen als die Ladung des einwertigen Wasserstoffions oder Elektrons und von dessen Vielfachen abweichen. 1910. Wien, Kais. Akad. Wiss. Sitzber. math.-nat. Kl. Vol. 119 (IIa). H. 815—867.
24. Magalhães S. G. A debate on magnetic current : the troubled Einstein–Ehrenhaft correspondence // The British Journal for the History of Science. September 2011. Vol. 44, iss. 3. P. 377.
25. Goodstein D. In the Case of Robert Andrews Millikan // American Scientist. Jan–Feb 2001. P. 54–60.
26. Милликен Роберт Э. В кн. : Лауреаты Нобелевской премии. Энциклопедия. Том 2. М—Я. М. : Прогресс, 1992. С. 79—82.
27. Laby T. H., Hopper V. D. The Electronic Charge // Nature. 1939. Vol. 143, iss. 3613. P. 157—158.
28. Laby T. H., Hopper V. D. The Electronic Charge // Nature. 1940. Vol. 145, iss. 3685. P. 932—933.
29. Darrow Karl. Oral History Transcript. URL: <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4567-1> (25.07.2022).
30. Harold De Forest Arnold // Review of Scientific Instruments. August 1933. Vol. 4, no. 8. P. 421.
31. Harvey Fletcher 1884—1981. In : A Biographical Memoir by Stephenh Fletcher. 1992. National Academy of Sciences Washington. P. 172.
32. Allen J. B. Harvey Fletcher’s role in the creation of communication acoustics // Acoustical Society of America. April 1996. Vol. 99, no. 4. Pt. 1. P. 1837.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Robert Millikan and His Role in the Birth of Modern Radio Tubes

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: July 27, 2022

Peer-reviewed: July 30, 2022

Accepted: July 30, 2022

Abstract: The article focuses on the work of Harold Wilson, Robert Millikan and his students, in particular, Louis Begeman and Harvey Fletcher on determining the magnitude of an elementary electric charge. Attention is drawn to the priority of authorship in the publications of R. Millikan and H. Fletcher based on the results of joint research. A controversy was noted around the results of Millikan's experiments to determine the electric charge of an electron. The situation with R. Millikan's recommendation of his student Harold de Forest Arnold to the WECO research group for the development of a telephone electronic repeater is described.

Keywords: electron, electron charge, Harold Wilson, Robert Millikan, Louis Begeman, Harvey Fletcher, Harold de Forest Arnold.

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Robert Millikan and His Role in the Birth of Modern Radio Tubes," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 587–610, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.41. (In Russ.).

References

- [1] "Harold Albert Wilson, 1874–1964," *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 11, pp. 186–201, Nov. 1965, doi: 10.1098/rsbm.1965.0013.
- [2] J. S. Townsend, "On electricity in gases and the formation of clouds in charged gases," *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 9, pp. 244–258, 1897.
- [3] H. A. Wilson, "XLII. A determination of the charge on the ions produced in air by Röntgen rays," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 5, no. 28, pp. 429–441, Apr. 1903, doi: 10.1080/14786440309462941.
- [4] J. S. Townsend, "XIII. Electrical properties of newly prepared gases," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 45, no. 273, pp. 125–151, Feb. 1898, doi: 10.1080/14786449808621115.
- [5] J. J. Thomson, "LVII. On the charge of electricity carried by the ions produced by Röntgen rays," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 46, no. 283, pp. 528–545, Dec. 1898, doi: 10.1080/14786449808621229.
- [6] J. J. Thomson, "LVIII. On the masses of the ions in gases at low pressures," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 48, no. 295, pp. 547–567, Dec. 1899, doi: 10.1080/14786449908621447.

- [7] R. A. Millikan, *The autobiography of Robert A. Millikan*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc, p. 69, 1950.
- [8] J. J. Thomson, "XL. Cathode Rays," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 44, no. 269, pp. 293–316, Oct. 1897, doi: 10.1080/14786449708621070.
- [9] R. A. Millikan, *The electron: Its isolation and measurement and the determination of some of its properties*. Chicago: University of Chicago Press, p.15, 1917.
- [10] L. Begeman, "An Experimental Determination of the Charge of an Electron by the Cloud Method," *Physical Review (Series I)*, vol. 31, no. 1, pp. 41–54, Jul. 1910, doi: 10.1103/physrevseriesi.31.41.
- [11] R. A. Millikan and L. Begeman, "On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas," *Physical Review*, vol. 26, no. 2. pp. 197–198, 1908.
- [12] P. Heering and D. Osewold, *Constructing Scientific Understanding Through Contextual Teaching*, Frank & Timme GmbH, p. 345, 2007.
- [13] R. A. Millikan, "XXII. A new modification of the cloud method of determining the elementary electrical charge and the most probable value of that charge," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 19, no. 110, pp. 209–228, Feb. 1910, doi: 10.1080/14786440208636795.
- [14] R. A. Millikan, "On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant," *Physical Review*, vol. 2, no. 2, pp. 109–143, Aug. 1913, doi: 10.1103/physrev.2.109.
- [15] R. A. Millikan, "The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes's Law," *Physical Review (Series I)*, vol. 32, no. 4, pp. 349–397, Apr. 1911, doi: 10.1103/physrevseriesi.32.349.
- [16] H. Fletcher, "My work with Millikan on the oil-drop experiment," *Physics Today*, vol. 35, no. 6, pp. 43–47, Jun. 1982, doi: 10.1063/1.2915126.
- [17] R. A. Millikan and H. Fletcher, "Causes of Apparent Discrepancies and Recent Work on the Elementary Electrical Charge," *Physikalische Zeitschrift*, January 1911.
- [18] R. A. Millikan and H. Fletcher, "XC. On the question of valency in gaseous ionization," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 21, no. 126, pp. 753–770, Jun. 1911, doi: 10.1080/14786440608637092.
- [19] H. Fletcher, "Some Contributions to the Theory of Brownian Movements, with Experimental Applications," *Physikalische Zeitschrift*, January 1911.
- [20] H. Fletcher, "A Verification of the Theory of Brownian Movements and a Direct Determination of the Value of NE For Gaseous Ionization," *Physical Review (Series I)*, vol. 33, no. 2, pp. 81–110, Aug. 1911, doi: 10.1103/physrevseriesi.33.81.
- [21] H. Fletcher, "Vérification de la théorie du mouvement brownien et détermination de la valeur de Ne pour l'ionisation des gaz," *Le Radium*, vol. 8, no. 7, pp. 279–286, 1911, doi: 10.1051/radium:0191100807027901.
- [22] R. A. Millikan, "The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of Its Charge, and the Correction of Stokes's Law," *Science*, vol. 32, no. 822, pp. 436–448, Sep. 1910, doi: 10.1126/science.32.822.436.
- [23] F. Ehrenhaft, *Über die Messung von Elektrizitätsmengen, die kleiner zu sein scheinen als die Ladung des einwertigen Wasserstoffions oder Elektrons und von dessen Vielfachen abweichen*, Kais. Akad. Wiss. Wien, Sitzber. math.-nat. Kl. 119 (IIa), pp. 815–867, 1910.
- [24] G. M. SANTOS, "A debate on magnetic current: the troubled Einstein–Ehrenhaft correspondence," *The British Journal for the History of Science*, vol. 44, no. 3, pp. 371–400, Oct. 2010, doi: 10.1017/s0007087410001299.
- [25] D. Goodstein, "In the Case of Robert Andrews Millikan," *American Scientist*, pp. 54–60, Jan–Feb 2001.

- [26] “Robert Andrews Millikan,” in *Encyclopedia of Nobel Laureates 1901–2017*, by P. T. Rajasekharan, Panther Publishers Pvt. Ltd, 2018.
- [27] T. H. LABY and V. D. HOPPER, “The Electronic Charge,” *Nature*, vol. 143, no. 3613, pp. 157–158, Jan. 1939, doi: 10.1038/143157b0.
- [28] T. H. LABY and V. D. HOPPER, “The Electronic Charge,” *Nature*, vol. 145, no. 3685, pp. 932–933, Jun. 1940, doi: 10.1038/145932a0.
- [29] K. Darrow, *Oral History Transcript*. URL: <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4567-1> (25.07.2022).
- [30] “Harold DeForest Arnold,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 4, no. 8, pp. 421–421, Aug. 1933, doi: 10.1063/1.1749162.
- [31] *Harvey Fletcher 1884–1981*. A Biographical Memoir by Stephenh Fletcher. National Academy of Sciences, Washington, p. 172, 1992.
- [32] J. B. Allen, “Harvey Fletcher’s role in the creation of communication acoustics,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, no. 4, pp. 1825–1839, Apr. 1996, doi: 10.1121/1.415364.

Information about the author

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Том 5, № 4, 2022 г.

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

Физические науки (1.3)

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

История науки и техники (5.6.6)

Адрес редакции:

ул. Университетская, д. 33, Севастополь, 299053

Тел. редакции: (8692) 41-77-41

<http://icrtjournal.com>

E-mail: icrt.mail@mail.ru

Отпечатано в типографии Printex

ул. Кулакова, д. 59а, Севастополь, 299011

Тел.: (8692) 46-47-44, (8692) 45-56-78

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии» обязательна.

Учредитель

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053

Издатель

ООО «Издательский центр РИОР»

ул. Полярная, д. 31в, стр. 1, Москва, 127214

(по договору № 66-22/ЭЗК-223 от 15.06.2022)

№ рег. СМИ: ПИ № ФС77-64134 от 25.12.2015

Главный редактор: Вольвач А. Е.