

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ и РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2022

Том 5

№ 3

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 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

Физические науки (1.3)

Курбасова Г. С., Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е. Анализ метеорологических и солнечных рядов спутниковых наблюдений в пункте Кара-Даг	295
---	-----

Электроника, фотоника, приборостроение и связь (2.2)

Андреев Ю. В., Петросян М. М. Эффект «волновода» при распространении сверхширокополосных сигналов в помещении	304
Кулинич И. В., Сомогонянц А. А., Шестериков Е. В., Моховиков Д. М. Интегральные оптические волноводы на основе пленок Si_3N_4	318
Пхайко Н. А., Кондратьев А. А., Пахомов С. Н., Потапов А. В., Сорокин И. А., Тищенко А. С. Экспериментальные исследования характеристик фотокатодов ультрафиолетового диапазона спектра	325
Казаков А. Г., Пхайко Н. А., Сафронов К. В., Горнов В. Н., Пешкичева Л. Е., Пахомов С. Н., Писарев Е. М., Смирнов Ю. Ю., Савельев А. В. Изготовление и исследование низкоплотных металлических материалов	342
Сдобнова В. П., Махно А. С., Крутиев С. В. Полосно-пропускающий фильтр на метаволноводе	353
Лонкина Д. В., Земляков В. В., Губский Д. С., Крутиев С. В. Полосно-пропускающий фильтр на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями	361
Светличный А. С., Чувараян Т. А., Крутиев С. В. Полосно-пропускающий фильтр на прямоугольном волноводе с плоскопараллельными тонкими диафрагмами	370

История науки и техники (5.6.6)

Самсонов Г. А., Ермолов П. П. VII съезд РНТОРЭС им. А. С. Попова	378
Пестриков В. М. Выбор тренда развития Bell System в начале XX века	395

INFOCOMMUNICATIONS and RADIO TECHNOLOGIES

2022

Vol. 5

No. 3

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

Physical sciences

G. S. Kurbasova, A. E. Volvach, and L. N. Volvach, Analysis of Meteorological and Solar Series of Satellite Observations at the Kara-Dag	295
---	-----

Electronics, photonics, instrumentation and communications

Yu. V. Andreyev and M. M. Petrosyan, “Waveguide” Effect of Ultrawideband Signal Indoor Propagation	304
I. V. Kulinich, A. A. Somogonyants, E. V. Shesterikov, and D. M. Mokhovikov, Integrated Optical Waveguides Based on Si_3N_4 Films	318
N. A. Pkhaiko, A. A. Kondratyev, S. N. Pakhomov, A. V. Potapov, I. A. Sorokin, and A. S. Tishchenko, Experimental Studies of the Characteristics of Photocathodes of the Ultraviolet Range of the Spectrum	325
A. G. Kazakov, N. A. Phaiko, K. V. Safronov, V. N. Gornov, L. E. Peshkicheva, S. N. Pakhomov, E. M. Pisarev, Y. Y. Smirnov, and A. V. Savelyev, Production and Research of Low-Density Metal Materials	342
V. P. Sdobnova, A. S. Makhno, and S. V. Krutiev, Band-Pass Filter on a Metawaveguide	353
D. V. Lonkina, V. V. Zemlyakov, D. S. Gubskiy, and S. V. Krutiev, Band-Pass Filter on Cylindrical Waveguide Structures with Complex Metal Ridges	361
A. S. Svetlichny, T. A. Chuvarayan, and S. V. Krutiev, A Band-Pass Filter on a Rectangular Waveguide with Plane-Longitudinal Thin Diaphragms	370

History of science and technology

G. A. Samsonov and P. P. Yermolov, VII Congress of RNTORES n. a. A. S. Popov	378
V. M. Pestrikov, Choice of Development Trend of Bell System at the Beginning of the 20 th Century	395

УДК 550.2

Анализ метеорологических и солнечных рядов спутниковых наблюдений в пункте Кара-Даг

Курбасова Г. С., Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е.

*Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация
volvach@bk.ru*

Получено: 20 июля 2022 г.

Отрецензировано: 22 июля 2022 г.

Принято к публикации: 22 июля 2022 г.

Аннотация: В настоящей работе обсуждаются результаты анализа временных рядов измерений из космоса локальных температур поверхности Земли и воздуха на высоте 2 метров, а также общей инсоляции падающей на поверхность Земли в пункте Кара-Даг за последние 38 лет. Установлены взаимные корреляции между анализируемыми последовательностями локальных измерений и изменениями длительности суток, числа солнечных пятен, индексов изменения глобальной температуры методом вычисления функций взаимной (двухканальной) спектральной плотности мощности.

Ключевые слова: солнечная инсоляция, температура поверхности Земли, вейвлет-анализ, когерентные колебания, модель.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач Л. Н., Курбасова Г. С., Вольвач А. Е. Анализ метеорологических и солнечных рядов спутниковых наблюдений в пункте Кара-Даг // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 295—303.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Курбасова, Г. С. Анализ метеорологических и солнечных рядов спутниковых наблюдений в пункте Кара-Даг / Г. С. Курбасова, Л. Н. Вольвач, А. Е. Вольвач // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 295—303.

1. Введение

На полуострове Крым, сейсмически активной зоне Земли, есть несколько ретровулканов. Один из них, особо опасный по экологическим последствиям, действовал в пункте Кара-Даг. В настоящее время не существует методов предсказания его «пробуждения». Существует ряд косвен-

ных признаков возможной активизации землетрясений и вулканов. К ним относятся такие, как экстремальные события на Солнце, динамика вращения Земли, активизация течения жидких масс внутри Земли, события в атмосфере и магнитосфере. Нарушения теплового баланса, необъяснимый периодически протекающими процессами приток энергии в локальном месте поверхности Земли, служит сигналом нестабильности экологической обстановки.

Проведенный нами ранее частотно-временной вейвлет-анализ обнаруживает рост общей инсоляции падающей на поверхность земли, температуры поверхности Земли и приземного воздуха в Крыму за последние ~20 лет. При этом преимущественный (по сравнению с другими пунктами Крыма) рост общей инсоляции в Кара-Даге предполагается связанным с локальными геологическими условиями [1—4]. Инсоляция, падающая на поверхность атмосферы, составляет главный вклад Солнца в энергетику Земли. Но до поверхности Земли через атмосферу приходит только часть этой энергии, которая распределяется неравномерно. Локальные геологические особенности, техногенные факторы, а также региональная и глобальная активность эндогенных процессов Земли способствуют неравномерному распределению инсоляции, падающей на поверхность земли Крыма.

Причиной, побудившей к написанию этой статьи, служит обнаруженное нами ранее повышенное прогревание поверхности земли и повышенный рост общей инсоляции падающей на поверхность Земли в пункте Кара-Даг по сравнению с другими пунктами Крыма и возможность использовать для анализа более длинные временные ряды среднегодовых данных за период с 1983 по 2019 годы и ежедневных (суточных) за период с 1982.01.01 по 2019.05.13.

2. Исходные данные и метода анализа

В настоящее время функционирует проект прогноза во всем мире энергетических ресурсов (*Prediction of Worldwide Energy Resource Project, POWER*), в рамках которого создана база данных параметров наземной метеорологии и солнечной энергии из более 200 спутниковых параметров метеорологии и параметров солнечной энергии.

Для анализа нами использовались временные ряды поверхностной и солнечной энергии (*sfuraces and solar energy, SSE*): общей инсоляции падающей на поверхность земли (*All Sky Insolation Incident on a Horizontal Surface, ALLSI*), температур поверхности Земли (*Earth Skin Temperature, TS*), температур воздуха на высоте 2 метров (*Temperature at 2 Meters,*

T2M). Длительность непрерывных рядов составляет: суточные на интервале с 1982.01.01 по 2019.05.15 и среднегодовые на интервале с 1983 по 2017 гг.¹. Сокращения *TS*, *T2M*, *ALLSI* введены для инициализации анализируемых временных рядов.

Для установления когерентных колебаний использовались среднегодовые данные: о длительности суток (*length of day*, *LOD*)²; о солнечной активности³; об индексах глобальной температуры⁴.

Метод вейвлет-анализа. Последовательности наблюдений природных параметров имеют сложные частотно-временные характеристики. Как правило, они состоят из близких по времени короткоживущих высокочастотных компонентов и долговременных, близких по частоте низкочастотных компонентов. Используемое в настоящей работе непрерывное вейвлет-преобразование строится с помощью непрерывных масштабных преобразований и переносов вейвлета $\psi(t)$ с произвольными значениями масштабного коэффициента $a \neq 0$ и параметра сдвига b [5—7]. В частности, для решения проблемы исключения из набора данных шума нами использовались вейвлеты из семейства «Вейвлеты Хаар» (сокращение *haar*), приспособленные для преобразования данных с резкими выбросами (скачками).

3. Результаты

Типичным является класс моделей временных рядов, которые дают рациональные функции СПМ (АР — авторегрессионная, СС — скользящего среднего и АРСС — моделирование синусоид в белом шуме). Эти модели определяются некоторым конечным небольшим набором коэффициентов. В результате получается менее смещенные спектральные оценки с более высоким разрешением [4, 8—11].

Принимая во внимание ограниченную длительность анализируемых временных рядов, определим общую долговременную тенденцию на исследуемом интервале времени. Для построения моделей долговременных трендов использовались сглаженные среднегодовые данные *TS*, *T2M*, *ALLSI*. Сглаживание проведено с помощью вейвлет-преобразования. На рисунке 1 приведены графики среднегодовых данных об общей инсоляции (звездочки), сглаженные методом скользящего среднего с шагом 5 лет (квадраты) и с помощью вейвлетов (сплошная кривая).

¹ <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse>

² <https://datdcenter.iers.org/eop>

³ <http://www.sidc.be/silso/datafiles>

⁴ <http://data.giss.nasa.gov>

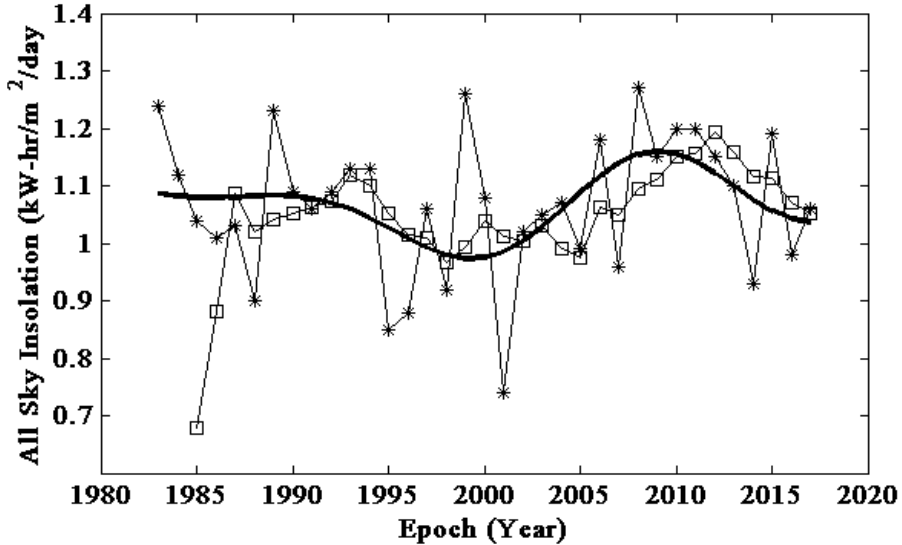


Рис. 1. Графики среднегодовых данных об общей инсоляции падающей на поверхность земли в пункте Кара-Даг (звездочки), сглаженные методом скользящего среднего (квадраты) и сглаженные вейвлетами *dmey* (сплошная кривая). Единицы отсчета по оси абсцисс 1 год.

Fig. 1. Graphs of average annual data on the total insolation falling on the surface of the earth at the Kara-Dag point (asterisks), smoothed by the moving average method (squares) and smoothed by 'dmey' wavelets (solid curve). The units of reference along the abscissa axis are 1 year

Сопоставим разности между исходными и сглаженными двумя методами данными *ALLSI*. Графики на рисунке 2 демонстрируют более точное преобразование данных на концах выборки при сглаживании вейвлетами, что важно для случая ограниченного объема выборки данных [4]. При этом дискретные статистики разностей равны: в случае вейвлет-преобразования данных $\bar{X} = 0.0013$ и $std = 0.1113$; при сглаживании по методу скользящего среднего $\bar{X} = 0.0139$, $std = 0.1282$. Аналогичные гладкие кривые получены при сглаживании данных *TS*, *T2M*.

Построим модели сглаженных вейвлетами данных *TS*, *T2M*, *ALLSI*. Наиболее приемлемым вариантом при выборе математической модели для сглаженных кривых оказалась модель Фурье:

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^3 (a_i \cos(ixw) + b_i (\sin(ixw))) \quad (1)$$

где X — временной интервал, отсчитываемый в годах от начала моделируемого временного ряда; i — номер гармоники. Коэффициенты с 95 % до-

верительными интервалами и параметрами точности приближения данных моделью приведены в таблице 1.

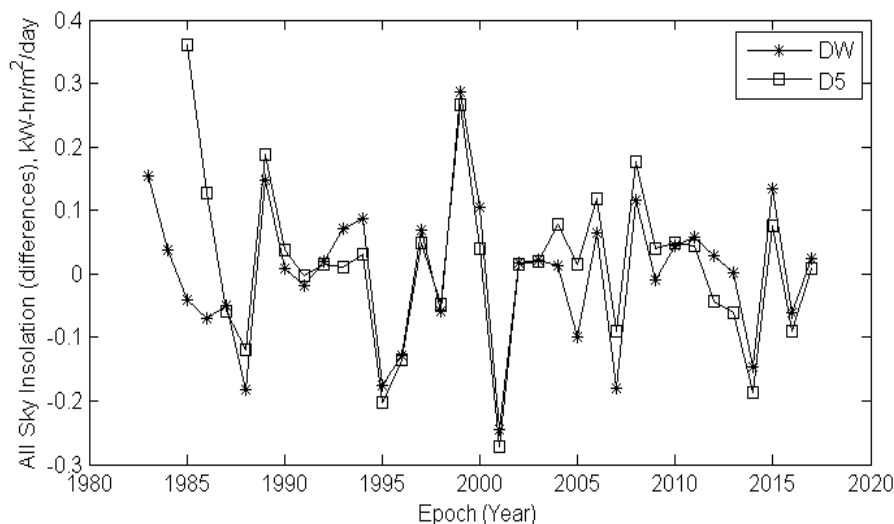


Рис. 2. Графики отклонений от исходных данных последовательностей сглаженных методами: вейвлет-преобразования (звездочки), скользящего среднего (квадраты).

Fig. 2. Graphs of deviations from the initial data of sequences smoothed by methods: wavelet transform (asterisks), moving average (squares)

4. Обсуждение и выводы

Виды взаимодействия Земля-Космос достаточно разнообразны, в их основе лежат резонансные взаимосвязи. Одним из примеров резонансных взаимодействий является взаимодействие в системе Земля-Луна, фактически представляющая двойную планету, барицентр которой лежит вне Земли. Совсем недавно французские исследователи М.Греф-Лефтиц и И.Легро [12] показали, что осцилляции в жидком ядре и лунно-солнечные приливы могли оказываться в резонансе (циклы $3.0 \cdot 10^9$, $1.8 \cdot 10^9$ и $3 \cdot 10^8$ лет) и вызвать дополнительный разогрев ядра.

Существует ряд признаков избыточного накопления энергии в локальном пункте таких как повышенная (по сравнению с близким окружением) температура поверхности земли, повышенная общая инсоляция, падающая на поверхность земли, и температура приземного воздуха. В настоящей статье и предыдущих публикациях авторов [4, 8-11] показано, что эти признаки накопления энергии присутствуют в пункте Кара-Даг и должны находиться под контролем наземных и космических наблюдений.

Таблица 1. Коэффициенты моделей с 95 % доверительными интервалами и параметры точности приближения.

Table 1. Model coefficients with 95% confidence intervals and approximation accuracy parameters.

	TS (° C)	T2M (° C)	ALLSI (kW-hr/m ² /day)
a ₀	13.87 (13.66, 14.08)	12.66 (12.45, 12.87)	1.066 (1.065, 1.067)
a ₁	−0.8127 (−0.9148, −0.7107);	−0.8797 (−0.9973, −0.762);	0.006201 (0.005204, 0.007199);
a ₂	0.3812 (0.1263, 0.6361);	0.3776 (0.1106, 0.6446);	0.0127 (0.006033, 0.01936);
a ₃	0.2183 (0.1788, 0.2579)	0.2244 (0.1833, 0.2655)	0.003214 (−0.001646, 0.008073)
b ₁	0.2044 (−0.2538, 0.6626);	0.1303 (−0.3382, 0.5988);	−0.02565 (−0.02657, −0.02474);
b ₂	0.2616 (0.218, 0.3052);	0.2946 (0.2458, 0.3434);	0.05187 (0.0488, 0.05493);
b ₃	−0.0634 (−0.1728, 0.04597)	−0.06001 (−0.1721, 0.05207)	−0.02957 (−0.03233, −0.02681)
w	0.09598 (0.08944, 0.1025) P = 65.46 (70.25, 61.30) (year)	0.09718 (0.0906, 0.1038) P = 64.65 (69.35, 60.53) (year)	0.1407 (0.1382, 0.1432), P = 44.65 (45.46, 43.87) (year)
R-square	0.9999	0.9999	0.9997
Adjusted R-square	0.9999	0.9999	0.9996
RMSE	0.005247	0.005665	0.001019

Одним из признаков накопления энергии в пункте Кара-Даг является увеличение энергии наиболее регулярных и мощных сезонных колебаний, и колебаний, вызванных лунными и лунно-солнечными приливами.

С целью анализа статистической связи изменений локальной инсоляции поверхности земли с вращением Земли вокруг оси и ее движением по орбите, солнечной активностью и глобальной температурой, были вычислены авторегрессионные модели спектральной плотности мощности, с помощью которых установлены когерентные колебания между вариациями в данных об общей инсоляции поверхности Земли в пункте Кара-Даг и вариациями в данных: о длительности суток (*LOD*) с периодом 11.8 лет и квадратом модуля когерентности 0.85; о солнечной активности с периодами 10.5, 3.6 лет и квадратом модуля когерентности 0.8 и 0.85; об индексах глобальной температуры с периодами 2.3, 3.5 лет и квадратом модуля когерентности 0.7 и 0.9 соответственно. Предполагается, что при некоторых соотношениях между подобными вариациями, даже при отсутствии физической связи между ними, появляются резонансные увеличения амплитуд.

Список литературы

1. Курбасова Г. С., Вольвач А. Е. Аномалии инсоляции полуострова Крым по наблюдениям из космоса. В сб. : 24-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2014 (Севастополь, 7—13 сент. 2014 г.). 2014. С. 1085—1086.
2. Курбасова Г. С., Вольвач О. Є. Вейвлет-аналіз наземних і космічних вимірів локальної інсоляції // Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20, № 4. С. 42—49.
3. Kurbasova G. S., Volvach A. E., Volvach L. N. Astronomical Cycles in the Climatic and Geophysical Characteristics of Crimea // Cosmic Research. 2019. Vol. 57, no. 4. P. 243—251.
4. Volvach A. E., Kurbasova G. S., Volvach L. N. Time series analysis of temperatures and insolation of the Earth's surface at Kara-Dag using satellite observation // Advances in Space Research. Vol. 69, iss. 12, 15 June 2022, pp. 4228—4239.
5. Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets Commun // Pure Appl. Math., 1988, vol. 41, pp. 909—996.
6. Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. // IEEE Trans. Inf. Theory. 1990. Vol. 36. P. 961—1005.
7. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, Pennsylvania : 1992. 377 p.
8. Volvach A. E., Kurbasova G. S., Volvach L. N. Analysis of periodical variability of insolation and soil temperature in the Crimea // Geophysical Journal. 2019. Vol. 41. No. 6. P. 195—202.
9. Volvach A., Kurbasova G. Model of insolation of the earth surface in the Kara-Dag locality according to SSE data // Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv : Geology. 2019. Vol. 2 (85). P. 51—58.
10. Volvach A. E.; Kurbasova G. S.; Volvach L. N. Solar-Terrestrial Cycles in the Climatic and Geophysical Properties of Crimea // Astrophysical Bulletin. 2019. Vol. 74. Iss. 3. P.331—336.
11. Volvach A. E., Kurbasova G. S. Secular variations of geomagnetic declination in the Kara-Dag point and the global helio-geodynamic processes // Geophysical Journal. 2019. Vol. 41. No. 1. P. 192—199.
12. Greff-Lefftz M., Legros H. Core rotational dynamics and geological events // Science. 1999. Vol. 286. P. 1707—1709.

Информация об авторах

Курбасова Галина Сергеевна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией геодинамики ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Analysis of Meteorological and Solar Series of Satellite Observations at the Kara-Dag

G. S. Kurbasova, A. E. Volvach, and L. N. Volvach

*Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory,
Yalta, 298688, Russian Federation
volvach@bk.ru*

Received: July 20, 2022

Peer-reviewed: July 22, 2022

Accepted: July 22, 2022

Abstract: In this paper, we discuss the results of the analysis of time series of measurements from outer space of local temperatures of the surface of the earth and air at a height of 2 meters, as well as the general insolation of the earth falling on the surface at Kara-Dag over the past 38 years. Mutual correlations were established between the analyzed sequences of local measurements and changes in the length of the day, the number of sunspots, and the indices of changes in global temperature by calculating the functions of the mutual (two-channel) power spectral density.

Keywords: solar insolation, temperature of the Earth's surface, wavelet analysis, coherent oscillations, model.

For citation (IEEE): G. S. Kurbasova, A. E. Volvach, and L. N. Volvach, "Analysis of Meteorological and Solar Series of Satellite Observations at the Kara-Dag", *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 295–303, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.21. (In Russ.).

References

- [1] G. S. Kurbasova and A. E. Volvach, "The insolation anomalies on the Crimean peninsula with observations from space," 24th *Intern. Crimean Conf. "Microwave and telecommunication technology" – CriMiCo '2014* (Sevastopol, September 7–13, 2014), pp. 1085–1086, 2014. (In Russ.).
- [2] G. S. Kurbasova and A. E. Volvach, "Wavelet analysis for ground-based and space measurements of local insolation," *Kosmična nauka i tehnologija*, vol. 20, no. 4(89), pp. 42–49, Jul. 2014, doi: 10.15407/knit2014.04.042. (In Russ.).
- [3] G. S. Kurbasova, A. E. Volvach, and L. N. Volvach, "Astronomical Cycles in the Climatic and Geophysical Characteristics of Crimea," *Cosmic Research*, vol. 57, no. 4, pp. 243–251, Jul. 2019, doi: 10.1134/s001095251904004x.
- [4] A. Volvach, G. Kurbasova, and L. Volvach, "Time series analysis of temperatures and insolation of the Earth's surface at Kara-Dag using satellite observation," *Advances in Space Research*, vol. 69, no. 12, pp. 4228–4239, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.asr.2022.04.016.
- [5] I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets," *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 41, no. 7, pp. 909–996, Oct. 1988, doi: 10.1002/cpa.3160410705.

- [6] I. Daubechies, "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 36, no. 5, pp. 961–1005, 1990, doi: 10.1109/18.57199.
- [7] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia, Pennsylvania, 1992.
- [8] A. E. Volvach, G. S. Kurbasova, and L. N. Volvach, "Analysis of periodical variability of insolation and soil temperature in the Crimea," *Geofizicheskiy Zhurnal*, vol. 41, no. 6, pp. 195–202, Dec. 2019, doi: 10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190076.
- [9] A. Volvach and G. Kurbasova, "Model of Insolation of the Earth Surface in the Kara-Dag Locality According to SSE Data," *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, no. 2 (85), pp. 51–58, 2019, doi: 10.17721/1728-2713.85.07.
- [10] A. E. Volvach, G. S. Kurbasova, and L. N. Volvach, "Solar-Terrestrial Cycles in the Climatic and Geophysical Properties of Crimea," *Astrophysical Bulletin*, vol. 74, no. 3, pp. 331–336, Jul. 2019, doi: 10.1134/s1990341319030118.
- [11] A. E. Volvach and G. S. Kurbasova, "Secular variations of geomagnetic declination in the Karadag point and the global helio-geodynamic processes," *Geofizicheskiy Zhurnal*, vol. 41, no. 1, pp. 192–199, Mar. 2019, doi: 10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158873.
- [12] M. Greff-Lefftz, "Core Rotational Dynamics and Geological Events," *Science*, vol. 286, no. 5445, pp. 1707–1709, Nov. 1999, doi: 10.1126/science.286.5445.1707.

Information about the authors

Galina S. Kurbasova, PhD. Sci., FSBSI "Crimean Astrophysical Observatory of RAS", Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI "Crimean Astrophysical Observatory of RAS", Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Larisa N. Volvach, PhD. Sci., FSBSI "Crimean Astrophysical Observatory of RAS", Nauchni, Crimea, Russian Federation.

УДК 537.876; 537.874; 621.372; 621.374

Эффект «волновода» при распространении сверхширокополосных сигналов в помещении¹

^{1,2} Андреев Ю. В., ¹ Петросян М. М.

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
ул. Моховая, д. 11, корп. 7. г. Москва, ГСП-3, 125009, Российская Федерация
andreev.iuv@mipt.ru*

² *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
Институтский пер., 9, г. Долгопрудный МО, 141700, Российская Федерация*

Получено: 19 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Показан эффект «волновода» при распространении сверхширокополосного сигнала внутри помещений, заключающийся в отсутствии интерференционного фактора ослабления сигнала независимо от расстояния. В отличие от открытой местности при распространении в многолучевой среде помещений характер затухания сигнала с расстоянием близок к среде свободного пространства. Эффект возникает вследствие отражения волны от парных поверхностей, расположенных друг против друга: пол — потолок, параллельные стены. Благодаря этому дальность сверхширокополосных систем связи в помещении оказывается заметно выше, чем на открытой местности. Эффект иллюстрируется с помощью трехлучевой интерференционной модели.

Ключевые слова: сверхширокополосный сигнал, распространение сигналов, двухлучевая модель, формула Введенского, хаотический сигнал.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Андреев Ю. В., Петросян М. М. Эффект «волновода» при распространении сверхширокополосных сигналов в помещении // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 304—317.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Андреев, Ю. В. Эффект «волновода» при распространении сверхширокополосных сигналов в помещении / Ю. В. Андреев, М. М. Петросян // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 304—317.

¹ Работа выполнена по Государственному заданию.

1. Введение

Одним из параметров среды распространения, определяющим дальность системы связи, является скорость затухания n мощности сигнала P с расстоянием r (затухание описывается степенной зависимостью $P \sim r^{-n}$). В свободном пространстве показатель $n = 2$, однако на открытой местности на достаточном удалении от передатчика мощность сигнала в точке приема затухает примерно как r^{-4} [1]. Такая скорость затухания сигнала характерна как для узкополосных [2—4], так и для сверхширокополосных (СШП) сигналов. Это явление объясняется интерференцией в точке приема прямой волны и волны, отраженной от поверхности раздела сред «воздух — земля», и хорошо описывается т. н. двухлучевой (интерференционной) моделью [1].

В то же время в моделях СШП канала для стандартов *IEEE 802.15.3a* и *802.15.4a*, построенных на основе большого экспериментального массива измерений, для каналов связи с прямым лучом (*LOS*) внутри помещений различного типа (офисных, жилых, промышленных) используются значения показателя затухания в диапазоне $n = 1,4—2$ [5]. Для того чтобы объяснить разрыв значений между показателями затухания n на открытой местности и в помещениях, в данном докладе распространение СШП сигнала исследуется в простой модели, учитывающей парный характер основных отражений сигнала в помещении.

2. Модель с парными отражениями

При распространении радиоволны над поверхностью Земли поле в точке приема формируется путем суммирования прямой и отраженной волн. На больших расстояниях r , т. е. при углах падения волны θ , близких к 90° , волна отражается от земли с коэффициентом $R \approx 1$, а фаза волны поворачивается на 180° , поэтому прямая и отраженная волны оказываются практически равны по амплитуде и противоположны по фазе, поэтому в линейном приближении гасят друг друга (см. рис. 1а). Учет членов более высокого порядка дает зависимость интерференционного множителя V от расстояния как $1/r$ для амплитуды и $1/r^2$ для мощности [1], что и обеспечивает итоговый показатель затухания $n = 4$.

В отличие от открытой местности, распространение радиоволны в помещении сопровождается большим числом отражений, причем во многих случаях основными отражающими поверхностями являются конструктивные плоскости помещения, т. е. стены, пол и потолок. Поэтому в точке приема прямая волна суммируется не с одной отраженной волной, а с волнами, отраженными от параллельных поверхностей: пол — потолок, про-

тнвотоложные стены. Таким образом, в каждой плоскости отражения имеется пара отраженных волн, образованных отражением от пары плоских поверхностей, как показано на рис. 1б.

Интуитивно понятно, что в этом случае при больших углах падения ($\theta \approx 90^\circ$) прямая и одна из двух отраженных волн также гасят друг друга, однако остается вторая отраженная волна с амплитудой, практически равной амплитуде прямой волны (и фазой, отличающейся на 180°). Таким образом, в точке приема не происходит дополнительного ослабления волны вследствие интерференции, поэтому показатель затухания n на больших расстояниях в помещении должен быть не хуже, чем в свободном пространстве, т. е. $n \leq 2$.

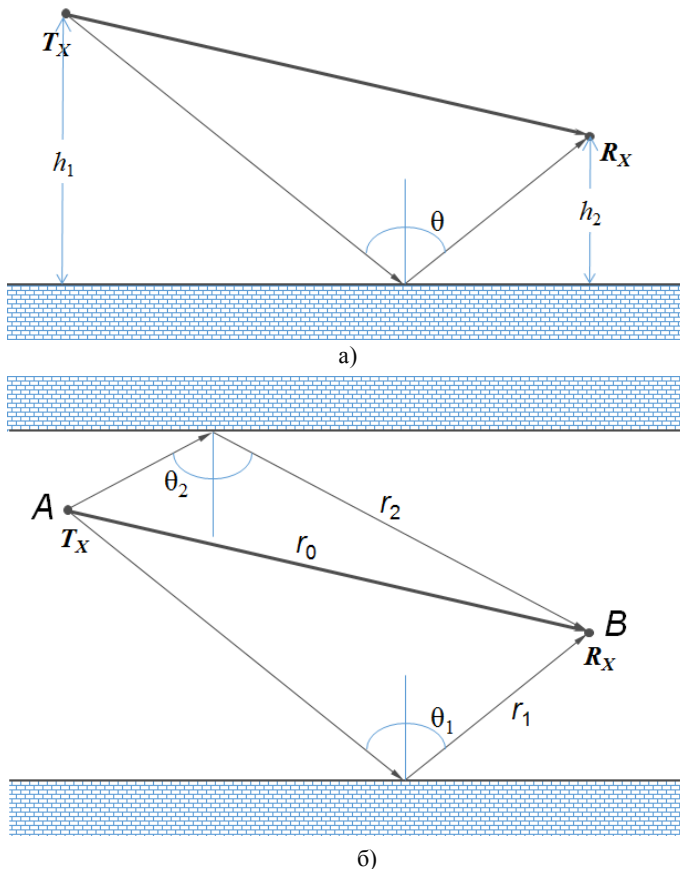


Рис. 1. Модели распространения радиоволны: а) над поверхностью Земли; б) в помещении.

Fig. 1. Models of radio wave propagation: a) over the Earth's surface; b) indoors

Подкреем эти качественные рассуждения моделью на рис. 1б, описывающей взаимодействие прямой волны с парой отраженных волн. Для этого вычислим (подобно тому, как это делается в классической двухлучевой модели [1]) интерференционный множитель V , который связывает комплексную амплитуду электрического поля в точке приема $\dot{E}$ с комплексной амплитудой поля в свободном пространстве $\dot{E}_{m0}$

$$\dot{E} = \dot{E}_{m0} \cdot \dot{V}, \quad (1)$$

Выведем сначала выражение для гармонической электромагнитной волны некоторой фиксированной частоты.

Запишем комплексную амплитуду напряженности поля прямой волны $\dot{E}_{m0}$ в виде

$$\dot{E}_{m0} = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r_0} F(\alpha_0) \exp(ikr_0), \quad (2)$$

где P — мощность излучения, $G_0 F^2(\alpha_0)$ — коэффициент усиления антенны с учетом диаграммы направленности, $F(\theta, \varphi, \omega)$ — диаграмма направленности по полю, α_0 — угол направления на точку В из точки А (см. рис. 1б), ω — угловая частота падающей волны, r_0 — длина прямого луча, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны излучения:

Напряженность поля отраженных волн определяется формулами

$$\dot{E}_{m1} = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r_1} F(\alpha_1) \dot{R}_1(\theta_{1s}) \exp(i(kr_1 + \beta_1(\theta_{1s}))), \quad (3)$$

$$\dot{E}_{m2} = \frac{\sqrt{60PG_0}}{r_2} F(\alpha_2) \dot{R}_2(\theta_{2s}) \exp(i(kr_2 + \beta_2(\theta_{2s}))), \quad (4)$$

где R и β — модуль и фаза коэффициента отражения $\dot{R}(\theta_s)$, θ_s — угол падения, r_1 и r_2 — длины отраженных лучей.

Результирующее поле в точке приема имеет вид

$$\dot{E}_{m\Sigma} = \dot{E}_{m0} \cdot \left[1 + \frac{F(\alpha_1)}{F(\alpha_0)} \dot{R}_1(\theta_{1s}) \exp(i(k\Delta r_1 + \beta_1(\theta_{1s}))) + \frac{F(\alpha_2)}{F(\alpha_0)} \dot{R}_2(\theta_{2s}) \exp(i(k\Delta r_2 + \beta_2(\theta_{2s}))) \right], \quad (5)$$

где $\Delta r_1 = r_1 - r_0$, $\Delta r_2 = r_2 - r_0$. В случае использования слабонаправленных антенн с $F(\alpha) \approx 1$, получим упрощенное выражение для интерференционного множителя $\dot{V}$ и его модуля по мощности V^2 :

$$\dot{V} = 1 + \dot{R}_1(\theta_{1s}) \exp(i(k\Delta r_1 + \beta_1(\theta_{1s}))) + \dot{R}_2(\theta_{2s}) \exp(i(k\Delta r_2 + \beta_2(\theta_{2s}))). \quad (6)$$

$$V^2 = 1 + (R_1(\theta_{1s}))^2 + (R_2(\theta_{2s}))^2 + 2R_1(\theta_{1s}) \cos(k\Delta r_1 + \beta_1(\theta_{1s})) + 2R_2(\theta_{2s}) \times \\ \times \cos(k\Delta r_2 + \beta_2(\theta_{2s})) + 2R_1(\theta_{1s})R_2(\theta_{2s}) \cos(k(\Delta r_1 + \Delta r_2) + \beta_1(\theta_{1s}) + \beta_2(\theta_{2s})). \quad (7)$$

В сверхширокополосном случае интерференционный множитель V_{UWB} можно определить через отношение мощностей СШП волны в точке приема в многолучевом и однолучевом случаях:

$$P = P_0 \cdot V_{UWB}^2, \quad (8)$$

где P_0 — мощность волны в точке приема в свободном пространстве, а P — мощность в точке приема в системе с несколькими лучами. Будем считать, что СШП сигнал имеет полосу частот $[\omega_{lo}, \omega_{up}]$.

Нетрудно показать, что для хаотического сигнала с идеально ровной спектральной характеристикой $S(\omega) \equiv 1$, $\omega \in [\omega_{lo}, \omega_{up}]$, выражение для интерференционного множителя V_{UWB} принимает следующий вид

$$V_{UWB}^2 = \frac{\int_{\omega_{lo}}^{\omega_{up}} |V(\omega)|^2 d\omega}{(\omega_{up} - \omega_{lo})}, \quad (9)$$

т. е. интерференционный множитель V_{UWB}^2 равен среднему по частоте значению мощности интерференционного множителя $V^2(\omega)$, рассчитанного на частоте ω по формуле (7).

3. Численное моделирование

Применим модель для исследования конкретного примера. Ранее в работе [6] изучалось распространение СШП хаотических радиоимпульсов внутри зданий. На рис. 2 воспроизведен график изменения мощности СШП хаотической волны $P(r)$ при перемещении излучателя вдоль коридора. Как видно из рис. 2, кривая затухания с точностью около 1,5—2 дБ аппроксимируется прямой линией с показателем $n \approx 1,5$.

В физическом эксперименте размеры помещения составляли 3 м (Ш) $\times$ 4,8 м (В) $\times$ 40 м (Д); эксперимент проводился с СШП хаотическим сигналом с полосой частот $f = 3\text{—}5$ ГГц; длина волны на средней частоте $\lambda = 7,5$ см; передатчик и приемник были установлены посередине между стенами на высоте $h = 0,8$ м от пола, волна распространялась вдоль коридора параллельно стенам [6].

Чтобы иметь базу для сравнения, выполним сначала расчет интерференционного множителя $V_{USB}(r)$ согласно двухлучевой модели (рис. 1а),

которая описывает распространение СШП сигнала на открытой местности. Это эквивалентно учету отражения радиоволны только от пола данного помещения. Результаты расчета приведены на рис. 3.

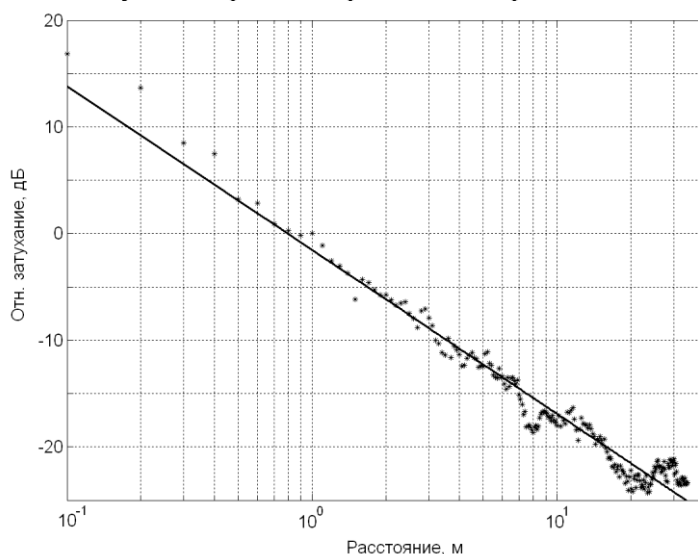


Рис. 2. Экспериментальный график затухания мощности хаотических радиоимпульсов в помещении [6].

Fig. 2. Experimental graph of the attenuation of the power of chaotic radio pulses in a room [6]

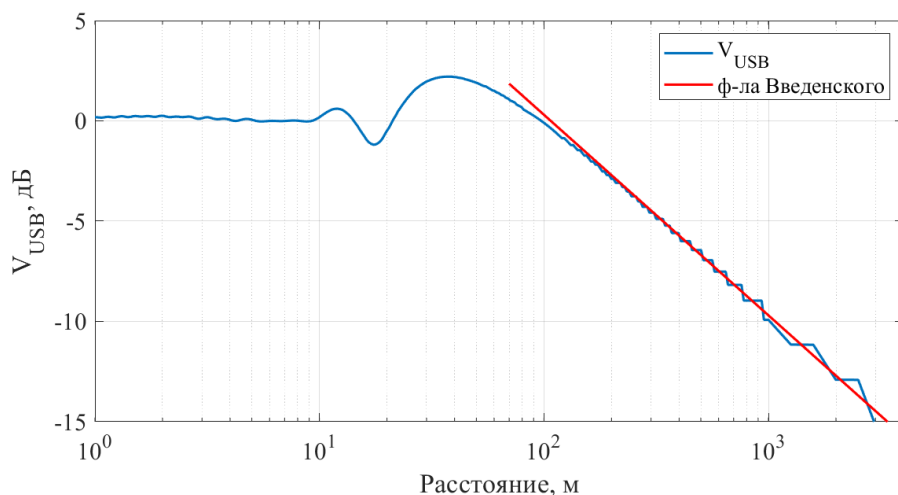


Рис. 3. Интерференционный множитель $V_{USB}(r)$ в двухлучевой модели.

Fig. 3. Interference factor $V_{USB}(r)$ in the two-ray model

Как видно на рис. 3, на начальном участке графика нет значительных (десятки децибел) колебаний, характерных для узкополосных сигналов, так как такие колебания возникают вследствие интерференции прямой и отраженных волн. В случае сверхширокополосных сигналов, для которых характерно малое время автокорреляции τ , прямая и отраженная волны оказываются некоррелированными в точке приема и складываются по мощности. Незначительная остаточная корреляция проявляется в виде мелкой ряби на графике $V_{\text{USB}}(r)$.

По мере роста r разность хода Δr между прямой и отраженной волнами уменьшается, и когда Δr становится сравнима с длиной автокорреляции $l_{\text{AK}} = c\tau$, где c — скорость света, прямая и отраженная волны оказываются коррелированными, и происходит их интерференция, что проявляется на графике $V_{\text{USB}}(r)$ в виде двух интерференционных максимумов и одного минимума. Время автокорреляции шумоподобного сверхширокополосного сигнала τ обратно пропорционально ширине полосы частот: $\tau = 1/\Delta f$ [7]. В нашем случае, $\Delta f = 2$ ГГц, $\tau = 0,5$ нс, $l_{\text{AK}} = 2\lambda = 15$ см (здесь эта разность хода лучей достигается на расстоянии около $r = 8$ м).

В области расстояний $r > 100$ м интерференционный множитель $V_{\text{USB}}(r)$ выходит на прямую, соответствующую формуле Введенского

$$V_{\text{Вед}} \approx \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}, \quad (10)$$

что обеспечивает дополнительное затухание мощности волны со скоростью $\sim 1/r^2$, и общее затухание со скоростью $\sim 1/r^4$.

Теперь исследуем данную задачу с помощью введенной выше трехлучевой модели (рис. 1б).

Выполним моделирование распространения волны в коридоре, сначала принимая в расчет только отражение от стен, что можно трактовать как распространение волны между двумя бесконечными параллельными плоскостями. Расстояние между плоскостями (стенами) $W = 3$ м. Поляризация волны, падающей на стену, горизонтальная, как в физическом эксперименте [6].

На рис. 4 приведен расчетный график интерференционного множителя $V_{\text{USB}}^2(r)$. Прежде всего следует отметить, что $V_{\text{USB}}^2(r) \geq 1$, т. е. во всем диапазоне расстояний мощность волны в точке приема $P(r)$ больше, чем мощность волны $P_0(r)$ в свободном пространстве на этом же расстоянии r , т. е. данная многолучевая среда не вносит дополнительного ослабления.

На начальном участке графика ($1 \text{ м} \leq r \leq 13 \text{ м}$) значение множителя V_{USB}^2 довольно монотонно увеличивается, что можно объяснить ростом ко-

эфициента отражения $|R|$. На этом интервале расстояний график множителя можно аппроксимировать отрезком прямой с наклоном приблизительно 5 дБ мощности на 10 дБ расстояния, т. е. $V_{\text{USB}}^2(r) \sim r^{0,5}$. Это обеспечивает суммарное затухание СШП сигнала на этом интервале $P(r) \sim r^{-2} \cdot r^{0,5} = r^{-1,5}$, что совпадает с экспериментальными данными.

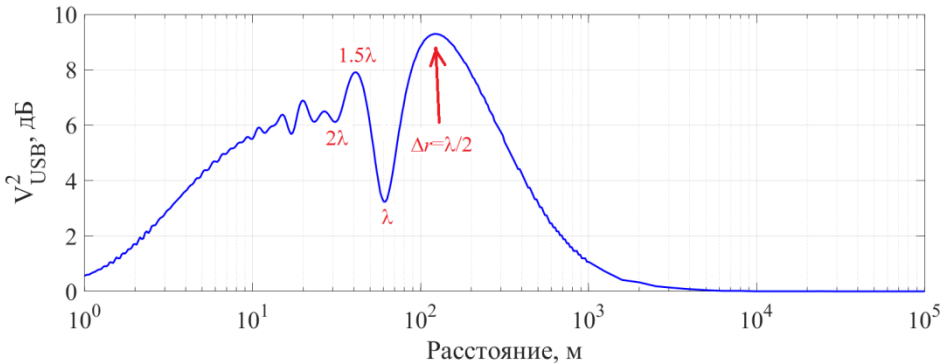


Рис. 4. Моделирование задачи распространения СШП сигнала вдоль коридора.

Fig. 4. Modeling the problem of UWB signal propagation along the corridor

Однако по мере роста r разность хода Δr между прямой и отраженными волнами уменьшается, и когда она становится меньше длины автокорреляции l_{AK} (в данном случае начиная с расстояния $r = 30$ м), на графике наблюдаются несколько интерференционных экстремумов (в диапазоне расстояний $20 \text{ м} \leq r \leq 130 \text{ м}$), которые отвечают разностям хода прямой и отраженных волн Δr , кратным $\lambda/2$ (половине длины волны на средней частоте). Максимальное значение $V_{\text{USB}}^2 \approx 9,3$ дБ достигается, когда прямая волна $s(t)$ складывается с двумя одинаковыми отраженными волнами $u(t)$, смещенными на $\lambda/2$ относительно падающей, но домноженными на коэффициент отражения $R = |R|e^{i\beta} = 0.987 \cdot e^{i\pi} \approx -1$, т. е. $u(t) \approx -s(t)$. Итоговая волна $s(t) + 2u(t) \approx 3s(t)$, а ее мощность близка к $P_{\Sigma} = 9$ (9,5 дБ). При моделировании мощность падающей волны принималась $P = 1$.

В области $r > 130$ м на открытой местности (т. е. с одной отраженной волной) интерференционный множитель находился бы на прямой линии, описываемой формулой Введенского (см. рис. 3), однако в данной модели этого не происходит, и при $r \rightarrow \infty$ график $V_{\text{USB}}(r)$ быстро сходится к $V_{\text{USB}} = 1$ (0 дБ). Другими словами, в этой области расстояний волна распространяется как в свободном пространстве. Очевидно, это обусловлено наличием поверхностей, ограничивающих волну, что и дало повод говорить здесь о «волноводном» эффекте.

При смещении приемника и передатчика от центральной линии к одной из стен характер поведения $V_{\text{USB}}(r)$ усложняется, так как отраженные волны становятся разными и начинают «конкурировать» (рис. 5). Области расстояний r , в которых волны становятся коррелированными с другими волнами, расходятся по шкале расстояний, что дает более сложную картину экстремумов, а также уменьшение размаха колебаний $V_{\text{USB}}(r)$. Однако, графики на рис. 4 имеют то общее свойство, что при $r \rightarrow \infty$ они ожидаемо сходятся к асимптоте $V_{\text{USB}} = 1$ (0 дБ).

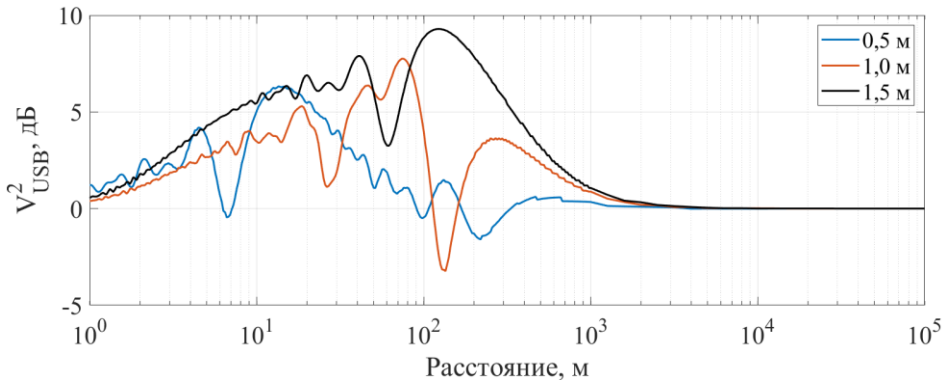


Рис. 5. Интерференционный множитель $V_{\text{USB}}^2(r)$ при отражении от стен. Кривые соответствуют позиции приемника и передатчика относительно от одной из стен.

Fig. 5. Interference factor $V_{\text{USB}}^2(r)$ when reflected from walls.

The curves correspond to the position of the receiver and transmitter relative to one of the walls

Отражение этой же СШП волны от пары поверхностей «пол — потолок» происходит аналогично (рис. 6). Поляризация падающей волны здесь, соответственно, вертикальная. Так как «высоты» расположения антенн передатчика и приемника относительно пола и потолка сильно различаются, области расстояний на графике, в которых наблюдаются колебания, соответствующие интерференции прямой и одной из отраженных волн, заметно разошлись. Интерференционные колебания, соответствующие отражению от пола, наблюдаются в области $r = 10\text{—}50$ м, а отражению от потолка — в области $r = 100\text{—}1000$ м. Так, максимум на расстоянии около $r = 35$ м соответствует разности хода $\Delta r = \lambda/2$ прямой волны и волны, отраженной от пола ($h = 0,8$ м), а минимум — на расстоянии около $r = 550$ м — разности хода $\Delta r = \lambda$ прямой волны и волны, отраженной от потолка ($h = 4,0$ м).

Одновременный учет отражений от пола-потолка и стен дает график $V_{\text{USB}}^2(r)$ на рис 7.

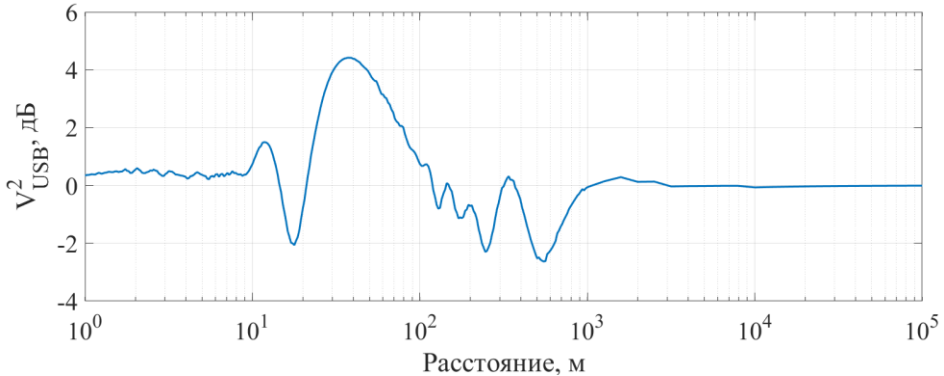


Рис. 6. Интерференционный множитель $V^2_{\text{USB}}(r)$. Отражение от пола ($h = 0,8$ м) и потолка ($h = 4,0$ м).

Fig. 6. Interference factor $V^2_{\text{USB}}(r)$. Reflection from the floor ($h = 0.8$ m) and ceiling ($h = 4.0$ m)

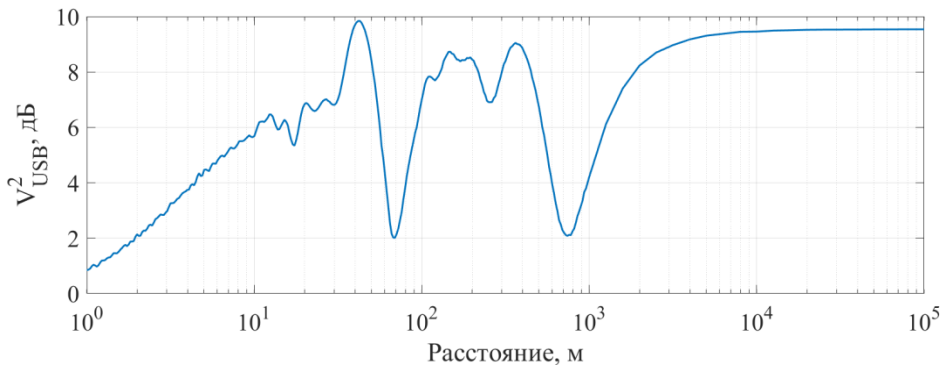


Рис. 7. Интерференционный множитель $V^2_{\text{USB}}(r)$. Отражение от пола, потолка и стен.

Fig. 7. Interference factor $V^2_{\text{USB}}(r)$. Reflection from the floor, the ceiling and the walls

Главное отличие кривой на рис. 7 то, что на больших расстояниях график выходит на асимптоту $V^2_{\text{USB}}(r) = 9$ (9,5 дБ), а не $V^2_{\text{USB}}(r) = 1$ (0 дБ). Это связано с тем, что при суммировании прямой волны $s(t)$ и четырех отраженных $u(t)$, равных ей по амплитуде и противоположных по знаку (при суммировании не учитывалась поляризация), суммарный сигнал равен $-3u(t)$, что и дает множитель по амплитуде $V_{\text{USB}}(r) = 3$ (4,8 дБ), а по мощности $V^2_{\text{USB}}(r) = 9$ (9,5 дБ) (см. рис. 7). Этот результат еще раз подтверждает, что многолучевая среда позволяет собрать больше энергии в точке приема, чем свободное пространство. Однако, так как $V_{\text{USB}}(r) = \text{const}$, скорость затухания мощности волны на больших расстояниях такая же, как в свободном пространстве, $n = 2$.

Таким образом, в рамках данной модели интерференционный множитель $V_{\text{USB}}(r)$ можно аппроксимировать зависимостью $V_{\text{USB}}(r) = \text{const}$, за исключением небольших по размаху колебаний (несколько децибел) на малых расстояниях. Благодаря этому расчетный показатель затухания n всегда не хуже, чем в свободном пространстве, т. е. $n \leq 2$, а формула Введенского в помещении не работает. Физический механизм данного явления заключается, по-видимому, в том, что распространение волны ограничивается объемом помещения, поэтому энергия волны не теряется так, как это происходит на открытой местности, где волна рассеивается на бесконечности.

В то же время нельзя не заметить, что кривая $V_{\text{USB}}(r)$ на рис. 4—7 выходит на асимптоту $V_{\text{USB}}(r) = \text{const}$ на расстояниях, которые не имеют большого смысла, поскольку трудно говорить о помещениях с линейными размерами много больше 100 м. Поэтому практическую ценность имеет только начальная область графиков $V_{\text{USB}}(r)$: именно на относительно малых расстояниях происходит эффективное накопление мощности сигнала за счет некогерентного сложения мощности прямой и отраженных волн и происходит многолучевое усиление сигнала по отношению к свободному пространству [6].

3. Заключение

В докладе исследован вопрос распространения сверхширокополосной волны в помещении. Предложено обобщение классической двухлучевой модели, учитывающее парный характер основных отражений волны в помещении от параллельных поверхностей типа «пол — потолок», противоположные стены. Путем численного моделирования показано, что, в отличие от открытого пространства, в помещении не происходит дополнительного затухания мощности волны, более того, в многолучевой среде на входе приемника собирается больше энергии, чем в свободном пространстве, поэтому в случае прямой видимости показатель затухания мощности волны всегда $n \leq 2$.

Это объясняется тем, что на открытой местности прямая волна в точке приема гасится волной, отраженной от земли, так как при отражении фаза волны меняется на π (что эквивалентно изменению знака для СШП волны). В то же время в помещении в точку приема кроме прямой волны приходят, минимум, две отраженные волны (в каждой плоскости отражения), поэтому после суммирования волн остается минимум одна отраженная волна. По всей видимости, важно не столько то, чтобы отражения были парными, сколько то, чтобы имелись два или более отраженных лучей.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. По скорости затухания мощности сверхширокополосного сигнала среда помещения приближается к свободному пространству.

2. Открытая местность и помещения представляют собой очень разные среды распространения, поэтому прямое сравнение характеристик систем связи в этих средах неоправдано.

3. Предельная дальность действия *сверхширокополосных* систем связи в помещении (в условиях прямой видимости, *LOS*) должна быть выше, чем на открытой местности.

Список литературы

1. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. 4-е изд. М. : Связь, 1972. 336 с.
2. Aguiar A., Gross J. Wireless Channel Models. Technical Report TKN-03-007. Berlin : April 2003.
3. Jodalén V., Pugh J., Vigneron P. Wideband propagation characteristics at 312 MHz in Eastern Norway and impact on waveform requirements // Proc. 2015 IEEE Mil. Comm. Conf. (MILCOM 2015). 2015. P. 1673—1678.
4. Tuset-Peiró P., Anglès-Vazquez A. et al. On the suitability of the 433 MHz band for M2M low-power wireless communications: propagation aspects // Trans. Emerging Tel. Tech. 2013. Vol. 25, no. 12. P. 1154—1168.
5. Molisch A. F. Wireless Communications. 2nd ed. Wiley, 2010.
6. Экспериментальное исследование распространения сверхширокополосных хаотических сигналов в помещениях / Ю. В. Андреев и др. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2013. № 3. С. 55—66.
7. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы. М. : Наука, 1966.

Информация об авторах

Андреев Юрий Вениаминович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, заведующий лабораторией беспроводных технологий Московского физико-технического института, Российская Федерация.

Петросян Манвел Мгерович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Российская Федерация.

“Waveguide” Effect of Ultrawideband Signal Indoor Propagation

Yu. V. Andreyev^{1,2} and M. M. Petrosyan¹

¹ *Institute of Radio Engineering and Electronics n. a. V. A. Kotelnikov RAS
11, bldg. 7 Mokhovaya st., Moscow, GSP-3, 125009, Russian Federation
andreev.iuv@mipt.ru*

² *Moscow Institute of Physics and Technology (national research university)
9, Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation*

Received: May 19, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: “Waveguide” effect that occurs by indoor propagation of ultrawideband signals is shown. The effect exhibits itself in the absence of interference factor of signal dissipation at any distance. Unlike outdoor propagation, the signal attenuation in multipath indoor environment is similar to free space. The effect occurs due to reflections of the incident wave from paired opposite surfaces, e.g., floor – ceiling, parallel walls. As a result, the distance range of indoor ultrawideband communications is essentially higher than outdoors. The effect is simulated in a three-ray reflection model.

Keywords: ultrawideband, signal propagation, two-ray reflection model, Vvedensky formula, chaotic signal.

For citation (IEEE): Yu. V. Andreyev and M. M. Petrosyan, ““Waveguide” Effect of Ultrawideband Signal Indoor Propagation,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 304–317, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.22. (In Russ.).

References

- [1] M. P. Dolukhanov, *Propagation of radio waves*. 4th ed. Moscow: Svyaz', 1972. (In Russ.).
- [2] A. Aguiar and J. Gross, *Wireless Channel Models*, Technical Report TKN-03-007, Berlin, April 2003.
- [3] V. Jodalén, J. Pugh, and P. Vigneron, “Wideband propagation characteristics at 312 MHz in Eastern Norway and impact on waveform requirements,” *Proc. 2015 IEEE Mil. Comm. Conf. (MILCOM 2015)*, pp. 1673–1678, 2015.
- [4] P. Tuset-Peiró, A. Anglès-Vazquez, J. López-Vicario, and X. Vilajosana-Guillén, “On the suitability of the 433 MHz band for M2M low-power wireless communications: propagation aspects,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 25, no. 12, pp. 1154–1168, Jul. 2013, doi: 10.1002/ett.2672.
- [5] A. F. Molisch, *Wireless Communications*, 2nd ed. Wiley, 2010.
- [6] Yu. V. Andreev, A. S. Dmitriev, V. A. Lazarev, and A. I. Ryzhov, “Experimental study of the propagation of ultra-wideband chaotic signals in rooms,” *Uspekhi sovr. radioelectron.*, no. 3, pp. 55–66, 2013. (In Russ.).

- [7] S. M. Rytov, *Introduction to statistical radiophysics. Part 1. Random processes*, Moscow: Nauka, 1966. (In Russ.).

Information about the authors

Yuri V. Andreyev, Dr.Sci., senior researcher of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, head of Wireless technology lab of the Moscow Institute of Physics and Technology, Russian Federation.

Manvel M. Petrosyan, C.Sci., researcher of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Russian Federation.

УДК 621.383

Интегральные оптические волноводы на основе пленок Si_3N_4

^{1,2} Кулинич И. В., ² Сомогонянц А. А.,
^{1,2} Шестериков Е. В., ² Моховиков Д. М.

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
пр-т Ленина, д. 40, г. Томск, 634050, Российская Федерация
kulinich@tusur.ru

² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева
пл. Академика Зуева, д. 1, г. Томск, 634055, Российская Федерация

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В работе представлены исследования, направленные на разработку технологии формирования гребенчатого интегрально-оптического волновода на основе пленки Si_3N_4 . Приведены результаты исследования влияния режимов плазменного осаждения на структуру пленок SiO_2 и Si_3N_4 и режимов плазменного травления волновода на профиль гребенки и шероховатость поверхности.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, фазовая решетка, нитрид кремния на изоляторе.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Интегральные оптические волноводы на основе пленок Si_3N_4 / И. В. Кулинич и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 3. С. 318—324.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Интегральные оптические волноводы на основе пленок Si_3N_4 / И. В. Кулинич, А. А. Сомогонянц, Е. В. Шестериков, Д. М. Моховиков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 318—324.

1. Введение и основная часть

В настоящее время актуальным вопросом является сопряжение оптоволоконна с интегральным волноводом, что играет важную роль в интегральных фотонных технологиях.

В фотонных интегральных схемах (ФИС) для достижения высокой эффективности ввода света при соединении оптоволоконна диаметром 10 мкм

и волновода диаметром 1 мкм необходимо использовать дополнительные конструкции, так называемые элементы ввода.

Наиболее распространенные платформы ФИС, где необходимо применять решеточные методы ввода, являются платформы на основе материалов кремний на изоляторе (*SoI*) и нитрид кремния на изоляторе (*SiNoI*). Кроме этого, на сегодняшний день активно ведется разработка волноводов на тонкопленочном ниобате лития на изоляторе (LiNbO_3).

На основе проведенного литературного обзора и проведенных расчетов [1—3] была выбрана волноводная структура нитрида кремния на изоляторе, толщиной 350 нм и шириной 1 мкм, расположенная на пленке SiO_2 , толщиной 2 мкм, и покрывающей пленки SiO_2 толщиной 2 мкм.

Осаждение пленки SiO_2 осуществлялось методом плазмохимического осаждения в плазме $\text{SH}_4/\text{N}_2\text{O}$ при *ICP* мощности 600 Вт. Формирование гребенчатого волновода осуществлялось методом плазмохимического травления в плазме SF_6 на установке *STE ICP200E* через фоторезистивную маску травления. На рисунках 1, 2 представлены фотографии гребенчатых волноводов при различных режимах травления.

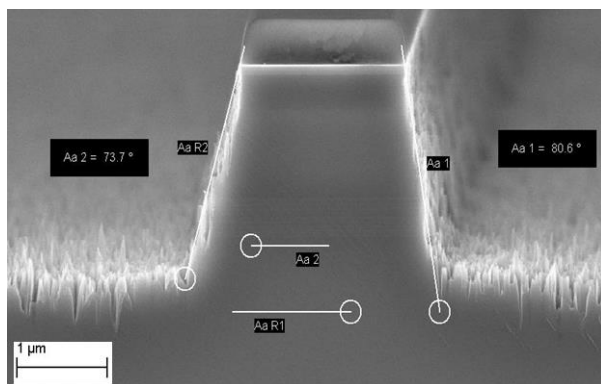


Рис. 1. Фотография СЭМ после травления Si_3N_4 при давлении в рабочей камере 1,5 Па.

Fig. 1. SEM photograph after etching Si_3N_4 at a pressure in the working chamber of 1.5 Pa

Из рисунка 1 видно, что при рабочем давлении в камере 1,5 Па на поверхности подложки наблюдается образование неровности. Повышение давления позволило снизить неровность, однако наблюдается образование углублений у нижней грани волновода и наклон стенок (рисунок 2). В результате экспериментов было выявлено, что для получения вертикальных стенок необходимо увеличивать *RIA* мощность, а оптимальное давление в камере составляет 3 Па. На рисунке 3 представлена фотография СЭМ при оптимальном режиме травления.

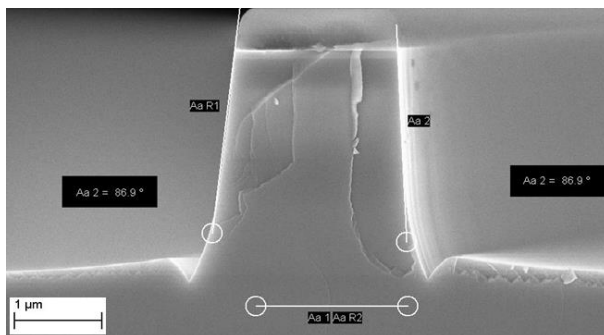


Рис. 2. Фотография СЭМ после травления волновода.

Fig. 2. SEM photograph after waveguide etching

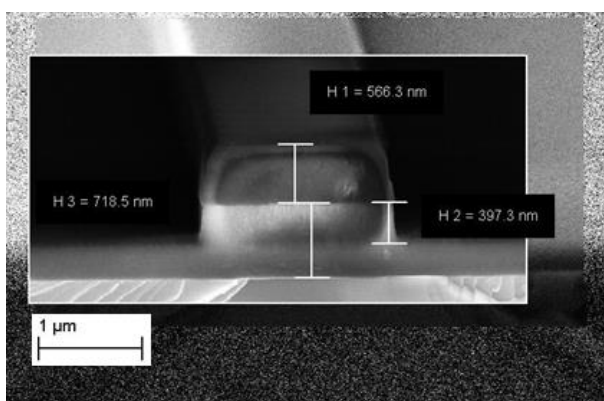


Рис. 3. Фотография СЭМ образца при оптимальном режиме травления.

Fig. 3. SEM photograph of the sample in the optimal etching mode

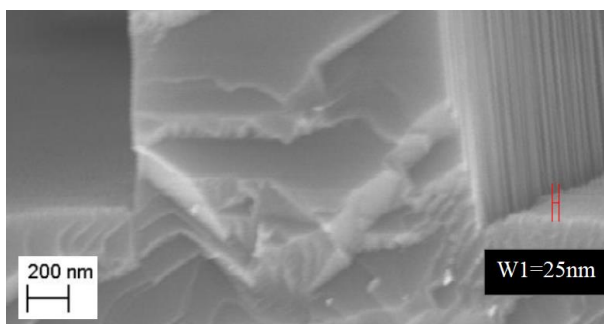


Рис. 4. Фотография СЭМ части волновода.

Fig. 4. SEM photograph of a part of the waveguide

На рисунке 4 представлена фотография области оптического волновода, отображающая шероховатость боковой стенки.

На рисунке 5 представлена фотография результатов измерения шероховатости поверхности пленки Si_3N_4 , проведенные на оптическом профилометре *Filmetrics Profil3D*.

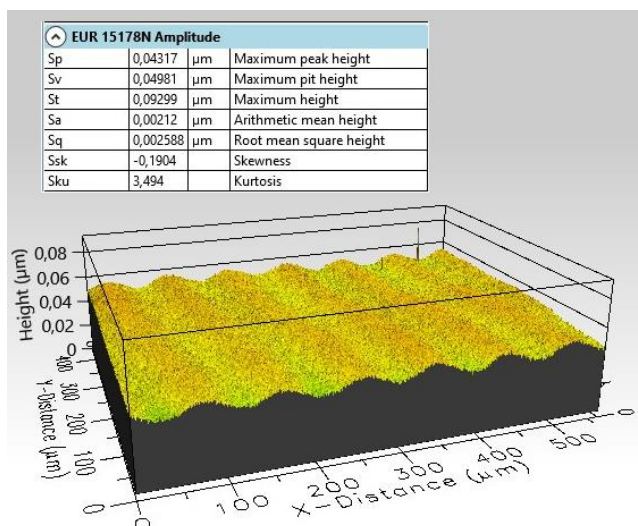


Рис. 5. Фотография результатов измерения шероховатости поверхности пленки Si_3N_4 .

Fig. 5. Photograph of the results of measuring the surface roughness of the Si_3N_4 film.

На основании проведенных измерений (рисунки 4, 5) можно делать вывод, что шероховатость поверхности пленки составляет менее 10 нм, шероховатость боковой границы волновода составляет не более 25 нм. В работах [1, 4] представлены исследования, что для длины волны 1,5 мкм шероховатость поверхности менее 250 нм не влияет на потери в волноводе, поэтому считаем, что, дальнейшее уменьшение шероховатости регулировкой техпроцесса не требуется.

Для регулирования напряженности пленки были проведены исследования влияния газовой смеси на напряженность. Согласно проведенному литературному обзору, управлением внутренними напряжениями пленки Si_3N_4 , полученной методом плазмохимического осаждения в индуктивно связанной плазме, осуществляется за счет добавления NH_3 . Для отработанного режима осаждения пленки Si_3N_4 измеренные внутренние напряжения составили 300 Па. Исследование влияния NH_3 показали, что для достижения внутренних напряжений равных 0 Па, поток газа NH_3 должен составлять 3 sccm.

Для ввода-вывода света [5], была рассчитана фазовая решетка, период которой составил 0,8 мкм, коэффициент заполнения 0,5. Для реализации фазовой решетки, проводилось травление волновода на глубину 150 нм через резистивную маску.

2. Заключение

Работа была направлена на разработку технологии формирования интегрально оптических волноводов на основе пленок Si_3N_4 , полученных методом плазмохимического осаждения. В результате были отработаны процессы формирования гребенчатых волноводов с вертикальными стенками и шероховатостью боковой грани менее 25 нм. Проведение измерения показали, что вносимые потери S_{21} полученной структуры оптического волновода составили $-0,1$ дБ/см.

Благодарности

Работы выполнены на оборудовании ЦКП «Импульс» ТУСУР. Отработка технологических режимов травления оптических волноводов выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10077. Расчеты геометрических размеров оптических волноводов проводились в рамках ГЗ НИОКТР № АААА-А19-119110690036-9.

Список литературы

1. Antelius M., Gylfason K. B., Sohlstrom H. An apodized SOI waveguide-to-fiber surface grating coupler for single lithography silicon photonics // Opt. Express. 2011. Vol. 19. P. 3592—3598.
2. Никоноров Н. В., Шандаров С. М. Волноводная фотоника : курс лекций. СПб : СПбГУ ИТМО, 2008. 143 с.
3. Chrostowski L., Hochberg M. Silicon photonics design : from devices to systems. Cambridge : Cambridge University Press, 2015.
4. Гребенчатый Y-делитель на основе тонкопленочного ниобата лития / И. В. Кулинич и др. // Наноиндустрия. 2020. Т. 13, № S5-2 (102). С. 370—374.
5. Обзор геометрических параметров решеточных элементов на основе материалов Si/SiO₂ и Si₃N₄/SiO₂ / О. В. Тертишная и др. В сб. : Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2021. № 1-1. С. 37—41.

Информация об авторах

Кулинич Иван Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева РАН, г. Томск.

Сомогонянц Алина Алексеевна, магистрант кафедры электронных приборов ТУСУР, инженер института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева РАН, г. Томск.

Шестериков Евгений Викторович, начальник лаборатории «Радиофотоника» института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева РАН, г. Томск. Директор НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР, г. Томск.

Моховиков Денис Максимович, магистрант кафедры физической электроники ТУСУР, инженер института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева РАН, г. Томск.

Integrated Optical Waveguides Based on Si_3N_4 Films

I. V. Kulinich^{1,2}, A. A. Somogonyants^{1,2},
E. V. Shesterikov^{1,2}, and D. M. Mokhovikov²

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, prosp. Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation
kulinich@micran.ru

²Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuyeva SB RAS
1, Acad. Zuyev sq., Tomsk, 634055, Russian Federation

Received: May 20, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: The paper presents studies at developing a technology for the formation of a rib integrated optical waveguide based on a Si_3N_4 film. The effect of ICP deposition modes on the structure of SiO_2 and Si_3N_4 films and the effects of RIE etching of the waveguide on the rib profile and surface roughness are studied.

Keywords: PIC, phase grating, silicon nitride on insulator.

For citation (IEEE): I. V. Kulinich, A. A. Somogonyants, E. V. Shesterikov, and D. M. Mokhovikov, "Integrated Optical Waveguides Based on Si_3N_4 Films," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 318–324, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.23. (In Russ.).

Acknowledgements

The work was carried out on the equipment of TsKP "Impulse" TUSUR. Development of technological modes of etching of optical waveguides was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 21-79-10077. Calculations of the geometrical dimensions of optical waveguides were carried out in the framework of the GR NIOKTR No. AAAA-A19-119110690036-9.

References

- [1] M. Antelius, K. B. Gylfason, and H. Sohlström, "An apodized SOI waveguide-to-fiber surface grating coupler for single lithography silicon photonics," *Optics Express*, vol. 19, no. 4, p. 3592, Feb. 2011, doi: 10.1364/oe.19.003592.
- [2] N. V. Nikonorov and S. M. Shandarov, *Waveguide photonics: a course of lectures*, St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2008. (In Russ.).
- [3] L. Chrostowski and M. Hochberg, *Silicon photonics design: from devices to systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015, doi: 10.1017/CBO9781316084168.

- [4] I. V. Kulinich, A. A. Gulyaeva, E. V. Shesterikov, V. A. Dybov, and A. I. Kazimirov, “Comb Y-division based on thin-film lithium niobate,” *Nanoindustry Russia*, vol. 13, no. 5s, pp. 370–374, Dec. 2020, doi: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.370.374. (In Russ.).
- [5] O. V. Tertishnaya, I. V. Kulinich, A. A. Sogomonyants, and A. A. Gulyaeva “Review of geometric parameters of lattice elements based on Si/SO₂ and Si₃N₄/SiO₂ materials, *Electronic means and control systems. Materials of reports of the International scientific-practical conference*, no. 1-1. pp. 37–41, 2021. (In Russ.).

Information about the authors

Ivan V. Kulinich, candidate of technical sciences, researcher at the Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuev RAS, Tomsk, Russian Federation.

Alina A. Somogonyants, master student of the Department of Electronic Devices TUSUR, engineer at the Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuev RAS, Tomsk, Russian Federation.

Evgeniy V. Shesterikov, head of the laboratory “Radiophotonics” of the Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuev RAS, Tomsk. Director of REC “Nanotechnologies” TUSUR, Tomsk, Russian Federation.

Denis M. Mokhovikov, master student of the Department of Physical Electronics TUSUR, engineer at the Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuev RAS, Tomsk, Russian Federation.

УДК 621.3.032.217

Экспериментальные исследования характеристик фотокатодов ультрафиолетового диапазона спектра

Пхайко Н. А., Кондратьев А. А., Пахомов С. Н.,
Потапов А. В., Сорокин И. А., Тищенко А. С.

ФГУП Российский Федеральный Ядерный Центр —
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина
ул. Васильева, д. 13, г. Снежинск,
Челябинская область, 456770, Российская Федерация
dep5@vniitf.ru

Получено: 20 июля 2022 г.

Отрецензировано: 22 июля 2022 г.

Принято к публикации: 22 июля 2022 г.

Аннотация: Фотоэмиссионные элементы с высокой чувствительностью к квантам ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра имеют большой круг практических применений в ускорительной технике и генераторах сверхкоротких электромагнитных импульсов СВЧ-диапазона. Потенциальные выгоды применения УФ фотокатодов в данных областях техники определяются таким сочетанием их свойств, как высокая электропрочность и большой квантовый выход. В докладе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик фотокатодов на основе магний-бариевых (Mg-Ba) сплавов и иодида цезия (CsI). Фотокатоды изготавливались методом термического вакуумного распыления на полированные подложки из нержавеющей стали. Впервые показано, что электрическая прочность вакуумных промежутков с УФ катодами существенно выше, чем с сурьмяно-цезиевыми катодами видимого диапазона спектра (для CsI катодов — в 2,5 раза, для Mg-Ba катодов — более, чем в три раза). Квантовая эффективность Mg-Ba катодов составляет ~1 % на длине волны 247 нм, CsI катодов — 7,5 % на длине волны 196 нм. Впервые приведены результаты исследований динамики снижения квантовой эффективности фотокатодов при импульсно-периодическом облучении их лазерными импульсами с флюенсом ~6 мкДж/см². Проведено сравнение характеристик фотокатодов с точки зрения их практических применений.

Ключевые слова: фотоэмиссионные элементы, генераторы сверхкоротких электромагнитных импульсов, магний-бариевый сплав, иодид цезия, термическое вакуумное распыление, электрическая прочность, квантовая эффективность.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Экспериментальные исследования характеристик фотокатодов ультрафиолетового диапазона спектра / Н. А. Пхайко и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 3. С. 325—341.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Экспериментальные исследования характеристик фотокатодов ультрафиолетового диапазона спектра / Н. А. Пхайко, А. А. Кондратьев, С. Н. Пахомов и др. // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 325—341.

1. Введение

Для создания электронных пучков с высоким зарядом и малым эмитансом в ускорительной технике используется фотоинжектор [1, 2]. Компенсация сил пространственного заряда в таких устройствах достигается за счет увеличения электрического поля в катод-анодном зазоре. Но повышению электрического поля препятствует вакуумный пробой, порог напряженности поля которого зависит от материала фотокатода (ФК) и от состояния его поверхности. Помимо этого, фотокатоды должны иметь высокую квантовую эффективность (КЭ), при этом время отклика фототока для мгновенного источника излучения не должно превышать единиц пикосекунд. Важным параметром, определяющим практическое применение фотокатода, является также ресурс его работы. Поэтому исследование характеристик перспективных типов фотокатодов является актуальной задачей.

В первых инжекторных системах ускорителей электронов использовались полупроводниковые $SbCs_3$ фотокатоды. Но, несмотря на их высокую квантовую эффективность $(5—15) \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 405$ нм), вакуумный промежуток с таким типом фотокатодов обладал низкой (50 кВ/мм) электрической прочностью [3, 4]. Также такие фотокатоды чувствительны к остаточной атмосфере внутри фотоинжектора, что значительно снижало время их непрерывной работы.

Более высокой электрической прочности катод-анодного зазора возможно достичь за счет использования металлических фотокатодов. Так для магниевого ФК она составляет 120 кВ/мм [5]. Он также обладает малым временем отклика фототока для мгновенного источника излучения. Существенным недостатком такого фотокатода являлась его низкая квантовая эффективность $7 \cdot 10^{-4}$ эл./квант ($\lambda = 266$ нм). Однако существуют металлические катоды на основе $Mg-Ba$ сплавов, которые обладают селективной чувствительностью в области ближнего ультрафиолета. В различных ли-

тературных источниках значения квантовой эффективности для таких ФК имеют сильное расхождение: $7 \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 280$ нм) [6—8]; $6 \cdot 10^{-3}$ эл./квант ($\lambda = 249$ нм) [9]; $5 \cdot 10^{-3}$ эл./квант ($\lambda = 253$ нм) [10, 11]. Но результатов исследований электрической прочности вакуумного промежутка с *Mg-Ba* фотокатодом, а также его ресурса работы при облучении ФК импульсно-периодическим лазерным излучением (ЛИ) в литературе представлено не было.

К стабильным на воздухе фотокатодам, имеющим высокую чувствительность в области длин волн менее 200 нм, можно отнести фотокатоды на основании щелочно-галогенного соединения *CsI* [12—15]. Исследование *CsI* в качестве материала для фотокатода инжекторов электронов проводилось в ЦЕРНе [16]. Его квантовая эффективность составляла $7.5 \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 193$ нм). Были представлены результаты долговременной работы *CsI* фотокатода в переменном электрическом поле амплитудой 70 МВ/м и частотой повторения 2998.54 МГц. Длительность одиночного импульса составляла 2,5 мкс. Разовые пробои были замечены при увеличении амплитуды напряженности поля на катоде до 73 МВ/м, а при увеличении его до 80 МВ/м наблюдались постоянные пробои с разрушением чувствительного слоя. Но результатов исследований электрической прочности вакуумного промежутка с *CsI* фотокатодом при подаче на него импульсного напряжения питания, а также ресурса работы ФК при облучении его импульсно-периодическим ЛИ в литературе представлено не было.

Целью работы является исследование электрической прочности вакуумного промежутка с *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодом, а также их ресурса работы при облучении импульсно-периодическим ЛИ.

2. Разборный вакуумный фотоэлемент

Для отработки технологии изготовления ФК и исследования их характеристик разработан и изготовлен разборный высоковольтный вакуумный фотоэлемент (ФЭ). Его конструкция представлена на рисунке 1.

Характеристики разборного фотоэлемента.

Подложка фотокатода представляет собой цилиндр диаметром 60 мм из стали 12X18H9T, рабочая поверхность которого полировалась алмазными пастами и имела шероховатость $Ra = 7 \pm 3$ нм.

Анод представляет собой набор вольфрамовых проволок диаметром 0,05 мм, расположенных параллельно друг другу с шагом 0,5 мм и закрепленных на рамке.

Расстояние между катодом и анодом равно $0,77 \pm 0,02$ мм.

Волновое сопротивление коаксиальной линии ФЭ 75 Ом.

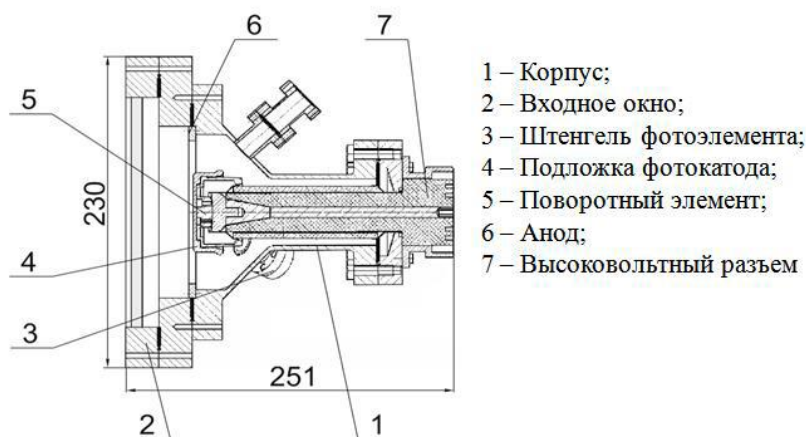


Рис. 1. Конструкция разборного фотоэлемента.

Fig. 1. The design of a collapsible photocell

Таблица 1. Коэффициент пропускания входного окна фотоэлемента.

Table 1. Transmittance of the input window of the photocell

Длина волны ЛИ, нм	Угол падения ЛИ	
	0°	45°
195,7	0,68±0,07	0,58±0,07
259,6	0,81±0,05	0,72±0,05

Измерения напряжения непосредственно на анод-катодном зазоре не представлялось возможным, поэтому для его регистрации был разработан емкостной делитель напряжения, размещавшийся в высоковольтном разьеме фотоэлемента. Расстояние от делителя до катод-анодного зазора составляло ~20 см. На рисунке 2 представлена конструкция емкостного делителя напряжения.

Коэффициент деления емкостного делителя равен 3700 ± 600 . Импульсное напряжение ($\tau \approx 5$ нс), регистрируемое емкостным делителем, отличается по амплитуде в $K = 1,2$ раза (определялось расчетно) от напряжения на анод-катодном зазоре и равно сумме напряжений проходящей и отраженной волн от емкости анод-катодного зазора.

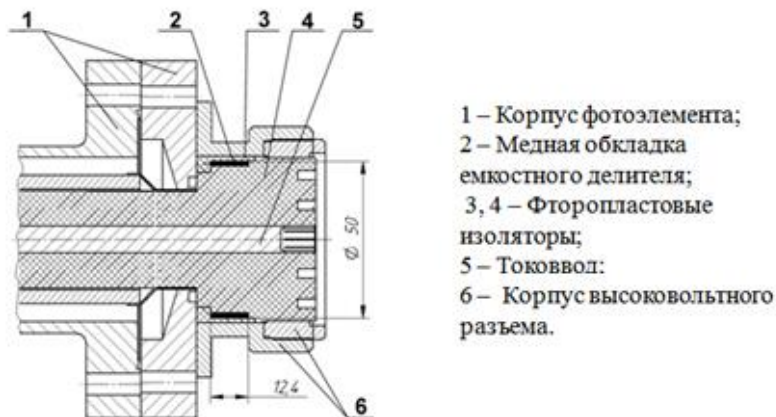


Рис. 2. Емкостной делитель напряжения.

Fig. 2. Capacitive voltage divider

3. Изготовление и исследование квантовой эффективности CsI фотокатода

Иодид-цезиевый фотокатод изготавливался методом резистивного распыления в установке УВН-2М с последующим переносом его через атмосферу и монтажом в разборный фотоэлемент. Для удаления воды из фоточувствительного слоя фотоэлемент прогревали до 70°C при постоянной откачке в течение 3 часов. Затем ФЭ снимали с откачного поста для проведения исследований.

Для проведения исследований было изготовлено два фотокатода с различными условиями напыления фоточувствительного слоя, которые представлены в таблице 2. Исследование КЭ проводилось при облучении ФК излучением 4-й гармоники Ti:Sapphire фемтосекундного лазера. Параметры проведения исследований КЭ также приведены в таблице 2.

Зависимость квантовой эффективности CsI фотокатода № 2 от напряженности электрического поля в анод-катодном зазоре представлена на рисунке 3.

Максимальная зарегистрированная в эксперименте квантовая эффективность составила $7,5 \cdot 10^{-2}$ эл./квант при напряженности электрического поля на катоде равном 7,8 кВ/мм. Данный результат хорошо согласуется с данными работы [12].

Таблица 2. Условия напыления фоточувствительного слоя.

Table 2. Conditions for deposition of the photosensitive layer

	Фотокатод №1	Фотокатод №2
Обезгаживание установки УВН-2М	нет	есть
Скорость напыления CsI, Å/сек	5	0,7
Толщина фотослоя, нм	500	400
Энергия ЛИ ($\lambda=195,7$), мкЛж	$1,1\pm0,1$	$0,5\pm0,1$
Напряженность электрического поля на катоде, кВ/мм	$1,94\pm0,12$	$1,55\pm0,12$
Квантовая эффективность в центре фотокатода, эл./квант	$(1,7\pm0,3)\cdot10^{-2}$	$(2,6\pm0,4)\cdot10^{-2}$

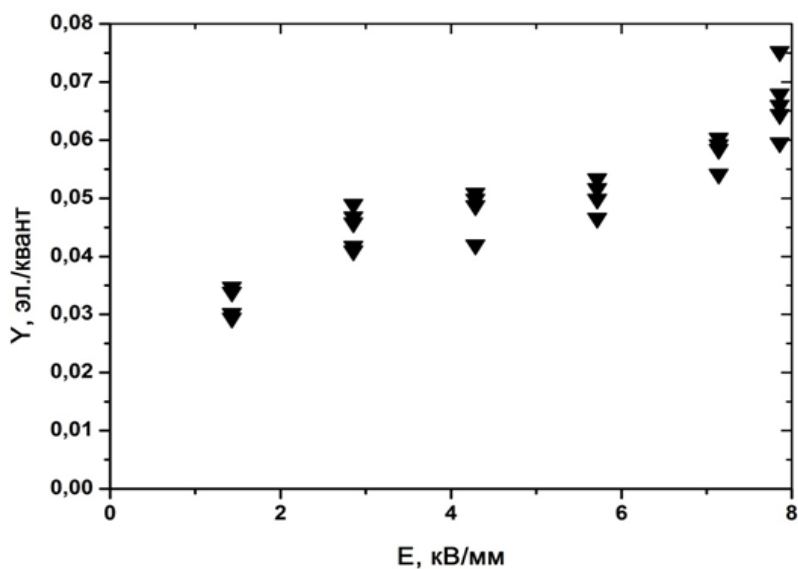


Рис. 3. Зависимость квантовой эффективности CsI фотокатода № 2 от напряженности поля в анод-катодном зазоре.

Fig. 3. Dependence of the quantum efficiency CsI of photocathode no. 2 on the field strength in the anode-cathode gap

4. Исследование электрической прочности вакуумного зазора с CsI фотокатодом

Для исследования электрической прочности катод-анодного промежутка на ФЭ подавалось импульсное напряжение от 13 кВ до максимального значения генератора импульсного напряжения (ГИН). На резистивной согласованной нагрузке 75 Ом максимальная амплитуда импульсов напряжения составляла ~ 105 кВ, а их длительность на полувысоте ~ 5 нс (рисунок 4). На рисунке 5 представлены осциллограммы импульсов, полученные с помощью емкостного делителя при различных напряжениях питания ФЭ.

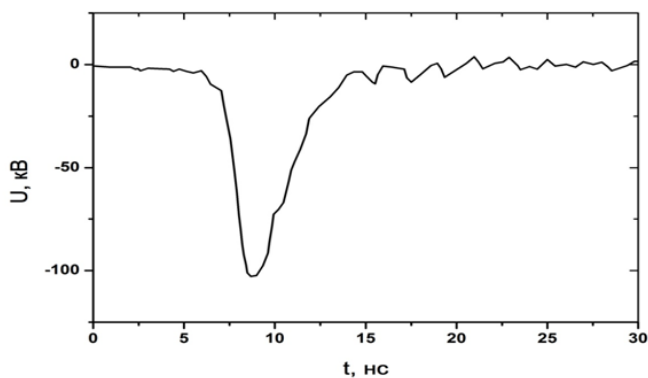


Рис. 4. Форма импульса ГИН на согласованную нагрузку 75 Ом.

Fig. 4. Impulse voltage generator pulse shape to a matched load of 75 Ohm

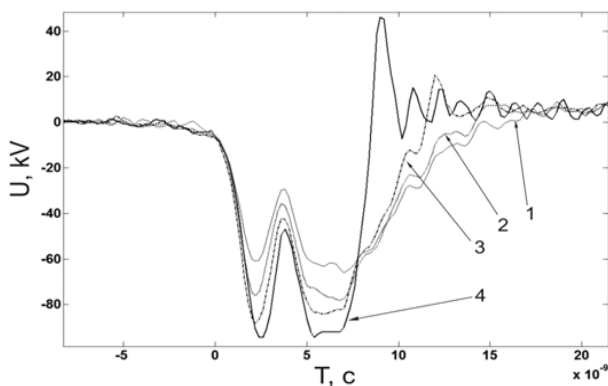


Рис. 5. Осциллограммы напряжений, зарегистрированные с помощью емкостного делителя (в скобках указаны значения напряжения на фотокатодe с учетом поправочного коэффициента $K = 1,2$): 1 – 60 кВ (72 кВ); 2 – 70 кВ (84 кВ); 3 – 84 кВ (100 кВ); 4 – 94 кВ (112 кВ).

Fig. 5. Oscillograms of voltages recorded using a capacitive divider (in parentheses are the voltage values on the photocathode, taking into account the correction factor $K = 1.2$): 1 – 60 kV (72 kV); 2 – 70 kV (84 kV); 3 – 84 kV (100 kV); 4 – 94 kV (112 kV)

На рисунке видно, что при напряжении на фотокатоде 84 кВ и менее никаких изменений профиля импульса не наблюдалось. На поверхности фотокатода следов пробоев замечено также не было.

При увеличении напряжения на фотокатоде до 100 кВ за счет автоэлектронной эмиссии начинает развиваться пробой и происходит уменьшение длительности импульса. На поверхности фотокатода замечены небольшие (менее 1 мм) следы пробоев. Их появление имело несистематический характер. После нескольких десятков импульсов пробой почти полностью прекратился, произошла тренировка фотокатода.

При увеличении напряжения на фотокатоде до 112 кВ произошло значительное сокращение длительности импульса (обострение), что, вероятно, было связано с переходом автоэлектронной эмиссии во взрывную, однако амплитуда импульса при этом изменялась мало. Воздействие таких импульсов напряжения с частотой следования 1 кГц (тысячи импульсов) не привело к улучшению электрической прочности вакуумного зазора. На поверхности фотокатода замечены следы значительных разрушений, представленные на рисунке 6.

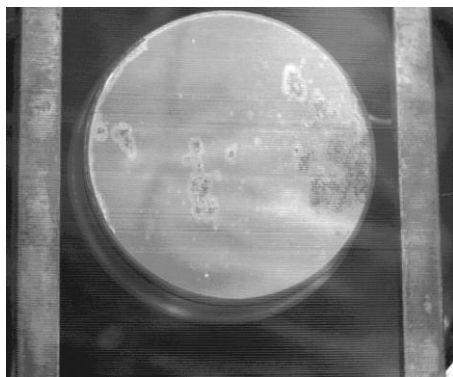


Рис. 6. Внешний вид фотокатода № 2 после исследования электропрочности.

Fig. 6. Appearance of photocathode No. 2 after the study of electric strength

С учетом расстояния като-анодного зазора, равного 0,77 мм, достигнутая электрическая прочность составила ~ 130 кВ/мм для импульсов напряжения ГИН с длительностью ~ 5 нс.

5. Исследование ресурса работы CsI фотокатода при его облучении импульсно-периодическими лазерными импульсами

Для исследования ресурса работы CsI фотокатодов их рабочую поверхность освещали излучением 4-й гармоники *Ti:Sa* фемтосекундного ла-

зера ($P_{\text{ли}} = 6,2 \text{ мкДж/см}^2$, $\lambda = 195,7 \text{ нм}$), при этом постоянно контролировали их КЭ. Надо отметить, что исследование ресурса работы ФК проводилось после исследований электрической прочности вакуумного зазора, где их рабочая поверхность была повреждена пробоями. На рисунке 7 представлена зависимость квантовой эффективности CsI фотокатодов от числа лазерных импульсов.

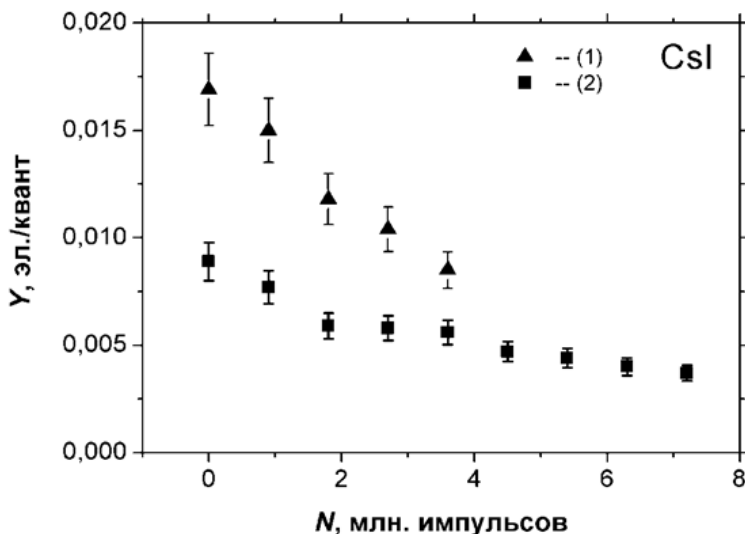


Рис. 7. Зависимость КЭ CsI фотокатода № 1 (1) и № 2 (2) от числа импульсов ЛИ.

Fig. 7. Quantum efficiency of CsI photocathode no. 1 (1) and no. 2 (2) as a function of the number of laser pulses

6. Изготовление и исследование *Mg-Ba* фотокатодов

Изготовление и исследование *Mg-Ba* фотокатодов проводили в разборном фотоэлементе. Предварительно перед нанесением фоточувствительного слоя он проходил процедуру обезгаживающего отжига. Затем на подложку ФК методом резистивного распыления слитков из *Mg* или *Mg-Ba* сплава наносили фоточувствительный слой. После чего ФЭ снимали с откачного поста. Слитки *Mg-Ba* изготавливались спеканием навесок из *Mg* и *Ba* в атмосфере аргона. Состав готового сплава контролировали методом рентгено-флуоресцентного анализа. Состав готовых слитков представлен в таблице 3.

Для исследования чувствительности *Mg-Ba* фотокатодов в ультрафиолетовом диапазоне длин волн использовались осветители со светодиодами UVTOP. Их характеристики представлены в таблице 4.

Таблица 3 — Table 3

Номер слитка	Mg, %	Ba, %	Примеси, %
1	99,96	0	0,04
2	86,82	12,91	0,27
3	69,40	30,31	0,29
4	36,40	63,22	0,38

Таблица 4 — Table 4

	UVTOP240TO39	UVTOP255TO39	UVTOP270TO39
P, мкВт	80	80	450
λ_0 , нм	247	264	273
Ширина спектра на полувысоте $\Delta\lambda$, нм	9	9	12

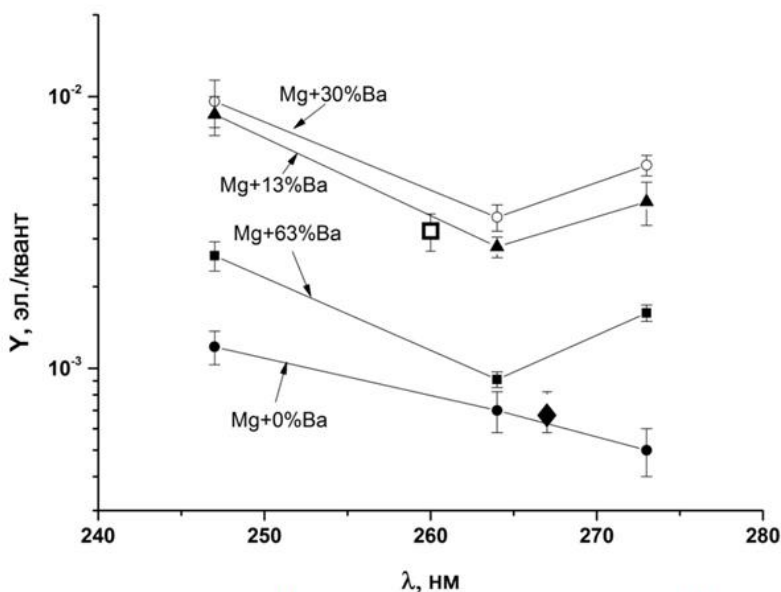


Рис. 8. Зависимость спектральной чувствительности фотокатодов от концентрации бария в распыляемом слитке. (■-) — значение квантовой эффективности для ФК, изготовленных из слитка № 3 и (◆-) — для слитка № 1, зарегистрированные в экспериментах на лазерном стенде.

Fig. 8. Dependence of the spectral sensitivity of photocathodes on the concentration of barium in the sputtered ingot. (■-) is the value of the quantum efficiency for photocathodes made from ingot no. 3 and (◆-) for ingot no. 1, registered in experiments on a laser bench

На рисунке 8 представлена спектральная чувствительность фотокатодов в зависимости от концентрации бария в слитке. Также на графике представлены данные по КЭ, зарегистрированной на лазерном стенде для фотокатодов, изготовленных из слитков № 1 и № 3.

Максимальной квантовой эффективностью $(1 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$ эл./квант обладал ФК, изготовленный из слитка № 3 при освещении его излучением с длиной волны 247 нм.

7. Исследование ресурса работы *Mg-Ba* фотокатода при его облучении импульсно-периодическими лазерными импульсами

Постановка эксперимента по исследованию ресурса работы *Mg-Ba* фотокатода была аналогичной, как и при исследовании *CsI* фотокатода, с той лишь разницей, что облучение ФК проводили с помощью излучения 3-й гармоники *Ti:Sa* фемтосекундного лазера ($P_{\text{ли}} = 6,2$ мкДж/см², $\lambda = 259,6$ нм). Результаты исследований ресурса работы ФК изготовленного из слитка № 3 представлены на рисунке 9.

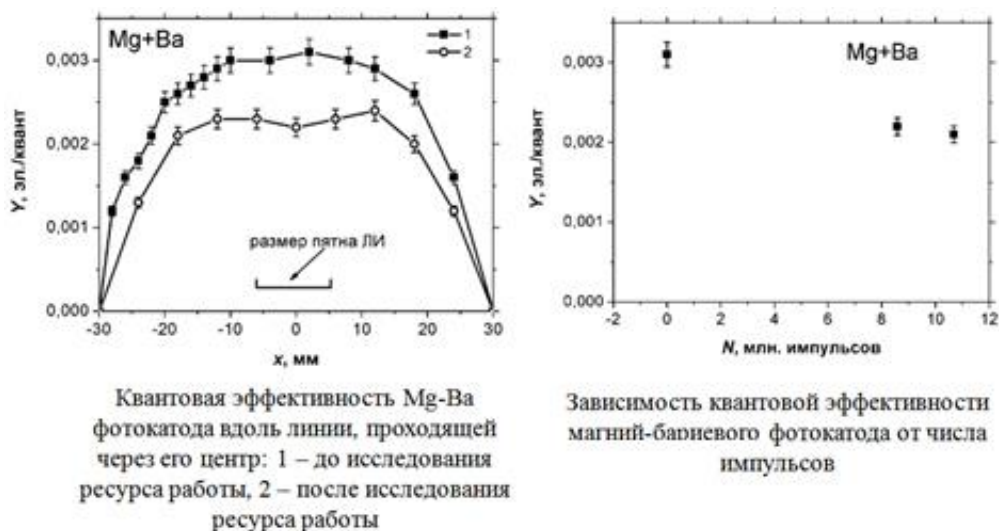


Рис. 9. Результаты исследований ресурса работы *Mg-Ba* фотокатода.

Fig. 9. Results of studies of the life of the *Mg-Ba* photocathode

На рисунке видно, что уменьшение квантовой эффективности ФК произошло не только в месте его облучения, но и по всей его площади. Вероятной причиной этого является отравление катода газами, выделяющимися в результате десорбции с поверхности корпуса фотоэлемента.

8. Исследование электрической прочности вакуумного зазора с *Mg-Ba* фотокатодом

Исследование электрической прочности вакуумного зазора с *Mg-Ba* фотокатодом проводилось также как в экспериментах с *CsI*. При повышении напряжения питания ФЭ с 13 кВ до максимального значения ГИН 105 кВ пробоев замечено не было. На рисунке 10 представлена осциллограмма напряжений, зарегистрированная с помощью емкостного делителя при максимальном значении ГИН.

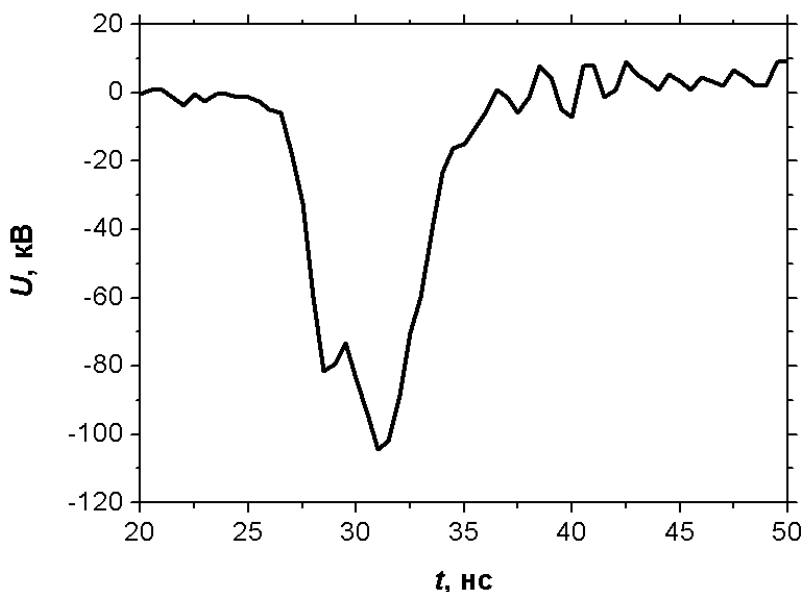


Рис. 10. Осциллограмма напряжения, полученная емкостным делителем при максимальном значении ГИН.

Fig. 10. Voltage waveform obtained by a capacitive divider at the maximum value from a pulse voltage generator

С учетом поправочного коэффициента $K = 1,2$ напряжение на фотокатоде составило 125 кВ, что соответствует напряженности поля в вакуумном промежутке фотоэлемента равном ~ 160 кВ/мм. Следов пробоя на фотокатоде обнаружено не было.

9. Заключение

Для отработки технологии изготовления и исследования перспективных типов фотокатодов разработан и изготовлен разборный высоко-

вольтный вакуумный фотоэлемент. Отработан способ изготовления *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодов.

Квантовая эффективность *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодов составила $7,5 \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 195,7$ нм) и $1 \cdot 10^{-2}$ эл./квант ($\lambda = 247$ нм) соответственно.

Впервые проведены исследования электрической прочности вакуумного зазора с *CsI* и *Mg-Ba* ФК. При подаче на ФЭ импульсного питания ($\tau \approx 5$ нс) оно составляет для *CsI* фотокатода ~ 130 кВ/мм, а для *Mg-Ba* фотокатода более 160 кВ/мм. Это существенно выше, чем значение электропрочности вакуумного зазора ФЭ с сурьмяно-цезиевым фотокатодом видимого диапазона спектра (для *CsI* катодов — в 2,5 раза, для *Mg-Ba* катодов — более чем в три раза).

Впервые проведены исследования ресурса работы *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодов при облучении их фемтосекундными лазерными импульсами с флюенсом $6,2$ мкДж/см². Показано, что падение квантовой эффективности *CsI* фотокатода в два раза происходит при облучении его 5,4 млн. лазерных импульсов ($\lambda = 195,7$ нм), а облучение *Mg-Ba* фотокатода — 11 млн. лазерными импульсами ($\lambda = 259,6$ нм), т. е. заметно не повлияли на его квантовую эффективность.

С учетом представленных данных и при использовании для инициирования электронов лазерных систем с эксимерными усилителями, которые позволяют свести к минимуму различие в квантовой эффективности между *CsI* и *Mg-Ba* фотокатодами, наиболее перспективным для дальнейшего применения является *Mg-Ba* фотокатод.

Список литературы

1. Photocathodes for free electron lasers / S. H. Kong, J. Kinross-Wright, D. C. Nguyen, R. L. Sheeld // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 1995. Vol. 358. P. 272—275.
2. Michelato P. Photocathodes for RF photoinjectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 1997. Vol. 393. P. 455—459.
3. Shefer E. et al. Laboratory Production of Efficient Alkali-Antimonide photocathodes // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. Vol. 411. P. 383—388.
4. Mete O. Study and Experimental Characterisation of a Novel Photo Injector for the CLIC Drive Beam. PhD thesis. EPFL, 2011.
5. Srinivasan-Rao T. et al. Performance of magnesium cathode in the S-band RF gun // Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference. 1997. P. 2790—2792.
6. Лифшиц Т. М., Кокина Н. Г. Фотокатоды для регистрации ультрафиолета на основе сплавов магния с барием // Радиотехника и электроника. 1958. № 9. С. 1199—1203.
7. Лифшиц Т. М., Кокина Н. Г., Политова Н. М. Фотоэлектрические свойства сплавов магния с барием // Радиотехника и электроника. 1960. № 8. С. 1267—1274.
8. Кокина Н. Г., Лифшиц Т. М. Способ изготовления фотокатода для регистрации ультрафиолетового излучения. А. с. 118425 (СССР). МПК : H01J 1/34, H01J 9/121958. Опубл. 01.01.1958.

9. Фотокатод, работающий в ультрафиолетовой области спектра / А. М. Бишаев и др. А. с. 1758704A1 (СССР). МПК : H01J 40/06. Опубл. 30.08.1992. Бюл. № 32.
10. Tkachenko V. G., Kondrashev A. I., Maksimchuk I. N. Advanced metal alloy systems for massive high-current photocathodes // *Applied Physics. B.* 2010. Vol. 98. P. 839—849.
11. Photoemissive properties of binary magnesium–barium and aluminium–lithium metallic alloys / V. G. Tkachenko et al. // *Appl. Phys. A.* 1996. Vol. 62. P. 285—287.
12. Breskin A. CsI UV photocathodes : history and mystery // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1996. Vol. 371. P. 116—136.
13. Бузулицков А. Ф. Газовые фотодетекторы с твердыми фотокатодами // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 2008. Т. 39. Вып. 3. С. 813—869.
14. Philipp H. R., Taft E. A. J. Photoelectric emission from the valence band of cesium iodide // *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 1956. Vol. 1, no. 3. P. 159—163.
15. Соммер А. Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М. : Энергия, 1973. 177 с.
16. Suberlucq G. Photocathodes en iodure de césium utilisées à fort courant, CERN-PS-92-29-LP, CLIC-Note-162, mai 1992. URL : <https://cds.cern.ch/record/236701/files/CM-P00058088.pdf>.

Информация об авторах

Пхайко Николай Анатольевич, начальник группы ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Кондратьев Александр Александрович, начальник группы ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Пахомов Сергей Николаевич, инженер-исследователь второй категории ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Потапов Анатолий Васильевич, кандидат физико-математических наук, начальник отдела ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Сорокин Илья Александрович, инженер-исследователь второй категории ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Тищенко Александр Станиславович, начальник группы ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина, Российская Федерация.

Experimental Studies of the Characteristics of Photocathodes of the Ultraviolet Range of the Spectrum

N. A. Pkhaiko, A. A. Kondratyev, S. N. Pakhomov,
A. V. Potapov, I. A. Sorokin, and A. S. Tishchenko

Russian Federal Nuclear Center –

*All-Russian Research Institute of Technical Physics n. a. acad. E. I. Zababakhin
13, Vasilyeva st. PO box 245, Snezhinsk, Chelyabinsk reg., 456770, Russian Federation
dep5@vniitf.ru*

Received: July 20, 2022

Peer-reviewed: July 22, 2022

Accepted: July 22, 2022

Abstract: Photoemission cells with high sensitivity to photons in the ultraviolet (UV) range of the spectrum have a wide range of practical applications in accelerator technology and generators of ultrashort electromagnetic pulses in the microwave range. The potential benefits of using UV photocathodes in these areas of technology are determined by such a combination of their properties as high electrical strength and high quantum efficiency. The report presents the results of experimental studies of the characteristics of photocathodes based on magnesium-barium (Mg-Ba) alloys and cesium iodide (CsJ). Photocathodes were fabricated by thermal vacuum sputtering on polished stainless steel substrates. It is shown that the dielectric strength of vacuum gaps with UV cathodes is significantly higher than with antimony-cesium cathodes in the visible range of the spectrum (for CsJ cathodes – 2.5 times, for Mg-Ba cathodes – more than three times). The quantum efficiency of Mg-Ba cathodes is ~1% at a wavelength of 247 nm, and that of CsJ cathodes is 7.5% at a wavelength of 196 nm. The results of studies of the dynamics of a decrease in the quantum efficiency of photocathodes under repetitively pulsed irradiation with laser pulses with a fluence $6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. The characteristics of photocathodes are compared from the point of view of their practical applications.

Keywords: photoemissive elements, generators of ultrashort electromagnetic pulses, magnesium-barium alloy, cesium iodide, thermal vacuum sputtering, electrical strength, quantum efficiency.

For citation (IEEE): N. A. Pkhaiko, A. A. Kondratyev, S. N. Pakhomov, A. V. Potapov, I. A. Sorokin, and A. S. Tishchenko, “Experimental Studies of the Characteristics of Photocathodes of the Ultraviolet Range of the Spectrum,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 325–341, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.24. (In Russ.).

References

- [1] S. H. Kong, J. Kinross-Wright, D. C. Nguyen, and R. L. Sheffield, "Photocathodes for free electron lasers," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 358, no. 1–3, pp. 272–275, Apr. 1995, doi: 10.1016/0168-9002(94)01425-6.
- [2] P. Michelato, "Photocathodes for RF photoinjectors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 393, no. 1–3, pp. 455–459, Jul. 1997, doi: 10.1016/s0168-9002(97)00545-7.
- [3] E. Shefer, A. Breskin, A. Buzulutskov, R. Chechik, M. Klin, and M. Prager, "Laboratory production of efficient alkali-antimonide photocathodes," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 411, no. 2–3, pp. 383–388, Jul. 1998, doi: 10.1016/s0168-9002(98)00350-7.
- [4] O. Mete, *Study and Experimental Characterisation of a Novel Photo Injector for the CLIC Drive Beam*. PhD thesis, EPFL, 2011.
- [5] T. Srinivasan-Rao et al., "Performance of magnesium cathode in the S-band RF gun," *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference*, 1997, vol. 3, pp. 2790–2792, doi: 10.1109/PAC.1997.752767.
- [6] T. M. Lifshitz and N. G. Kokina, "Photocathodes for ultraviolet detection based on magnesium-barium alloys," *Radiotekhnika i elektronika*, 1958, no. 9, pp. 1199–1203. (In Russ.).
- [7] T. M. Lifshits, N. G. Kokina, and N. M. Politova, "Photoelectric properties of magnesium alloys with barium," *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 1960, no. 8, pp. 1267–1274. (In Russ.).
- [8] N. G. Kokina, T. M. Lifshits, "Method for manufacturing a photocathode for recording ultraviolet radiation," A. c. 118425 (USSR), IPC: H01J 1/34, H01J 9/121958. Published 01/01/1958. (In Russ.).
- [9] A. M. Bishaev et al. "Photocathode operating in the ultraviolet region of the spectrum," A. c. 1758704A1 (USSR), IPC: H01J 40/06. Published 08/30/1992. Bull. No. 32. (In Russ.).
- [10] V. G. Tkachenko, A. I. Kondrashev, and I. N. Maksimchuk, "Advanced metal alloy systems for massive high-current photocathodes," *Applied Physics B*, vol. 98, no. 4, pp. 839–849, Jan. 2010, doi: 10.1007/s00340-009-3887-z.
- [11] V. G. Tkachenko, I. N. Maksimchuk, V. V. Shklover, G. A. Katrich, and V. V. Klimov, "Photoemissive properties of binary magnesium-barium and aluminium-lithium metallic alloys," *Applied Physics A Materials Science & Processing*, vol. 62, no. 3, pp. 285–287, Mar. 1996, doi: 10.1007/bf01575096.
- [12] A. Breskin, "CsI UV photocathodes: history and mystery," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 371, no. 1–2, pp. 116–136, Mar. 1996, doi: 10.1016/0168-9002(95)01145-5.
- [13] A. F. Buzulutskov, "Gas photodetectors with solid photocathodes," *Physics of elementary particles and atomic nucleus*, 2008, vol. 39, iss. 3, pp. 813–869. (In Russ.).
- [14] H. R. Philipp and E. A. Taft, "Photoelectric emission from the valence band of cesium iodide," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 1, no. 3, pp. 159–163, Nov. 1956, doi: 10.1016/0022-3697(56)90023-3.
- [15] A. Sommer, *Photoemission materials*, Moscow: Energiya, 1973.
- [16] G. Suberluçq, *Photocathodes en iodure de césium utilisées à fort courant*, CERN-PS-92-29-LP, CLIC-Note-162, mai 1992. URL: <https://cds.cern.ch/record/236701/files/CM-P00058088.pdf>.

Information about the authors

Nikolai A. Pkhaiko, head of the group of the Federal State Unitary Enterprise "RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin," Russian Federation.

Alexander A. Kondratyev, head of the group of the Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.

Sergey N. Pakhomov, research engineer of the second category of the Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.

Anatoly V. Potapov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department, Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.

Ilya A. Sorokin, research engineer of the second category of the Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.

Alexander S. Tishchenko, head of the group of the Federal State Unitary Enterprise “RFNC – VNIITF n. a. academ. E. I. Zababakhin,” Russian Federation.

УДК 621.7

Изготовление и исследование низкоплотных металлических материалов

Казаков А. Г., Пхайко Н. А., Сафронов К. В., Горнов В. Н.,
Пешкичева Л. Е., Пахомов С. Н., Писарев Е. М.,
Смирнов Ю. Ю., Савельев А. В.

*ФГУП Российский Федеральный Ядерный Центр —
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина
ул. Васильева, д. 13, г. Снежинск,
Челябинская область, 456770, Российская Федерация
dep5@vniitf.ru*

Получено: 20 июля 2022 г.

Отрецензировано: 22 июля 2022 г.

Принято к публикации: 22 июля 2022 г.

Аннотация: В статье представлена технология получения низкоплотной металлической пены из алюминия и меди методом резистивного распыления в среде инертного газа — аргона. Распыление производилось при двух давлениях газа: 40 Па и 440 Па. Минимальная плотность была достигнута на образце алюминиевой пены, полученной при давлении 440 Па. Толщина лазерной мишени составляет $74,8 \pm 0,9$ мкм. Плотность пенного материала равна 72 ± 4 мг/см³, пористость — 97 %. Размер пор и полостей не превышает 3 мкм.

Ключевые слова: низкоплотная металлическая пена, алюминий, медь, метод резистивного распыления, лазерная мишень.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Изготовление и исследование низкоплотных металлических материалов / А. Г. Казаков и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 342—352.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Изготовление и исследование низкоплотных металлических материалов / А. Г. Казаков, Н. А. Пхайко, К. В. Сафронов и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 342—352.

1. Введение

Согласно данным, приведенным в работе [1], использование низкоплотных мишеней позволяет значительно увеличить выход рентгенов-

ского излучения из лазерной плазмы. Настоящий доклад посвящен разработке технологии изготовления низкоплотных мишеней для экспериментов по получению мощных пикосекундных импульсов мягкого рентгена из лазерной плазмы. Для экспериментов на лазерной установке характерные размеры пор и полостей материала мишени должны быть много меньше диаметра фокального пятна.

Такими характеристиками могут обладать пористые материалы, имеющие поры, глубина которых больше, чем их ширина, например металлические пенные материалы. Методы получения пористых металлов, описанные в литературе [2—5], позволяют получать материалы в широком диапазоне плотностей от $1,6 \text{ мг/см}^3$ до 700 мг/см^3 . Однако при низкой плотности пенные материалы, полученные промышленными способами (матричный метод, диспергирование газа в расплав, метод спекания с использованием порофоров), обладают большими размерами пор от 100 до 3000 мкм, что является недопустимым для экспериментов по лазерному ускорению заряженных частиц.

Ультрадисперсные металлические пенные системы с наноразмерным диаметром частиц (до 200 нм) могут быть изготовлены испарением в установке термического испарения в среде инертного газа. Образующиеся в зоне испарения преимущественно сферические частицы в среде газа охлаждаются и конденсируются в виде кластеров на охлаждаемой подложке, образуя пористую структуру металла. В работе [5] охарактеризована форма и размер металлических частиц, полученных при различных технологических параметрах. Для большинства материалов зарождение и рост частиц зародышей происходит в области над поверхностью металла, на подложку частицы переносятся конвективным потоком газа. При испарении металлов в атмосфере более тяжелых инертных газов (гелий, аргон, криптон) образуются более крупные частицы. Рост частиц прямо пропорционален давлению газа и возрастает экспоненциально с ростом температуры у источника испарения. Изменяя параметры технологического процесса, можно получать структуры с размером частиц от 0,2 до 200 нм. За основу технологии изготовления лазерных мишеней взяты данные, представленные в работе [6].

2. Описание техпроцесса изготовления пенометаллов

Для изготовления низкоплотных пенометаллов использовалась установка резистивного распыления УВН-2М, оснащенная системой газонапуска для создания инертной атмосферы. В качестве рабочего газа использовался аргон при давлении в рабочей камере 40 и 440 Па.

В качестве распыляемой навески использовались медь марки М1 (99,90 % Cu) и алюминий марки АД1 (99,30 % Al).

Распыление меди велось из молибденовой лодочки, распыление алюминия — с вольфрамового проволочного испарителя.

В качестве подложки использовалась полоска из алюминиевой фольги, поверхность которой предварительно обезжиривалась. Рядом с подложками располагали свидетель, по которому определяли толщину нанесенного слоя.

В вакуумной камере свидетель и подложки закреплялись в подложкодержателе на одинаковом расстоянии от навески распыляемого материала. Рабочая камера откачивалась турбомолекулярным насосом до давления 10^{-3} Па. По окончании откачки камеру заполняли аргоном до рабочего давления 40 Па, либо 440 Па (в разных экспериментах). Контроль давления осуществлялся с помощью вакуумметра СС-10. После достижения рабочего давления внутри камеры установки проводили напыление пористого слоя металла. Процесс напыления велся до полного испарения навески. Термостабилизация образцов проводилась в течение 2 часов при давлении в рабочей камере 10^{-3} Па. После разгерметизации рабочей камеры подложки и свидетель извлекали из подложкодержателя.

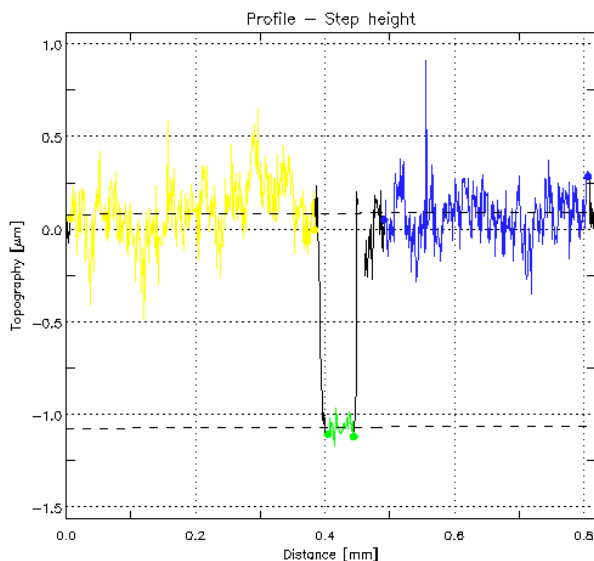
3. Исследование характеристик полученного материала

Основным параметром, определяющим качество изготовленной мишени, является ее плотность (не более 100 мг/см^3). Кажущаяся плотность учитывает массу единицы объема пенного материала вместе с порами и пустотами (мг/см^3). Массу напыленного слоя определяли разницей между массой свидетеля с напыленным слоем и массой свидетеля до напыления.

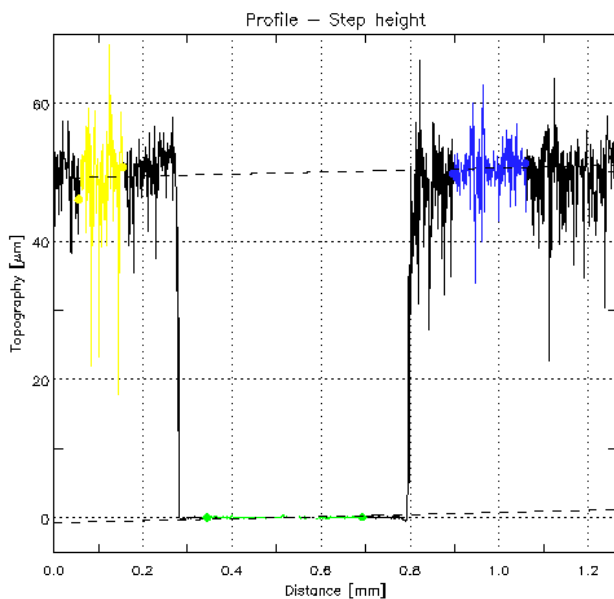
Для определения толщины покрытия острым ножом снималась часть покрытия в центральной части образцов. Высоту образовавшейся ступеньки измеряли с помощью оптического профилометра *FRT MicroSpy*. На рисунках 1 и 2 представлены профили ступенек медных и алюминиевых пен, полученных при разных давлениях аргона в рабочей камере.

Результаты измерений и вычислений параметров пенного материала представлены в таблице 1.

При низких давлениях рабочего газа (40 Па) образовывались более плотные пленки. Образец пеноалюминия, изготовленный при рабочем давлении аргона 440 Па, обладает удовлетворительными характеристиками для создания лазерной мишени для экспериментов по получению мощных пикосекундных импульсов мягкого рентгена.



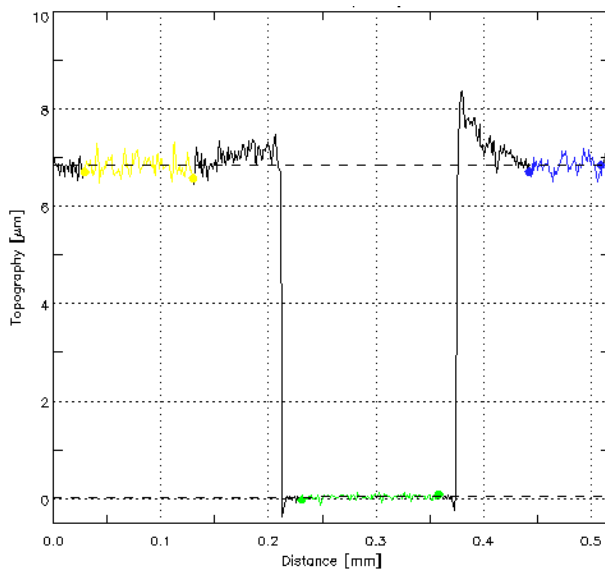
а



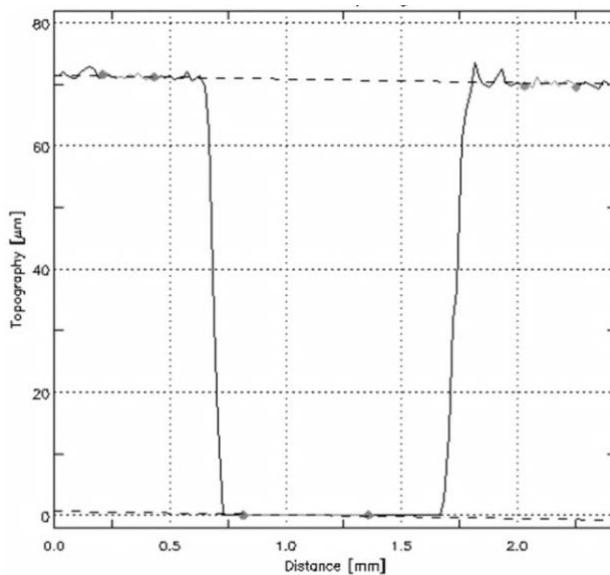
б

Рис. 1. Профиль медного пенного материала, нанесенного при давлениях 40 Па (а) и 440 Па (б).

Fig. 1. Profile of copper foam applied at pressures of 40 Pa (a) and 440 Pa (b)



а



б

Рис. 2. Профиль алюминиевого пенного материала, нанесенного при давлениях 40 Па (а) и 440 Па (б).

Fig. 2. Profile of aluminum foam applied at pressures of 40 Pa (a) and 440 Pa (b)

Таблица 1 — Table 1

Обр.	Me	Давление, Па	Масса пленки, мг	Толщина, мкм	Кажущаяся плотность, мг/см ³	Пористость, %
1	Al	40	$2,1 \pm 0,1$	$6,7 \pm 0,2$	800 ± 40	70
2	Al	440	$2,0 \pm 0,1$	$74,8 \pm 0,9$	72 ± 4	97
3	Cu	40	$1,5 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,3$	$3\,400 \pm 200$	62
4	Cu	440	$4,1 \pm 0,1$	50 ± 4	214 ± 5	98

Исследование структуры и состава поверхностного слоя пены проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) высокого разрешения с энергодисперсионным спектрометром. На рисунке 3 приведено изображение пеноалюминия, полученного при давлении 440 Па. Морфология материала представляет собой пену с наноразмерными цепочками частиц напыленного металла. Размер пор и полостей не превышает 3 мкм.

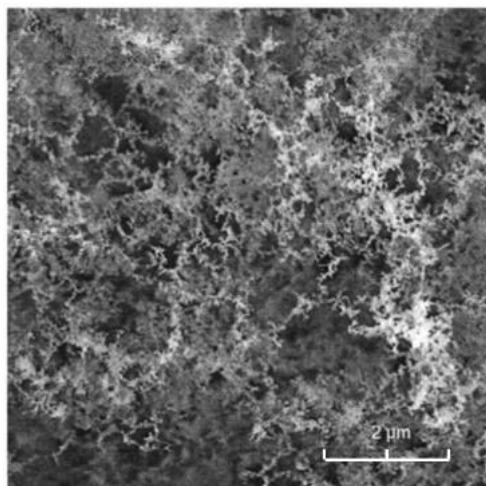


Рис. 3. СЭМ изображение поверхности алюминиевой пены, полученной резистивным методом при 440 Па.

Fig. 3. SEM image of the surface of aluminum foam obtained by resistive method at 440 Pa

Состав и состояние поверхностного слоя частиц исследовали с применением рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). На рисунке 4 представлен рентгеновский спектр, полученный с поверхности алюминиевой пены.

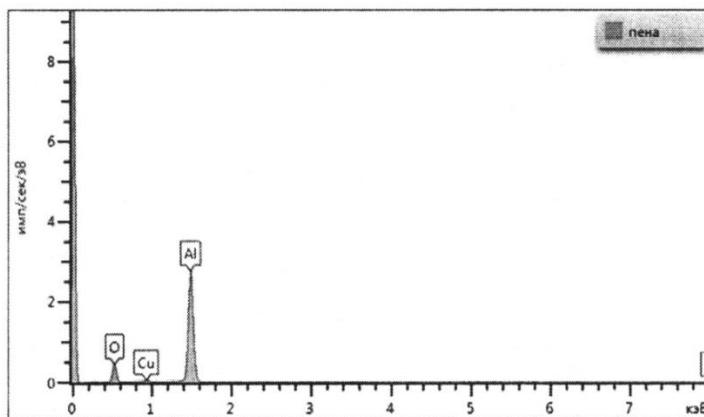


Рис. 4. Рентгеновский спектр поверхности алюминиевой пены, полученной резистивным методом при 440 Па.

Fig. 4. X-ray spectrum of the surface of aluminum foam obtained by the resistive method at 440 Pa

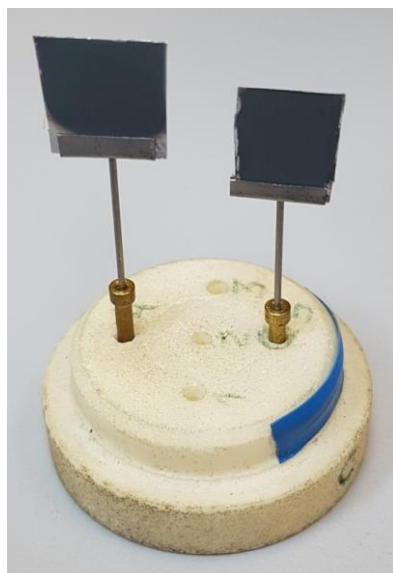


Рис. 5. Внешний вид лазерных мишеней.

Fig. 5. Appearance of laser targets

На рентгеновском снимке регистрируется пик, принадлежащий кислороду. Наличие кислорода на поверхности пенного материала связано с высокой химической активностью алюминия, приводящей к быстрому окислению структуры.

Таким образом, полученные образцы материалов представляет собой пену с наноразмерными частицами алюминия и оксида алюминия. Размер пор и полостей не превышает 3 мкм. Толщина лазерной мишени составляет $74,8 \pm 0,9$ мкм. Плотность пенного материала равна 72 ± 4 мг/см³, пористость — 97 %. Из полученных в работе образцов пенного алюминия были изготовлены мишени для экспериментов по получению мощных пикосекундных импульсов мягкого рентгена из лазерной плазмы.

4. Заключение

Для экспериментов по получению из лазерной плазмы мощных пикосекундных импульсов мягкого рентгена методом резистивного распыления в среде инертного газа изготовлен металлический низкоплотный материал (72 ± 4 мг/см³). Весовым методом определена кажущаяся плотность, где толщину покрытия измеряли по профилю поверхности покрытия на свидетеле с помощью профилометра *FRT Micro Spy*. Рассчитана пористость металлической пены. Удовлетворительными характеристиками для создания лазерной мишени обладает низкоплотный материал из пеноалюминия, нанесенный при 440 Па. Из данного материала изготовлены лазерные мишени. Структура пенного материала и толщина мишени исследована методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения с энергодисперсионным спектрометром.

Список литературы

1. Intense Picosecond X-Ray Pulses from Laser Plasmas by Use of Nanostructured “Velvet” Targets / G. Kulcsár, D. AlMawlawi, F. W. Budnik et al. // *Physical Review Letters*. Vol. 84, no 22. P. 5149—5152.
2. Крушенко Г. Г., Решетникова С. Н., Двирный Г. В. Нанозкструзионная технология изготовления конструкционных алюминиевых профилей // *Исследования наукограда*. 2016. № 1-2 (16). С. 46—50.
3. Назарова М. А., Аминова Г. А., Кузнецов В. Г. Способы получения металлической пены // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18, № 1. С. 204—205.
4. Взаимодействие ударной волны с металлической алюминиевой пеной с закрытой пористостью / М. Д. Гозл, Ф. Альтенфер, В. А. Матсагар и др. // *Физика горения и взрыва*. 2015. Т. 51, № 3. С. 98—105.
5. Калиниченко В. А., Калиниченко А. С. Способы получения вспененного алюминия, области его применения и ряд особенностей механической обработки // *Литье и металлургия*. 2005. № 2 (34). С. 164—169.
6. Granqvist C. G., Buhrman R. A. Ultrafine metal particles // *Journal of Applied Physics*, 1976. Vol. 47, no. 5. P. 2200—2219.

Информация об авторах

Казаков Александр Георгиевич, инженер-исследователь III категории, ФГУП РFYЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

Пхайко Николай Анатольевич, начальник группы, ФГУП РFYЦ — ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина.

Сафронов Константин Владимирович, начальник группы, ФГУП РFYЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

Горнов Владимир Николаевич, ведущий инженер-исследователь, ФГУП РFYЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

Пешкичева Людмила Евгеньевна, инженер-исследователь III категории, ФГУП РFYЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

Пахомов Сергей Николаевич, инженер-исследователь II категории, ФГУП РFYЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

Писарев Евгений Максимович, лаборант, ФГУП РFYЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

Смирнов Юрий Юрьевич, лаборант, ФГУП РFYЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

Савельев Александр Валерьевич, лаборант, ФГУП РFYЦ — ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина.

Production and Research of Low-Density Metal Materials

A. G. Kazakov, N. A. Phaiko, K. V. Safronov,
V. N. Gornov, L. E. Peshkicheva, S. N. Pakhomov,
E. M. Pisarev, Y. Y. Smirnov, and A. V. Savelyev

Russian Federal Nuclear Center –
Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics
13, Vasilyeva st. PO box 245, Snezhinsk, Chelyabinsk reg., 456770, Russian Federation
dep5@vniitf.ru

Received: July 20, 2022

Peer-reviewed: July 22, 2022

Accepted: July 22, 2022

Abstract: For experiments on laser interaction with matter, a method has been developed for manufacturing a low-density material from aluminum and copper by the method of resistive sputtering in an inert gas – argon. Deposition was carried out at two gas pressures: 40 Pa and 440 Pa. The densities of the obtained samples were determined by the gravimetric method: the mass of the sprayed layer was measured by weighing the substrate before and after deposition, the volume was calculated based on measurements of the material thickness using an optical profilometer. The thickness of the deposition layer is $74.8 \pm 0.9 \mu\text{m}$. The minimum density was achieved on a sample of a porous aluminum layer obtained at a pressure of 440 Pa. Its value was $(72 \pm 4) \text{ mg/cm}^3$. According to the images obtained with a scanning electron microscope, it was found that the pore size in the material does not exceed 3 microns. Measurements of the chemical composition with an X-ray fluorescence spectrometer showed the presence of oxygen on the samples, which indicates the oxidation of the surface layer of the prepared samples. targets (2 pcs.) for experiments on laser interaction with matter were made from the samples of porous aluminum obtained in this work.

Keywords: low-density metal foam, aluminum, copper, resistive sputtering method, laser target.

For citation (IEEE): A. G. Kazakov et al., “Production and Research of Low-Density Metal Materials,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 342–352, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.25. (In Russ.).

References

- [1] G. Kulcsár et al., “Intense Picosecond X-Ray Pulses from Laser Plasmas by Use of Nanostructured ‘Velvet’ Targets,” *Physical Review Letters*, vol. 84, no. 22, pp. 5149–5152, May 2000, doi: 10.1103/physrevlett.84.5149.

- [2] G. G. Krushenko, S. N. Reshetnikova, and G. V. Dvirny, "Nanoextrusion technology for manufacturing structural aluminum profiles," *Issledovaniya Naukograd*, no. 1-2 (16), pp. 46–50, 2016. (In Russ.).
- [3] M. A. Nazarova, G. A. Aminova, and V. G. Kuznetsov, "Methods for obtaining metallic foam," *Vestnik of the Technological University*, vol. 18, no. 1, pp. 204–205, 2015. (In Russ.).
- [4] M. D. Goel, F. Altenhofer, V. A. Matsagar, A. K. Gupta, K. Mundt, and S. Marburg "Interaction of a Shock Wave with a Closed Cell Aluminum Metal Foam," *Fizika goreniya i vzryva*, vol. 51, no. 3, 2015, doi: 10.15372/fgv20150314. (In Russ.).
- [5] V. A. Kalinichenko and A. S. Kalinichenko, "Methods for obtaining foamed aluminum, areas of its application and a number of features of mechanical processing," *Lityo i metal-lurgiya*, no. 2 (34), pp. 164–169, 2005. (In Russ.).
- [6] C. G. Granqvist and R. A. Buhrman, "Ultrafine metal particles," *Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 5, pp. 2200–2219, May 1976, doi: 10.1063/1.322870.

Information about the authors

Alexander G. Kazakov, research engineer of category III, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

Nikolay A. Paiko, head of the group, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

Konstantin V. Safronov, head of the group, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

Vladimir N. Gornov, Leading Research Engineer, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

Lyudmila E. Peshkicheva, category III research engineer, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

Sergey N. Pakhomov, research engineer of the 2nd category, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

Evgeny M. Pisarev, laboratory assistant, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

Yury Y. Smirnov, laboratory assistant, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

Alexander V. Savelyev, laboratory assistant, Federal State Unitary Enterprise RFNC – VNIITF n. a. acad. E. I. Zababakhin.

Полосно-пропускающий фильтр на метаволноводе

Сдобнова В. П., Махно А. С., Крутиев С. В.

Южный федеральный университет
ул. Большая Садовая, 105/42,
г. Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация
skrutiev@sfedu.ru

Получено: 21 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В статье предлагается альтернативный метод проектирования миниатюрных волноводных фильтров на основе локально резонансных метаматериалов, а также реализация сверхмалых метаматериальных фильтров (метафильтры) с использованием механизма субволнового направления в полых волноводах, нагруженных небольшими резонаторами. В частности, используются композитные иттербиевые волноводы, построенные из полых металлической трубы, нагруженной набором резонансных иттербий, которые разнесены на глубокие субволновые расстояния. В таких структурах многократное резонансное рассеяние приводит к возникновению суб-λ моды с настраиваемой полосой пропускания ниже индуцированного гибридизационного зазора. Чтобы гарантировать совместимость с существующими технологиями, предложен субволновой метод согласования небольших фильтров со стандартными волноводными интерфейсами, которые можно назвать метапортом. Расчеты производились с помощью среды компьютерного автоматизированного проектирования CST Studio.

Ключевые слова: метаматериалы, метапорт, субволновой метод согласования, CST Studio.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Сдобнова В. П., Махно А. С., Крутиев С. В. Полосно-пропускающий фильтр на метаволноводе // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 3. С. 353—360.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Сдобнова, В. П. Полосно-пропускающий фильтр на метаволноводе / В. П. Сдобнова, А. С. Махно, С. В. Крутиев // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 353—360.

1. Введение

За последние несколько лет развитие спутниковых систем следующего поколения, таких как нано- и микроспутники, стимулировало поиск миниатюрных микроволновых и мм-волновых систем. Микроволновые фильтры являются основными строительными блоками пассивных устройств, которые, как правило, основаны на микрополосковых, диэлектрических, коаксиальных и волноводных технологиях. Волноводные фильтры являются идеальным решением для космических приложений благодаря низким потерям энергии и возможности обработки большой мощности без ограничения частоты [1]. Основным недостатком волноводных фильтров является их большой объем и большой вес из-за размеров образующих их волноводных полостей, которые напрямую зависят от рабочей длины волны (λ). Эти полости соединяются с помощью диафрагм в E - или H -плоскости, заглушек или стоек [2—4]. Среди различных попыток сделать микроволновые фильтры меньше, коаксиальные комбинированные фильтры [4] и фильтры на волноводе [5—10] зарекомендовали себя как компактные микроволновые фильтры для космического применения, соответственно, с коаксиальным и волноводным интерфейсами. Метаматериалы — это искусственные волновые среды, структурированные на субволновых масштабах, в которых коллективное действие составляющих элементов (мета-атомов) вызывает эффективные свойства, не встречающиеся у природных материалов.

2. Теория

Модель метаволновода состоит из двух прямоугольных волноводов разного сечения; в волноводе меньшего сечения находятся металлические штыри высотой h_r , радиусом r и периодичностью a . Штыри касаются только нижней стенки волновода и резонируют, когда h_r приближается к состоянию четверти длины волны. Для регулировки критической частоты $f_c = c/2W$ можно менять ширину волновода W , сохраняя фиксированную высоту волновода $h = 9,52$ мм, что соответствует высоте стандартного волновода WR75. Стандарт WR75 широко используется в системах спутниковой связи в диапазонах X и Ku диапазонах (10—18 ГГц). Значение параметра $h_r = 5$ мм, чтобы штыри резонировали в целевом диапазоне частот ($f_r = 15$ ГГц). Предполагаем, что диаметр штыря $2r$ составляет от 0,5 до 1 мм, что близко к минимальной толщине, которая может быть обеспечена методом селективного лазерного плавления (SLM) с использованием алюминиевого сплава с низкими потерями $AlSi10Mg$, в соответствии с современными технологическими стандартами.

Чтобы получить допустимое согласование импеданса в полосе пропускания первый и последний штыри фильтра вставляются на границе между двух волноводов. Согласование может быть улучшено еще больше путем разработки компактных метапортов.

На рис 1 показана схема полосно-пропускающего фильтра в двух проекциях. В таблице 1 представлены размеры одиночного фильтра.

На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика одиночного фильтра. На графике сплошной линией изображен коэффициент прохождения S_{21} , пунктирной линией коэффициент отражения S_{11} .

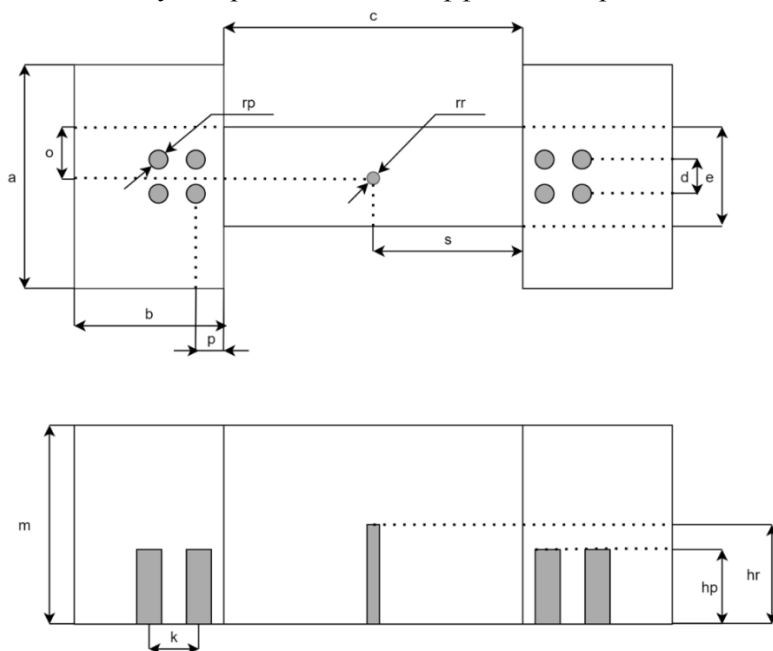


Рис. 1. Схема полосно-пропускающего фильтра.

Fig. 1. Scheme of the bandpass filter

Таблица 1 — Table 1

a, mm	b, mm	c, mm	d, mm	e, mm	s, mm	p, mm	rr, mm	rp, mm	m, mm	hp, mm	hr, mm	o, mm	k, mm
19.05	9	3.5	1.5	7	6.75	1.5	0,3	0.5	9.52	3.5	5.15	3.5	1.5

Как видно из графика, резонансная частота фильтра $f = 12,15$ ГГц, добротность $Q = 20$. Таким образом на данной топологии можно синтезировать фильтры более высокого порядка.

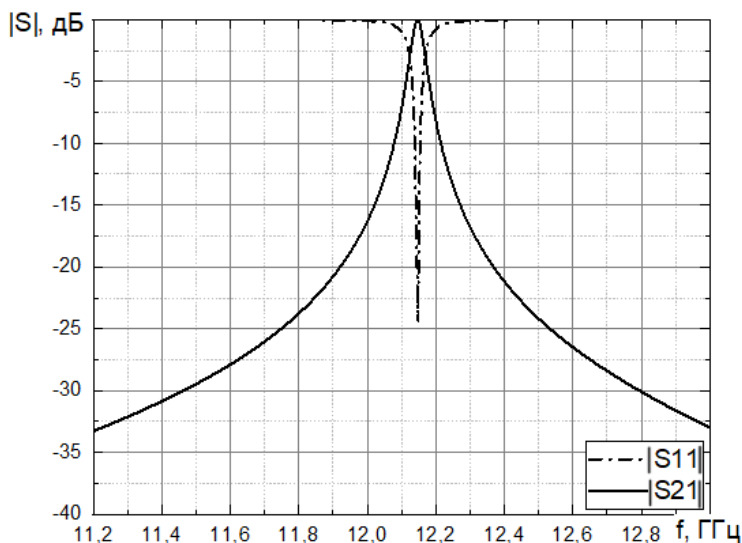


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика полосно-пропускающего фильтра с одним резонансом.

Fig. 2. Frequency response of a band pass filter with one resonant

На рис. 3 и 4 представлены зависимости частоты от геометрических размеров. Так, при увеличении параметра hr — высоты штыря — резонансная частота смещается в область нижних частот, а добротность увеличивается. Такой же эффект наблюдается при увеличении параметра rr .

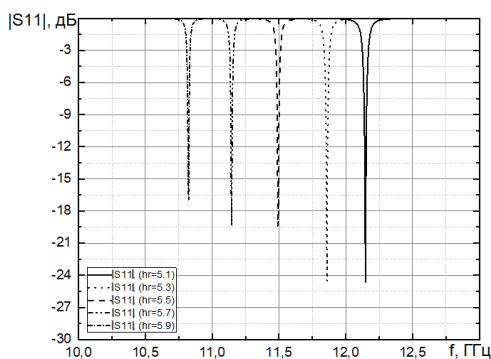


Рис. 3. Зависимость $|S_{11}|$ от частоты при изменении параметра hr .

Fig. 3. Dependence $|S_{11}|$ on the frequency when changing the parameter hr

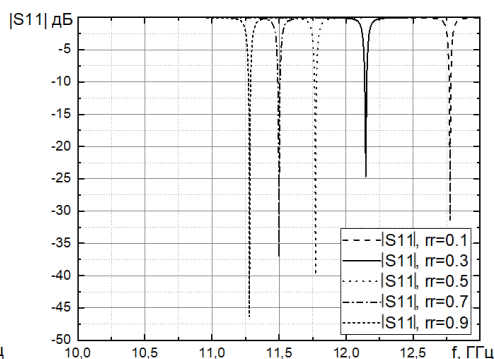


Рис. 4. Зависимость $|S_{11}|$ от частоты при изменении параметра rr

Fig. 4. Dependence $|S_{11}|$ on the frequency when changing the parameter rr

Далее были синтезированы полосно-пропускающие фильтры второго, третьего и четвертого порядка. На рис. 5 представлены амплитудно-частотные характеристики синтезированных фильтров.

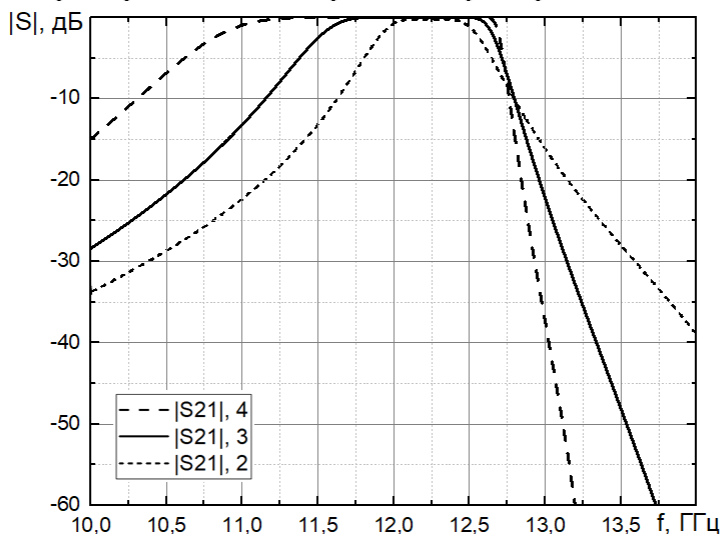


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики синтезированных полосно-пропускающих фильтров второго, третьего и четвертого порядка.

Rice. 5. Amplitude-frequency characteristics of the synthesized band-pass filters of the second, third and fourth order

3. Заключение

В данной работе продемонстрировано применение локально резонансных метаматериалов для создания метаматериальных волноводных фильтров (метафильтров), совместимых со стандартными волноводными интерфейсами и имеющих значительно меньшие размеры и вес по сравнению с существующими решениями. Концепция также совместима с периодическим и случайным расположением резонаторов и различными типами портов. Показана возможность синтеза и дальнейшего производства полосно-пропускающих фильтров старших порядков.

Список литературы

1. Boria V. E., Gimeno B. Waveguide filters for satellites // IEEE Microw. Mag. 2007. Vol. 8, no 5. P. 60—70.
2. Matthaei G. L., Schiffman B., Cristal E., Robinson L. Microwave Filters and Coupling Structures. New Jersey, U.S. Army electronics research and development laboratory. 1963. 116 p.

3. Kudsia C., Cameron R., Tang W.-C. Innovations in microwave filters and multiplexing networks for communications satellite systems // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40, no. 6. P. 1133—1149.
4. Levy R., Cohn S. B. A history of microwave filter research, design, and development // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1984. Vol. 32, no. 9. P. 1055—1067.
5. Craven G. F., Mok C. K. The design of evanescent mode waveguide bandpass filters for a prescribed insertion loss characteristic, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1971. Vol. 19, no. 3 P. 295—308.
6. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. М. : Высшая школа, 1970. 440 с.
7. Крутиев С. В., Земляков В. В., Заргано Г. Ф. Волноводный полосно-пропускающий фильтр на сложных резонансных диафрагмах // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 12. С. 1231—1236.
8. Волноводный квазиэллиптический фильтр на сложных резонансных диафрагмах / Г. Ф. Заргано и др. // Физические основы приборостроения. 2019. Т. 8, № 1. С. 47—54.
9. Электродинамический анализ и синтез эллиптического фильтра на сложных резонансных диафрагмах в прямоугольном волноводе / В. В. Земляков и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 12. С. 1130—1139.
10. A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture / V. Zemlyako et al. // International Journal of Circuit Theory and Applications. 2019. No 47. P. 55—64.

Информация об авторах

Сдобнова В. П., сотрудник Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Махно А. С., сотрудник Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Крутиев С. В. сотрудник Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Band-Pass Filter on a Metawave

V. P. Sdobnova, A. S. Makhno, and S. V. Krutiev

South Federal University
105/42 Bolshaya Sadovaya st., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation
skrutiev@sfnu.ru

Received: May 21, 2022
Peer-reviewed: June 5, 2022
Accepted: June 5, 2022

Abstract: This article proposes an alternative method for designing miniature waveguide filters based on locally resonant metamaterials. Implementation of ultra-small metamaterial filters (metafilters) using the subwavelength direction mechanism in hollow waveguides loaded with small resonators. In particular, composite pin waveguides are used, constructed from a hollow metal tube loaded with a set of resonant pins that are spaced over deep subwavelength distances. In such structures, multiple resonance scattering leads to the emergence of a sub- λ mode with a tunable bandwidth below the induced hybridization gap. In order to guarantee compatibility with existing technologies, a subwavelength method of matching small filters with standard waveguide interfaces, which can be called a meta-port, is proposed. Calculations were performed using the CST Studio computer-aided design environment.

Keywords: metamaterials, metaport, subwavelength matching method, CST Studio.

For citation (IEEE): V. P. Sdobnova, A. S. Makhno, and S. V. Krutiev, "Band-Pass Filter on a Metawave," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 353–360, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.26. (In Russ.).

References

- [1] V. Boria and B. Gimeno, "Waveguide filters for satellites," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 60–70, Oct. 2007, doi: 10.1109/mmm.2007.903649.
- [2] G. L. Matthaei, B. Schiffman, E. Cristal, and L. Robinson, *Microwave Filters and Coupling Structures*. New Jersey, U.S. Army electronics research and development laboratory, 1963.
- [3] C. Kudsia, R. Cameron, and W.-C. Tang, "Innovations in microwave filters and multiplexing networks for communications satellite systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 6, pp. 1133–1149, Jun. 1992, doi: 10.1109/22.141345.
- [4] R. Levy and S. B. Cohn, "A History of Microwave Filter Research, Design, and Development," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1055–1067, Sep. 1984, doi: 10.1109/TMTT.1984.1132817.
- [5] G. F. Craven and C. K. Mok, "The Design of Evanescent Mode Waveguide Bandpass Filters for a Prescribed Insertion Loss Characteristic," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, no. 3, pp. 295–308, Mar. 1971, doi: 10.1109/tmtt.1971.1127503.
- [6] I. V. Lebedev, *Technique and microwave devices*. Vol. 1. Moscow: Vysshaya Shkola, 1970. (In Russ.).

- [7] V. V. Zemlyakov, G. F. Zargano, and S. V. Krutiev, "Waveguide bandpass filter on complex resonance diaphragms," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 60, no. 12, pp. 1305–1310, Dec. 2015, doi: 10.1134/s1064226915110170. (In Russ.).
- [8] G. F. Zargano, V. V. Zemlyakov, S. V. Krutiev, and A. B. Kleschenkov, "Waveguide quasi-elliptic filter on complex resonant diaphragms," *Fizicheskiye osnovy priborostroyeniya*, vol. 8, no. 1, pp. 47–54, Mar. 2019, doi: 10.25210/jfop-1901-047054. (In Russ.).
- [9] V. V. Zemlyakov, G. F. Zargano, S. V. Krutiev, and M. Yu. Tyaglov, "Electrodynamic Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide," *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 915–923, Jun. 2019, doi: 10.1007/s11141-019-09947-0. (In Russ.).
- [10] V. Zemlyakov, S. Krutiev, M. Tyaglov, and V. Shevchenko, "A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 47, no. 1, pp. 55–64, Oct. 2018, doi: 10.1002/cta.2566.

Information about the authors

V. P. Sdobnova, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

A. S. Makhno, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

S. V. Krutiev, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

УДК 621.372.8

Полосно-пропускающий фильтр на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями¹

Лонкина Д. В., Земляков В. В., Губский Д. С., Крутиев С. В.

¹ Южный федеральный университет
ул. Зорге, 5, г. Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация
lonkina.daria@yandex.ru

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В данной работе показана возможность использования круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины в качестве резонансных диафрагм при синтезе полосно-пропускающих цилиндрических волноводных фильтров. Осуществлен электродинамический расчет и проектирование полосно-пропускающего волноводного фильтра на круглых волноводах с тонкими плоско-поперечными металлическими резонансными диафрагмами. Проведен анализ электродинамических параметров диафрагмы от ее геометрических размеров. Представлены результаты исследования резонансных свойств одиночной диафрагмы. Приведены результаты сравнения АЧХ фильтров, полученных при компьютерном моделировании, с измеренными АЧХ изготовленных фильтров-прототипов.

Ключевые слова: круглый волновод, радиальный гребень, одиночная диафрагма, кольцевой сегмент.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Полосно-пропускающий фильтр на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями / Д. В. Лонкина и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 361—369.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Полосно-пропускающий фильтр на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями / Д. В. Лонкина, В. В. Земляков, Д. С. Губский и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 361—369.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-37-90013.

1. Введение

Использование все более высоких частот в работе инфокоммуникационных систем требует постоянного совершенствования характеристик основных элементов и устройств приемо-передающих узлов. Для этого волноводным элементам требуется переход от волноводов с простым сечением к волноводам с поперечным сечением сложной формы [1—7].

Для создания устройств с меньшими геометрическими размерами и для улучшения их характеристик используются волноводы со сложной геометрической формой поперечного сечения, а включение диэлектрических элементов позволяет дополнительно получить уникальные частотно-селективные и поляризационные свойства. Так, наибольшую популярность, как в отечественной, так и в зарубежной СВЧ-технике, приобрели прямоугольные и круглые волноводы с металлическими гребнями и кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением. Однако, несмотря на ряд значительных преимуществ, элементная база на круглых волноводах с металлическими гребнями не получила столь широкого распространения, как на прямоугольных волноводах.

В данной работе показана возможность использования круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины в качестве резонансных диафрагм при синтезе полосно-пропускающих цилиндрических волноводных фильтров.

2. Анализ электродинамических параметров одиной резонансной диафрагмы

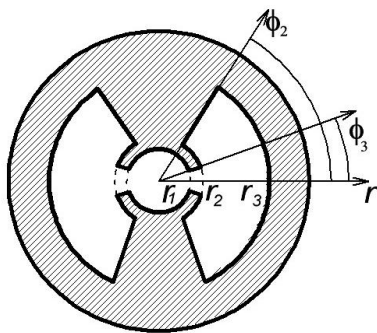


Рис. 1. Поперечное сечение диафрагмы в форме радиального гребня и кольцевого сегмента конечной толщины.

Fig. 1. Cross-section of the diaphragm in the form of a radial ridge and an annular segment of finite thickness

Рассмотрим круглый волновод с диаметром $d = 30$ мм с расположенной в нем металлической бесконечно тонкой диафрагмой с поперечным сечением, показанными на рис. 1. Данное поперечное сечение представляет собой два радиальных гребня с кольцевыми сегментами конечной толщины. Для электродинамического анализа диафрагмы рассмотрим зависимость мнимой части проводимости от геометрических параметров диафрагмы, таких как угол радиального гребня φ_2 , угол кольцевого сегмента φ_3 , внутренний радиус кольцевого сегмента r_1 , внешний радиус кольцевого сегмента r_2 и внешний радиус одиночной диафрагмы r_3 . Будем считать металлическую диафрагму бесконечно тонкой.

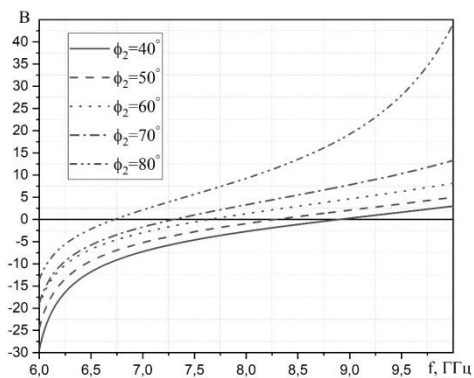


Рис. 2. Зависимость мнимой части проводимости от частоты при различных значениях φ_2 .

Fig. 2. Dependence of the imaginary part of the conductivity on the frequency for various values of φ_2

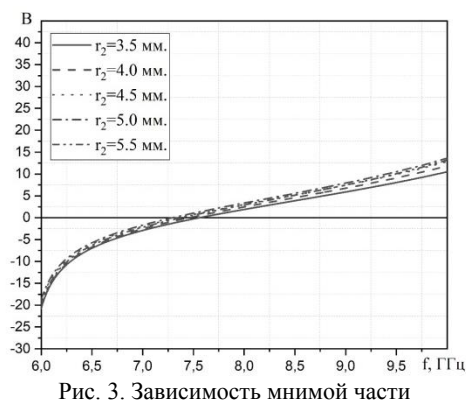


Рис. 3. Зависимость мнимой части проводимости от частоты при различных значениях r_2 .

Fig. 3. Frequency dependence of the imaginary part of the conductivity for various values of r_2

На рис.2 приведена зависимость мнимой части проводимости от частоты при различных значениях угла радиального гребня. Из рис.2 видно, что зависимость мнимой части проводимости $B(f)$ для всех различных значений угла радиального гребня пересекает ось частот в некоторых значениях. Данная точка пересечения кривой с осью абсцисс соответствует резонансной частоте диафрагмы. Таким образом, видно, что при увеличении угла радиального гребня резонансная частота смещается влево в область более низких частот. Так как добротность определяется значением производной в точке резонансной частоты, то из рис.2 можно сделать вывод, что при увеличении угла радиального гребня добротность одиночной резонансной диафрагмы увеличивается.

Зависимость мнимой части проводимости от частоты для различных значениях внешнего радиуса кольцевого сегмента представлена на рис 3.

Как видно из данного рисунка, изменение внешнего радиуса кольцевого сегмента влияет на резонансную частоту одиночной диафрагмы не так сильно, как изменение внутреннего угла радиального гребня. Это объясняется распределением силовых линий по диафрагме: основная часть силовых линий сосредоточена между кольцевыми сегментами. Стоит отметить, что при увеличении внешнего радиуса кольцевого сегмента наблюдается незначительное смещение резонансной частоты в область низких частот. При этом изменение внешнего радиуса практически не влияет на изменение добротности.

3. Синтез полосно-пропускающего фильтра

Проведенные исследования зависимостей резонансных свойств одиночных диафрагм показывает, что разное поведение зависимостей резонансных характеристик от геометрических параметров позволяет производить более точный выбор параметров частотно-селективных устройств, удовлетворяющих заданным требованиям. Для синтеза фильтра используется несколько одиночных диафрагм, расположенных последовательно друг за другом. Между диафрагмами помещаются четвертьволновые отрезки регулярного волновода. При расчете используется теория многоволновой матрицы рассеяния.

Первым шагом при синтезе полосно-пропускающих фильтров является расчет резонансных частот и добротностей каждой резонансной диафрагмы. Учитывая добротности каждой резонансной диафрагмы, имеем следующие геометрические размеры: для первой и третьей резонансных диафрагм: $\varphi_2 = 51.31^\circ$, $\varphi_3 = 31.17^\circ$, $r_1 = 2.37$ мм, $r_2 = 4.33$ мм, $r_3 = 6.95$ мм. и для второй резонансной диафрагмы $\varphi_2 = 58.59^\circ$, $\varphi_3 = 25.64^\circ$, $r_1 = 2.16$ мм., $r_2 = 4.24$ мм, $r_3 = 6.18$ мм. На рис. 4 и рис. 5 представлены АЧХ первой, третьей и второй резонансных диафрагм.

Полученные геометрические размеры резонансных диафрагм были использованы в качестве начального приближения для синтеза полосно-пропускающих фильтров в программном пакете *CST STUDIO*.

На рис. 6 показаны элементы полосно-пропускающего фильтра третьего порядка на круглом волноводе. Сборка полосно-пропускающего фильтра проводилась путем соединения одиночных резонансных диафрагм металлическими шпильками с расположенными между ними участками регулярного круглого волновода соответствующей длины. На рис. 7 показаны АЧХ синтезированного фильтра и результаты измерений изготовленного фильтра прототипа. Пунктирной линией изображен модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$, сплошной линией — модуль коэффициен-

та передачи $|S_{21}|$, а маркерами нанесены результаты измерений изготовленного фильтра прототипа.

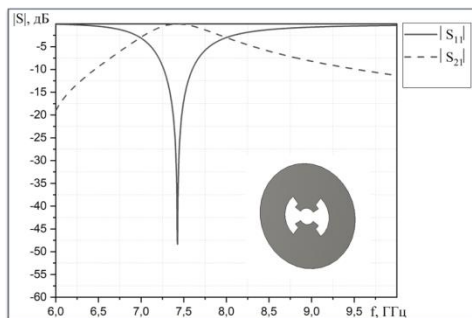


Рис. 4. АЧХ первой, третьей резонансных диафрагм.

Fig. 4. Frequency response of the first, third resonant diaphragms

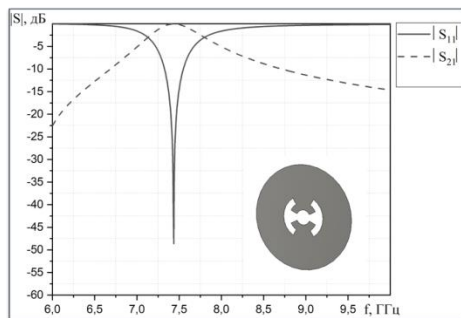


Рис. 5. АЧХ второй резонансной диафрагмы.

Fig. 5. Frequency response of the second resonant diaphragm



Рис. 6. Изготовленный прототип полосно-пропускающего фильтра третьего порядка.

Fig. 6. Prototype of third-order bandpass filter fabricated

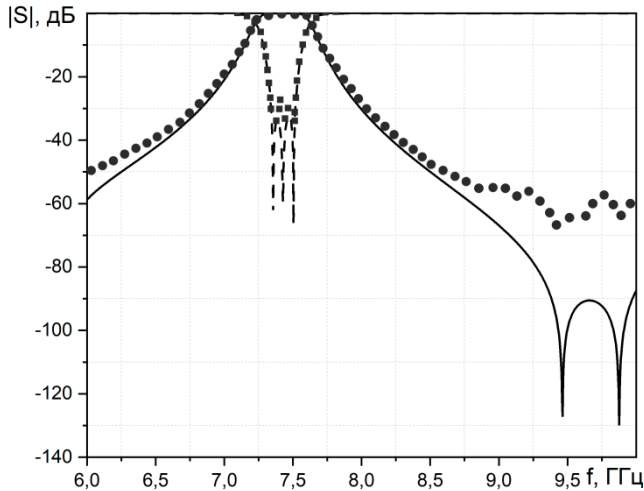


Рис. 7. Характеристики изготовленного прототипа полосно-пропускающего фильтра третьего порядка.

Fig. 7. Characteristics of the manufactured prototype third-order bandpass filter

4. Заключение

Показана возможность использования круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины в качестве резонансных диафрагм при синтезе полосно-пропускающих цилиндрических волноводных фильтров. Проведены сравнения АЧХ синтезированного фильтра и изготовленного фильтра-прототипа. Ширина полосы пропускания изготовленного фильтра третьего порядка — 400 МГц (7.22—7.62 ГГц), неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания — до 0.7 дБ, коэффициент отражения — не хуже 33 дБ. Стоит отметить наличие двух полюсов на частотах 9.47 ГГц и 9.87 ГГц, которые позволяют повысить селективность фильтра. Сравнение характеристики фильтра прототипа и характеристики изготовленного фильтра показывает хорошее совпадение, что говорит о корректности расчетов.

Список литературы

1. Seng Yong Yu, Jens Bornemann, Evanescent-mode filters with arbitrary positioned ridges in circular waveguide // Proceedings of 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. 2011. P. 504—508.
2. Yu S. Y., Bornemann J. New Evanescent-Mode Filter Designs In Circular Waveguide Using a Classical Bigenvalue Mode-Spectrum Analysis // 2009 German Microwave Conference. 2009. P. 1—4.

3. Chong Zhang, Junhong Wang, Meie Chen, Zhan Zhang, A new kind of leaky circular waveguide with periodic slots and wire ridge // Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. 2011. P. 479—482.
4. Musonda E., Hunter I. C. Microwave Bandpass Filters Using Re-Entrant Resonators // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. 63, iss. 3. P. 954—964.
5. Characterization of Metamaterial Slow-Wave Structure Loaded With Complementary Electric Split-Ring Resonators / Xin Wang et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67, iss. 6. P. 2238—2246.
6. Лонкина Д. В., Губский Д. С., Земляков В. В. Цилиндрические волноведущие структуры сложного сечения в свч-узлах современных инфокоммуникационных систем // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 9. С. 835—851.
7. Метод частичных областей для электродинамического расчета цилиндрических структур с металлическими радиальными Т-ребрами и неоднородным диэлектрическим заполнением / Д. В. Лонкина и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 5. С. 395—409.

Информация об авторах

Лонкина Д. В., сотрудник Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Земляков В. В., сотрудник Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Губский Д. С., сотрудник Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Кругинов С. В., сотрудник Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Band-Pass Filter on Cylindrical Waveguide Structures with Complex Metal Ridges

D. V. Lonkina, V. V. Zemlyakov, D. S. Gubskiy, and S. V. Krutiev

South Federal University
105/42 Bolshaya Sadovaya st., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation
skrutiev@sfedu.ru

Received: May 20, 2022
Peer-reviewed: June 5, 2022
Accepted: June 5, 2022

Abstract: This paper shows the possibility of using a circular waveguide with radial ridges and annular segments of finite thickness as resonant diaphragms in the synthesis of bandpass cylindrical waveguide filters. An electrodynamic calculation and design of a band-pass waveguide filter based on round waveguides with thin plane-transverse metal resonant diaphragms has been carried out. The analysis of the electrodynamic parameters of the diaphragm from its geometrical dimensions is carried out. The results of a study of the resonant properties of a single diaphragm are presented. The results of comparing the frequency response of filters obtained by computer simulation with the measured frequency response of manufactured prototype filters are presented.

Keywords: round waveguide, radial comb, single diaphragm, annular segment.

For citation (IEEE): D. V. Lonkina, V. V. Zemlyakov, D. S. Gubskiy, and S. V. Krutiev, "Band-Pass Filter on Cylindrical Waveguide Structures with Complex Metal Ridges," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 361–369, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.27. (In Russ.).

References

- [1] Seng Yong Yu, Jens Bornemann, "Evanescent-mode filters with arbitrary positioned ridges in circular waveguide," *Proceedings of 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing*, pp. 504–508, 2011.
- [2] S. Y. Yu and J. Bornemann, "New Evanescent-Mode Filter Designs In Circular Waveguide Using a Classical Bigenvalue Mode-Spectrum Analysis," *2009 German Microwave Conference*, 2009, pp. 1–4, doi: 10.1109/GEMIC.2009.4815880.
- [3] Chong Zhang, Junhong Wang, Meie Chen, and Zhan Zhang, "A new kind of leaky circular waveguide with periodic slots and wire ridge," *Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference*, pp. 479–482, 2011.
- [4] E. Musonda and I. C. Hunter, "Microwave Bandpass Filters Using Re-Entrant Resonators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 3, pp. 954–964, Mar. 2015, doi: 10.1109/tmtt.2015.2389216.
- [5] X. Wang et al., "Characterization of Metamaterial Slow-Wave Structure Loaded With Complementary Electric Split-Ring Resonators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 6, pp. 2238–2246, Jun. 2019, doi: 10.1109/tmtt.2019.2908360.

- [6] D. V. Lonkina, D. S. Gubskii, V. V. Zemlyakov, "Cylindrical Waveguiding Structures with Complex Cross Sections in Microwave Units of Modern Information and Communication Systems," *Journal of Communications Technology and Electronics*, Vol. 65, no. 9, pp. 967–981, doi: 10.1134/S1064226920090053. (In Russ.).
- [7] D. V. Lonkina, V. V. Zemlyakov, D. S. Gubskiy, G. F. Zargano, and S. V. Krutiev, "The partial-region method for electrodynamic calculation of cylindrical structures with metal radial t-ridges and inhomogeneous dielectric filling," *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 64, iss. 5, 357–369, 2021. (In Russ.).

Information about the authors

D. V. Lonkina, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

V. V. Zemlyakov, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

D. S. Gubskiy, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

S. V. Krutiev, employee of South Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

УДК 621.372.8

Полосно-пропускающий фильтр на прямоугольном волноводе с плоскопродольными тонкими диафрагмами

Светличный А. С., Чувараян Т. А., Крутиев С. В.

¹ Южный федеральный университет

ул. Зорге, 5, г. Ростов-на-Дону, 344090, Российская Федерация
skrutiev@sfedu.ru

Получено: 21 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В данной работе рассматривается полосно-пропускающий фильтр на прямоугольном волноводе сечением 35×15 мм., в котором вместо классических тонких плоскопоперечных диафрагм используются плоскопродольные диафрагмы. В качестве резонансного окна используются четыре классических прямоугольных окна, что позволяет провести электродинамический анализ и показать хорошую сходимость результатов расчета и моделирования. Расчеты производились с помощью среды компьютерного автоматизированного проектирования CST Studio.

Ключевые слова: прямоугольный волновод, плоскопродольная диафрагма, электродинамический анализ, CST Studio.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Светличный А. С., Чувараян Т. А., Крутиев С. В. Полосно-пропускающий фильтр на прямоугольном волноводе с плоскопродольными тонкими диафрагмами // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 3. С. 370—376.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Светличный, А. С. Полосно-пропускающий фильтр на прямоугольном волноводе с плоскопродольными тонкими диафрагмами / А. С. Светличный, Т. А. Чувараян, С. В. Крутиев // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 370—376.

1. Введение

Фильтры с цельнометаллическими плоскопродольными вставками были первоначально предложены в 1974 году в качестве недорогих серий-

но производимых схем для микроволновых частот [1], [2], таких как полосовые фильтры. В начале восьмидесятых, в то время, когда были разработаны более совершенные компьютерные процедуры, основанные на точном анализе, все чаще стали появляться публикации, включающие общую теорию проектирования и расширяющие первоначальную концепцию до применения в диапазоне миллиметровых волн. Фильтры могут быть классифицированы по разным категориям различными способами.

Одной из наиболее сложных проблем, с которыми приходится сталкиваться разработчикам, являются потери при рассеивании в реализациях фильтров. Добротность (Q) резонаторов, используемых в микроволновом фильтре, зависит от их физической реализации. Вносимые потери в полосе пропускания обратно пропорциональны полосе пропускания фильтра, а добротность резонатора пропорциональна количеству используемых резонаторов. Следовательно, для узкополосных применений необходимо использовать резонаторы с высокой ненагруженной добротностью, чтобы добиваться низких потерь в полосе пропускания [3]. Кроме того, селективность фильтра может быть улучшена за счет увеличения количества резонаторов, что увеличивает размер фильтра и потери. Полосовой фильтр с E -плоскостной диафрагмой был одним из наиболее часто описываемых в литературе фильтров. Стандартная конфигурация фильтров с E -плоскостной диафрагмой заключается в использовании корпуса разделенного блочного волновода и размещении индуктивных, обычно цельнометаллических перегородок в E -плоскости прямоугольного волновода на расстоянии, близком к половине длины волны. Поскольку диэлектрические потери отсутствуют, конструкция имеет высокую добротность и подходит для узкополосных применений. Кроме того, эти фильтры с E -плоскостными диафрагмами очень просты в сборке благодаря тому факту, что конструкция основана на печатных платах, изготовленных с помощью фотолитографического процесса, и нет необходимости в настройке.

2. Теория

Добротность резонансной системы в общем случае определяется как средняя энергия, запасенная за период колебаний по сравнению с потерей энергии в секунду. Для изолированного резонатора потери энергии происходят исключительно за счет тепловыделения, и этот случай соответствует определению добротности без нагрузки, Q_0 . Резонатор, который возбуждается извне, неизменно соединен с другой схемой. В результате происходит некоторый обмен мощностью с внешней схемой, и общая добротность, или нагруженная добротность Q , Q_L , на практике снижается по

сравнению с Q_U . Для достаточно узкополосных резонаторов можно показать, что нагруженные и ненагруженные добротности Q_L и Q_U задаются формулой (1):

$$Q_L = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{3dB}} \quad Q_U = \frac{Q_L}{1 - 10^{\frac{S_{21}(dB)}{20}}} \quad (1)$$

где ω_0 и $\Delta\omega_{3dB}$ — резонансная частота и полоса пропускания резонатора по уровню 3 дБ соответственно; S_{21} (дБ) — вносимые потери при ω_0 .

На рис. 1. приведена трехмерная модель полосно-пропускающего фильтра с E -плоскостной диафрагмой, апертюра которой выполнена в виде прямоугольного окна.

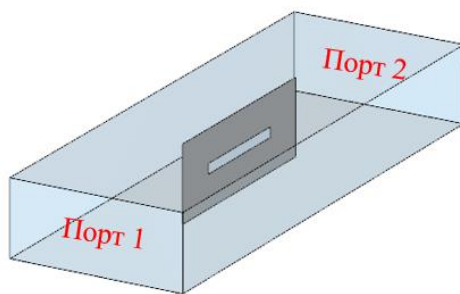


Рис. 1. Трехмерная модель полосно-пропускающего фильтра.

Fig. 1. Three-dimensional model of a band pass filter

На рис. 2. приведена зависимость частоты от геометрических размеров прямоугольного окна. Так, при увеличении длины резонансного окна наблюдается смещение резонансной частоты в область высоких частот, добротность остается практически неизменной. На рис. 3. представлена зависимость высоты резонансного окна от частоты. При увеличении высоты резонансного окна резонансная частота практически не изменяется, при этом добротность уменьшается.

Проведенный электродинамический анализ позволил синтезировать полосно-пропускающий фильтр четвертого порядка. Так, на рис. 4. представлен внешний вид продольной диафрагмы, апертюра которой состоит из четырех прямоугольных резонансных окон.

В табл. 1 приведены размеры резонансной диафрагмы в миллиметрах.

Таблица 1 — Table 1

r1	r2	r3	r4	r1	r2	r3	r4	1	L2
2.1	2.1	2.1	2.1	16.94	17.32	17.54	17.00	0.62	9.47
s1	su1	sd1	s2	su2	sd2	s2	e1	e2	e3
2.18	2.11	2.11	1.92	2.11	2.27	1.48	0.83	7.28	0.85

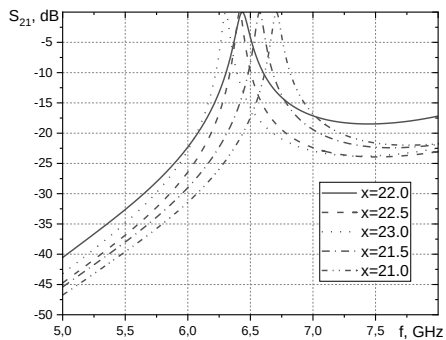


Рис. 2. Зависимость модуля $|S_{21}|$ от изменения параметра x (длина одиночного окна в диафрагме).

Rice. 2. Dependence of module $|S_{21}|$ from changing the parameter x (length of a single window in aperture)

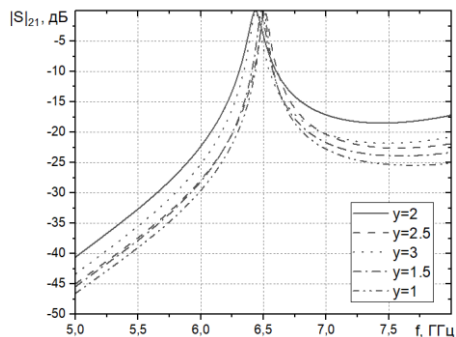


Рис. 3. Зависимость модуля $|S_{21}|$ от изменения параметра y (высота одиночного окна в диафрагме).

Fig. 3. Dependence of module $|S_{21}|$ from changing the parameter y (height of a single window in aperture)

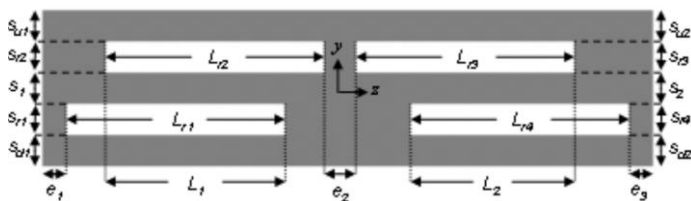


Рис. 4. Внешний вид резонансной продольной диафрагмы.

Fig. 4. Appearance of the resonant longitudinal diaphragm

На рис. 5. представлена амплитудно-частотная характеристика полосно-пропускающего фильтра с E -плоскостной диафрагмой.

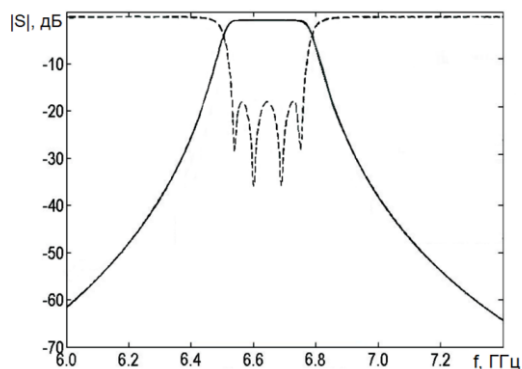


Рис. 5. АЧХ синтезированного полосно-пропускающего фильтра.

Fig. 5. Frequency response of the synthesized band pass filter

3. Заключение

В работе показана возможность создания фильтра с плоскопродольной диафрагмой. Длина такого фильтра составляет 54 мм. Данные результаты позволяют продолжить данную тему путем замены прямоугольных окон на более сложные резонансные структуры, которые позволят строить узкополосные фильтры.

Список литературы

1. Konishi Y., Uenakada K., The Design of a Bandpass Filter with Inductive Strip Planar Circuit Mounted in Waveguide // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1974. Vol. 22. P. 869—873.
2. Tajima Y, Sawayama Y, Design and Analysis of a Waveguide-Sandwich Microwave Filter. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1974. Vol. 22, no. 9, P. 839—841.
3. Microwave filters-applications and technology / I. C. Hunter et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50. P. 794—805.
4. Craven G. F., Mok C. K. The design of evanescent mode waveguide bandpass filters for a prescribed insertion loss characteristic // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1971. Vol. 19. P. 295—308.
5. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. М. : Высшая школа, 1970. 440 с.
6. Крутиев С. В., Земляков В. В., Заргано Г. Ф. Волноводный полосно-пропускающий фильтр на сложных резонансных диафрагмах // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 12. С. 1231—1236.
7. Волноводный квазиэллиптический фильтр на сложных резонансных диафрагмах / Г. Ф. Заргано и др. // Физические основы приборостроения. 2019. Т. 8, № 1. С. 47—54.
8. Электродинамический анализ и синтез эллиптического фильтра на сложных резонансных диафрагмах в прямоугольном волноводе / В. В. Земляков и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 12. С. 1130—1139.
9. A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture / Zemlyako V. et al. // International Journal of Circuit Theory and Applications. 2019. No 47. P. 55—64.

Информация об авторах

Крутиев Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Радиофизика физического факультета Южного федерального университета, Российская Федерация.

Светличный Александр Сергеевич, студент 1 курса магистратуры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» физического факультета Южного федерального университета, Российская Федерация.

Чувараян Тарас Аркадьевич, студент 4 курса физического факультета Южного федерального университета, Российская Федерация.

A Band-Pass Filter on a Rectangular Waveguide with Plane-Longitudinal Thin Diaphragms

A. S. Svetlichny, T. A. Chuvarayan, and S. V. Krutiev

South Federal University

105/42 Bolshaya Sadovaya st., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

skrutiev@sfedu.ru

Received: May 21, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: In modern microwave systems, a wide variety of frequency-selective devices are used, which are performed according to certain technologies. Waveguide microwave filters are currently a rapidly developing class of functional devices. The variety of manufacturing technologies, calculation methods and designs of such filters is great. In this paper, we consider a band-pass filter on a rectangular waveguide with a cross section of 35×15 mm, in which, instead of the classic thin plane-transverse diaphragms, plane-longitudinal diaphragms are used. Four classical rectangular windows are used as a resonant window, which makes it possible to conduct electrodynamic analysis and show good convergence of the calculation and simulation results. Calculations were performed using the computer-aided design environment CST Studio.

Keywords: rectangular waveguide, plano-longitudinal diaphragm, electrodynamic analysis, CST Studio.

For citation (IEEE): A. S. Svetlichny, T. A. Chuvarayan, and S. V. Krutiev, "A Band-Pass Filter on a Rectangular Waveguide with Plane-Longitudinal Thin Diaphragms," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 370–376, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.28. (In Russ.).

References

- [1] Y. Konishi and K. Uenakada, "The Design of a Bandpass Filter with Inductive Strip – Planar Circuit Mounted in Waveguide," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 22, no. 10, pp. 869–873, Oct. 1974, doi: 10.1109/tmtt.1974.1128366.
- [2] Y. Tajima and Y. Sawayama, "Design and Analysis of a Waveguide-Sandwich Microwave Filter (Short Papers)," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 22, no. 9, pp. 839–841, Sep. 1974, doi: 10.1109/tmtt.1974.1128357.
- [3] I. C. Hunter, L. Billonet, B. Jarry, and P. Guillon, "Microwave filters-applications and technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 794–805, Mar. 2002, doi: 10.1109/22.989963.
- [4] G. F. Craven and C. K. Mok, "The Design of Evanescent Mode Waveguide Bandpass Filters for a Prescribed Insertion Loss Characteristic," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, no. 3, pp. 295–308, Mar. 1971, doi: 10.1109/tmtt.1971.1127503.
- [5] I. V. Lebedev, *Technique and microwave devices*. Vol. 1. Moscow: Vysshaya Shkola, 1970. (In Russ.).

- [6] В. В. Земляков, Г. Ф. Заргано, and С. В. Крутиев, “Волноводный полосно-пропускающий фильтр на сложных резонансных диафрагмах,” *Радиотехника и электроника*, vol. 60, no. 12, pp. 1231–1236, 2015, doi: 10.7868/s0033849415110170. (In Russ.).
- [7] G. F. Zargano, V. V. Zemlyakov, S. V. Krutiev, and A. B. Kleschenkov, “Waveguide quasi-elliptic filter on complex resonant diaphragms,” *Физические основы приборостроения*, vol. 8, no. 1, pp. 47–54, Mar. 2019, doi: 10.25210/jfop-1901-047054. (In Russ.).
- [8] V. V. Zemlyakov, G. F. Zargano, S. V. Krutiev, and M. Yu. Tyaglov, “Electrodynamic Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide,” *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 915–923, Jun. 2019, doi: 10.1007/s11141-019-09947-0. (In Russ.).
- [9] V. Zemlyakov, S. Krutiev, M. Tyaglov, and V. Shevchenko, “A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 47, no. 1, pp. 55–64, Oct. 2018, doi: 10.1002/cta.2566.

Information about the authors

Sergey V. Krutiev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Radiophysics, Faculty of Physics, Southern Federal University, Russian Federation.

Alexander S. Svetlichny, 1st year student of the master's program “Infocommunication technologies and communication systems”, Faculty of Physics, Southern Federal University, Russian Federation.

Taras A. Chuvarayan, 4th year student of the Faculty of Physics of the Southern Federal University, Russian Federation.

УДК 061.22

VII съезд РНТОРЭС им. А. С. Попова

¹ Самсонов Г. А., ² Ермолов П. П.

¹ *Российское НТОРЭС имени А. С. Попова*

ул. Рождественка, 6/9/20, Москва, 107031, Российская Федерация
rntores@mail.ru

² *Севастопольский государственный университет*

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
pnyermolov@sevsu.ru

Получено: 21 июня 2022 г.

Отрецензировано: 22 июня 2022 г.

Принято к публикации: 22 июня 2022 г.

Аннотация: Представлена информация о VII съезде общероссийской общественной организации «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова», который состоялся в Москве 7 июня 2022 г. Рассмотрены итоги деятельности РНТОРЭС за отчетный период (2016—2022 гг.) — издание журналов и проведение конференций. Приведены сведения деятельности региональных отделений (Московского, Нижегородского, Владимирского, Тульского, Крымского), а также об организационной работе РНТОРЭС. Приведен состав вновь избранных руководящих органов РНТОРЭС на 5-летний период (президента, вице-президентов и Президиума).

Ключевые слова: съезд, РНТОРЭС, региональные отделения, журналы, конференции.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Самсонов Г. А., Ермолов П. П. VII съезд РНТОРЭС им. А. С. Попова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 378—394.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Самсонов, Г. А. VII съезд РНТОРЭС им. А. С. Попова / Г. А. Самсонов, П. П. Ермолов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 378—394.

1. Введение

7 июня 2022 г. в Московском техническом университете связи и информатики (МТУСИ) прошел VII Съезд Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи (РНТОРЭС) им. А. С. Попова.

В мероприятии приняли участие руководители научных организаций, председатели и представители региональных подразделений РНТОРЭС.

С отчетным докладом о деятельности организации за прошедшие 5 лет выступил вице-президент, директор Исполнительной дирекции РНТОРЭС Г. А. Самсонов.

Участники съезда РНТОРЭС обсудили итоги проделанной работы, наметили планы на предстоящие годы и единогласно согласились с направлением дальнейшего развития, сформулированным ранее Марком Кривошеевым (1922—2018), одним из основоположников отечественного телевидения, членом РНТОРЭС с 1947 г.: «Жизнь доказала, что правильно понять проблему, выбрать верный вектор для ее решения — это уже значительная часть пути к достижению цели. Исследования по теме цифровой трансформации стоило бы расширить и ускорить. Российским специалистам необходимо активно участвовать в разработке мировых стандартов. Предстоит рассмотреть, как в складывающихся условиях лучше организовать такую новую и весьма важную для страны работу с учетом ее особенностей и международного сопряжения».

Съезд завершился вручением наград, присвоенных Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций.

I съезд Российского НТОРЭС им. А. С. Попова — правопреемника Всесоюзного НТОРЭС в России — состоялся в декабре 1991 г. Первым президентом Российского общества стал академик РАН Ю. В. Гуляев. В апреле 1992 г. конференция полномочных представителей республик СССР принимает решение о прекращении деятельности Всесоюзного общества. По состоянию на 2005 г. РНТОРЭС им. А. С. Попова объединяло в своих рядах около 10 тысяч членов. Общество имело региональные отделения в 46 регионах Российской Федерации. Детально история РНТОРЭС и его предшественников рассмотрена в [1].

В настоящей статье приведены основные положения отчетного доклада VII съезду.

2. Деятельность Исполнительной дирекции Президиума РНТОРЭС

Ежегодно в конце марта, в соответствии с Тематическим планом и, как правило, поддержанная февральским заседанием Президиума, проводилась Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение». В подготовке и проведении конференции активное участие принимали ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, ООО «АВТЭКС», и Исполнительная дирекция Президиума РНТОРЭС им. А. С. Попова.

Председатель Международного комитета конференции — вице-президент Общества, член-корреспондент РАН Юрий Борисович Зубарев.

Председатель Программного комитета — Президент Общества, академик РАН Юрий Васильевич Гуляев.

Член Программной группы по оперативной работе — доктор технических наук, профессор Владимир Викторович Витязев.

В проведении конференции большую помощь оказывал Вице-президент по инновациям Алексей Петрович Кирпичников.

В 2017—2018 гг. доклады участников конференции обсуждались в 8 секциях. Общее количество докладов порядка двухсот. С учётом слушателей, приходящих во время работы конференции, общее количество участников достигало пятисот человек.

В эти годы к началу конференции издавался сборник докладов в 2-х томах.

Сборник докладов «Цифровая обработка сигналов» зарегистрирован в Книжной палате России, т. е. ему присвоены ISBN, УДК, ББК и авторский знак. Сборник конференции выпущен тиражом 250 экземпляров и разослан в 16 крупнейших библиотек России. Материалы сборников размещаются также в eLibrary (РИНЦ).

С 2019 года, по убедительной рекомендации Книжной палаты, сборники «Доклады» размещаются в библиотеке «Обязательный электронный экземпляр».

В 2019 году на заседании Оргкомитета конференции DSPA-2019 принято решение предложить участникам конференции, желающим попасть в базу *Scopus*, оформить свои работы по требованиям *IEEE*. С этой целью был создан специальный сайт. К сожалению, в 2019 году такое размещение не состоялось.

Вместе с тем, чтобы поддержать настрой участников, доктор технических наук, профессор Красноярского аэрокосмического университета им. академика РАН Решетнёва Маргарита Николаевна Фаворская взялась помочь осуществить эту идею через издательство Шпрингер, с которым у неё были деловые контакты. Маргарита Николаевна связалась с претендентами, получила материалы, выполнила редактирование и в течение 2019 года были изданы 2 книги статей наших авторов. В свою очередь члены Оргкомитета Александр Викторович Дворкович, Владимир Викторович Витязев и Сергей Владимирович Витязев, поддержанные членом Президиума Вадимом Анатольевичем Калошиным, хорошо знакомым с *IEEE*, смогли успешно организовать подготовку всех необходимых материалов, и статьи наших авторов (докладчиков) были приняты и изданы *IEEE* в 2020 и 2021 гг.

Не менее важной можно считать ежегодно проводимую в Москве Всероссийскую конференцию «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий», посвящённую Дню радио.

В подготовке и проведении конференции активное участие принимали такие крупнейшие российские университеты, как Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Московский технологический университет (ранее — МГТУ МИРЭА), Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет), Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Военная академия РВСН имени Петра Великого (филиал в г. Серпухове), Московский институт электронной техники (Национальный исследовательский университет), а также Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН.

Председатель Всероссийского Оргкомитета конференции — Президент Общества, академик РАН Юрий Васильевич Гуляев.

Председатель Программного комитета — Вице-президент Общества, член-корреспондент РАН Юрий Борисович Зубарев.

Постоянно активное участие в организации и проведении конференции принимают вице-президент Общества, доктор технических наук, профессор Артём Сергеевич Аджемов — Президент МТУСИ, а также член Президиума Общества, кандидат технических наук, доцент Виктор Сергеевич Алёшин.

Работа конференции проходила в 6 секциях. Руководили секциями, в основном, профессора московских университетов-организаторов. Для участия в работе конференции присылалось до 90 докладов. К началу конференции выпускался сборник докладов.

Можно считать, что конференция, посвящённая Дню Радио, служит своеобразной площадкой не только для научных дискуссий, а одновременно школой, в которой молодые участники получают бесценный опыт умения публично излагать суть своих работ, слушать и усваивать критику, исходящую не только от маститых профессоров, но и от таких же докладчиков и слушателей.

Конференции с 2017 по 2019 гг., проходившие в конгресс-центре и аудиториях МТУСИ, были достаточно успешными и собирали до 160 докладчиков и слушателей.

В 2020 году, в разгар пандемии COVID-19, администрация и преподаватели МИЭТ сумели провести конференцию в удалённом режиме (было представлено 45 докладов).

В 2021 году удалось провести конференцию очно на базе МТУСИ (зал учёного совета НИЧ). К сожалению, количество участников было менее 40 человек.

Журнал «Цифровая обработка сигналов» издаётся РНТОРЭС. Главный редактор — вице-президент Общества, член-корреспондент РАН Юрий Борисович Зубарев. Его заместитель и выпускающий редактор — член Президиума Общества, Председатель Рязанской региональной организации, заведующий кафедрой Рязанского радиотехнического университета, профессор Владимир Викторович Витязев. На титульной странице журнала указано, что журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных изданий и в нём публикуются результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук. Журнал входит в перечень изданий, поддержанных ВАК России.

Отметим, что ранее журнал прибыли хоть и не давал, но находился на самоокупаемости. Однако и здесь возникли трудности.

АО «Роспечать», с которым РНТОРЭС им. А. С. Попова с 2007 года имеет договор на организацию распространения журнала по подписке, в 2020 году сорвал подписную кампанию. Более того, в 2019 и 2020 годах всячески уклонялся от исполнения перед РНТОРЭС им. А. С. Попова своих финансовых обязательств, ссылаясь на внутреннюю реорганизацию. Главный бухгалтер Исполнительной дирекции Валентина Сергеевна Кирда тщательно подготовила все необходимые банковские документы. Задолженность составила порядка 300 тысяч рублей. Отсутствие должного финансирования едва не сорвало выпуск журнала. Помощь пришла со стороны вице-президента по инновациям Алексея Петровича Кирпичникова. Одновременно со стороны штатного вице-президента Геннадия Андреевича Самсонова в адрес АО «Роспечать» были направлены претензионные письма и уведомление о том, что РНТОРЭС им. А. С. Попова отказывается от их услуг. Подписную кампанию 2021 года провели успешно благодаря упорной работе сотрудницы Исполнительной дирекции Галины Ивановны Карпушкиной. Объём подписки приблизился к 100 экземпляров (вместо 27 в 2020 году).

Для решения финансовых проблем был заключен договор о юридической помощи в деле о взыскании с АО «Роспечать» задолженности за поставленные в 2019 и 2020 годах журналы. Дело было подготовлено и передано в Арбитражный суд. Но в конце лета 2021 года АО «Роспечать» начало процедуру банкротства. Арбитраж рекомендовал переделать документы на кредиторскую задолженность и передать их кризисному управляющему. Теперь адвокат, представляющий интересы РНТОРЭС, будет отслеживать накопление средств для оплаты кредиторской задолженности. К сожалению, этот процесс весьма медленный.

В сложившейся обстановке в 2021 году мы вновь обратились к Министру «Минцифры», теперь уже Максуту Игоревичу Шадаеву, с прось-

бой поддерживать деятельность РНТОРЭС им. А. С. Попова, в частности, Исполнительную дирекцию. Довольно быстро получили ответ за подписью зам. министра Д. Кима. В ответе было сообщение о том, что наше обращение к Министру передано и. о. Генерального директора «НИИ Радио» О. Иванову с предложением оказать нам помощь. Ответ из «НИИ Радио» получен не был.

В 2017—2019 гг. традиционно организуемая Исполнительной дирекцией Президиума РНТОРЭС им. А. С. Попова на базе Туристического центра в г. Суздале проходила Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации».

В подготовке и проведении конференции активное участие принимали ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, НТЦ уникального приборостроения РАН, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова и МГТУ имени Н. Э. Баумана.

Научное руководство конференциями осуществлял академик РАН Владислав Иванович Пустовойт (до своей безвременной кончины).

Однако с 2020 года организацию и руководство конференцией взял на себя директор НТЦ уникального приборостроения РАН Булатов. От участия в подготовке и проведении конференций Исполнительную дирекцию отстранили, сохранив наше название РНТОРЭС им. А. С. Попова только в списке организаторов.

3. Деятельность региональных отделений

3.1. Московское межрегиональное отделение

Председатель — доктор физ.-мат наук, профессор, директор (декан) Института радиотехнических и телекоммуникационных систем Российского технологического университета (бывший МИРЭА) Андрей Георгиевич Васильев — член Президиума РНТОРЭС.

Заместитель председателя — Наталья Николаевна Смольская — практический организатор выполнения программы работ регионального отделения.

С 2017 по 2019 гг. ежегодно проводили от 8 до 10 научно-технических и научно-практических конференций, от 15 до 30 семинаров, 2—3 конкурса, мероприятия для молодежи и школьников, издавались журналы и труды или сборники материалов проводимых конференций и школ.

Однако в 2020 году формат мероприятий вынужденно изменился. Конференции и практически все семинары и школы перешли на он-лайн режим.

Остановимся на лучших, с точки зрения Правления региона, проведенных за последние годы мероприятиях.

Ежегодная Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине». Сопредседатели Оргкомитета: д. ф-м. н., профессор Васильев Андрей Георгиевич (МИРЭА), к. т. н., доцент Петров Виктор Алексеевич и д. т. н., профессор Карасик Валерий Ефимович, оба из МГТУ им. Н. Э. Баумана. В конференции работают, в основном, три постоянные секции: «Лазеры» (руководитель к. т. н. Петров В. А.), «Биомедицинские применения электромагнитного излучения» (руководитель д. ф-м. н. Иванов Андрей Валентинович, НМИЦ онкологии им. Н. Н. Блохина) и секция «Лазерные технологии и диагностика сред» (руководитель д. ф-м. н., профессор Киреев Сергей Васильевич из НИЯУ МИФИ). Большую организационную помощь в проведении этой конференции из года в год оказывает Глотов Александр Николаевич, старший преподаватель МГТУ имени Баумана. Места проведения конференции в отчетном периоде были следующие: Краснодарский край (2016 г.), Дубна (2017 г.) и в последующие годы — в Москве: на базе МИФИ (2018 г.) и на базе РТУ (МИРЭА) (2019 и 2020 гг.). В 2020 г. из-за эпидемии COVID-19 заседания не проводились, тем не менее, был выпущен полномасштабный сборник трудов. В первые годы своего существования конференция собирала до 200 человек. Однако по мере расширения лазерной и оптической тематики, от конференции отпочковались и теперь живут самостоятельно 3 новые конференции.

В течение всех 5 лет отчетного периода успешно проводилась конференция «Радионавигационные технологии в приборостроении», которая начиналась как секция в Радиооптической конференции, а потом была оформлена как самостоятельная конференция. Организаторы — д. т. н. профессор МГТУ им. Баумана Власов Игорь Борисович и д. т. н., профессор МЭИ ТУ Перов Александр Иванович. К настоящему времени совместно с МГТУ имени Баумана и МЭИ ТУ проведены уже 17 конференций. Большую организационную работу по этой конференции ведут сотрудники НИИ РЭТ МГТУ им. Баумана и ИРЭ МЭИ.

В течение более 20 лет существует конференция «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». Председатель конференции — зам. генерального директора АО РКЦ «ПРОГРЕСС», директор НПП «ОПТЭКС», к. т. н. Бакланов Александр Иванович. В подготовке и проведении конференции активно участвуют секция «Космические системы дистанционного зондирования Земли» и секция «Фоточувствительные интегральные схемы и электронная элементная база», руководитель — к. т. н. Скрылев Александр Сергеевич.

Успешно в течение 20 лет проходит конференция «Электронная компонентная база космических систем» под руководством безвременно ушедшего в 2020 г. д. т. н., профессора Данилина Николая Семеновича (АО «РКС») и к. т. н. Ларионова Сергея Викторовича, начальника отдела сертификации НПО «ОПТЭКС» (секция «Космические электронные компоненты и вопросы их сертификации»). В проведении большую помощь оказывают ФГУП НПП «ОПТЭКС» и ОАО «Российские космические системы». В 2010 году конференция приобрела статус международной. Для участия в работе конференции в период с 2011 по 2020 год приезжали представители Болгарии, Испании, Америки, Китая, Франции, Швейцарии, Бельгии.

Отметим, что эти 4 последние родственные конференции проходят практически в одном районе Краснодарского края почти одновременно или одна за другой, так что желающие могли, при желании, посетить заседания не только одной конференции.

В течение отчетного периода успешно проведены 4 конференции совместно с ИППМ РАН в Зеленограде «Проблемы разработки перспективных микро- и нано-электронных систем».

Председатель Оргкомитета конференции — академик РАН Стенковский Александр Леонидович. Для обсуждения состояния и перспектив развития электроники на конференцию съехались более 200 участников. Участники и руководство ИППМ РАН первоначально приняли решение о целесообразности проведения конференции через год (только в четные годы), однако, начиная с 2017 года, по решению Оргкомитета конференция проводится ежегодно.

На протяжении почти 30 лет успешно проводит свои мероприятия руководитель секции «Кибернетика и инженерная экология» Мкртчян Ферде-нант Анушаванович. Это симпозиум «Проблемы экоинформатики» и школа для молодых специалистов по вопросам экологии. Секция поддерживается Исполнительной дирекцией Президиума РНТОРЭС им. А. С. Попова.

В ежегодной конференции «Электроника, микро- и нанoeлектроника» активно участвовала молодежь. Конференция проводилась в Суздале совместно с НИЯУ МИФИ, НИИСИ РАН и ЭНПО СПЭЛС в течение почти 20 лет (в 2020 году конференцию провести не удалось из-за режима изоляции). Руководитель конференции — д. ф.-м. н, профессор МИФИ Стенин Владимир Яковлевич.

В течение последних 7 лет среди учащихся школьного возраста совместно с Центрами детского творчества «Царицыно» и «На Сумском» успешно проводились конкурсы «Электроника и радиотехника юных». Конкурсы имеют статус международных; в Москву приезжали ребята из Московской области, Санкт-Петербурга, Минска, Риги. Детские работы

поражают богатой фантазией, неординарностью решений и, что немало важно, дешевизной реализации. Большую помощь в проведении этого конкурса оказали старший преподаватель МГТУ им. Баумана Глотов Александр Николаевич и преподаватель подмосковного интерната Центра детского творчества «Царицыно» Кузнецов Сергей Михайлович.

С успехом более 25 лет для учащихся школ в Московском Доме научно-технического творчества молодежи на Донской улице проводилась ежегодная научная конференция и конкурс «Радиопоиск». В её частичном финансировании принимали участие Московское и Российское НТОРЭС имени А. С. Попова. Изначально руководителями конференции были руководитель кружка по радиоэлектронике Дома научно-технического творчества молодежи на Донской Першина Наталия Эдуардовна и к. т. н., доцент МИРЭА Лазарев Евгений Михайлович, который к несчастью ушел из жизни. К сожалению, руководство МДНТТМ на Воробьевых горах в последние годы самостоятельную конференцию «Радиопоиск» объединило с подобной, которая проводилась в основном здании Дома творчества на Воробьевых горах. В настоящее время объединенная конференция и конкурс называются «РобоПоиск», а направления «Радиотехника и электроника» остались в ней только в качестве секции. Кроме того, резко был сужен возрастной ценз конференции. Младшие и средние школьные возрастные группы остались за бортом. Но конференция, тем не менее, проводится. Она проводилась даже в 2020 и 2021 годах, но в он-лайн режиме. В настоящее время эту конференцию курирует Глотов Александр Николаевич (старший преподаватель МГТУ им. Баумана).

К нашему великому сожалению, у МНТОРЭС не хватает средств, чтобы достойно награждать участников молодежных и ученических конференций за лучшие доклады, разработки и сообщения. Поэтому участие РНТОРЭС в завершающем этапе заключалось, в основном, в награждении грамотами, дипломами или мелкими сувенирами и, конечно, моральной поддержкой конкурсантов.

3.2. Нижегородская региональная организация

Эта организация активно включилась в работу, проводимую Научно-исследовательским радиофизическим институтом (НИРФИ). Члены РНТОРЭС взяли на себя часть организации проведения экспериментальной передачи КВ радиосигналов с помощью передатчиков стенда СУРА.

Передача осуществлялась 7 мая в праздник «День Радио» с трансляцией в эфир поздравительных изображений-открыток. Результаты оказались глобальными — сигналы принимались не только в нашей стране, но и во многих местах земного шара.

Был получен большой отклик от радиолюбителей (более 140 писем). География приема покрывает всю европейскую часть страны и приграничные страны. Сигнал на несущей частоте регистрировался в Будапеште, Кембридже и на локаторе на Гавайях (12000 км от передатчиков).

Большое содействие этому эксперименту оказал инженер, радиолюбитель-коротковолновик, Почетный радист, член Нижегородского НТОРЭС им. А. С. Попова Олег Иванович Архипов. С его помощью осуществлялся контроль приема радиосигналов и организация взаимодействия с радиолюбителями и различными радиослужбами. Теперь многие за пределами нашей страны знают, что существует такой российский праздник «День радио», и отмечается он ежегодно 7 мая.

Нижегородское региональное отделение РНТОРЭС им. А. С. Попова успешно продолжает проводить Российско-белорусские конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники». Инициаторами и главными организаторами этих конференций выступили: Председатель правления, доктор технических наук, профессор Юрий Михайлович Туляков и его заместитель Вячеслав Леонидович Ягодкин (оба — члены Президиума Центрального совета), а также член регионального Правления, доктор технических наук, профессор Сергей Владимирович Оболенский.

Конференция, которая проводится один раз в два года, собирала более 150 участников от предприятий и университетов обеих стран.

Нижегородское региональное отделение вышло с инициативой формирования кластера радиотехники, электроники и приборостроения Нижегородской области как некоммерческой ассоциации при поддержке правительства Нижегородской области. Цель этой инициативы — объединение усилий промышленных предприятий, научных и учебных организаций Нижегородской области с целью развития отрасли радиотехники и электроники в регионе.

3.3. Владимирская региональная организация

Организацией руководит д. т. н., профессор Людмила Тихоновна Сушкова. Одним из основных мероприятий региональной организации является Международная конференция с элементами научной молодежной школы «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ). В подготовке и проведении конференции участвовали как технические университеты России, среди которых наибольший вклад внёс Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, так и медицинские академии и организации. Международный статус конференции поддержан участием учёных и специалистов из Австрии, Америки, Ан-

глии, Германии, Дании, Италии и других стран, в том числе, Белоруссии и Украины.

Конференция собирала до 200 докладов, которые озвучиваются в 9 секциях. Сборники докладов имеют необходимые регистрационные знаки (ISBN, УДК, ББК) Книжной палаты РФ. Членом Оргкомитета конференции и ответственным редактором сборников докладов выступает председатель Владимирской региональной организации, член Президиума Центрального совета, доктор технических наук, профессор Владимирского госуниверситета Людмила Тихоновна Сушкова. Несомненная заслуга этой конференции состоит в том, что в Программу включена секция «Актуальные вопросы высшего образования в области биомедицинской инженерии и экологии». Решая частную задачу, участвующие в работе секции специалисты приходят к обсуждению более общих проблем, связанных с развитием высшего образования в России.

Постоянно большой интерес вызывают также «Зворыкинские чтения», которые проходят ежегодно (с 2008 года) в виде двух конференций: «Регионы России» (первая пятница февраля) и «Молодежь России» (последняя пятница апреля). Конференции проходят в виде пленарного заседания и в рамках секций (по направлениям научных исследований в различных областях машиностроения, радиотехники, информационных технологий, экономики, экологии и гуманитарных наук). На конференциях представляется более 500 докладов в более чем 40 секциях.

3.4. Крымское региональное отделение

Ежегодно Крымское региональное отделение (председатель — заведующий кафедрой Института радиоэлектроники и информационной безопасности Севастопольского государственного университета, член Президиума РНТОРЭС Павел Петрович Ермолов) организует и проводит Международную конференцию «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Конференция собирала более 200 участников из более 20 регионов России, а также представителей Беларуси, Украины, Китая и др. стран. На конференции работают секции по 16 направлениям: Твердотельные приборы и устройства СВЧ; Электровакуумные и микровакуумные приборы СВЧ; Системы СВЧ связи, вещания и навигации; Информационные технологии в телекоммуникациях; Антенны и антенные элементы; Пассивные компоненты; Материалы и технология СВЧ-приборов; Нанoeлектроника и нанотехнология; СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты; Электромагнитная и радиационная стойкость материалов и электронной компонентной базы; СВЧ-измерения; Прикладные аспекты

СВЧ-техники; Микроволновые технологии и техника в биологии и медицине; Фотоника и радиофотоника; Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн; История развития радиотехнологий и телекоммуникаций, история и методология науки и техники [2].

4. Организационная работа

Президиум Центрального совета, избранный на VI Съезде, начал работу, когда Российское НТОРЭС имени А. С. Попова объединяло 44 региональные отделения. Однако реально работает не более 25.

К сожалению, некоторые положения Федерального закона об общественных объединениях от 19.05.1995 № 82-ФЗ и в последней редакции этого закона от 12.03.2002 № 26-ФЗ, разрешивших объединяться с юридическими лицами — общественными объединениями и, тем самым, исключивших производственные юридические лица, привело к резкому ухудшению финансовых возможностей большинства региональных организаций. В конечном счёте это привело к существенной приостановке численного роста Общества, потере штатных сотрудников, размыванию актива и понятному пессимизму.

Однако, жизнь продолжается: поддерживается деятельность региональных отделений в Севастополе, Калининграде, Серпухове, Красноярске, Тюмени, Владивостоке. В то же время несколько региональных организаций полностью прекратили свою деятельность (в Дагестане, Ингушетии, Кабардино-Балкарии, Алтайском крае).

Большой урон развитию научно-технических разработок и активизации творческой деятельности молодёжи продолжает наносить введенные повсеместно бакалавриат и магистратура (по Болонской конвенции). Бывшие борцы за такую перестройку высшего образования уверяют в том, что плохая подготовка в школах вынудила пойти на такой шаг.

По предварительным итогам, численность Общества составляет 2900 человек (к VI Съезду численность Общества достигала 3850 человек). Как удалось выяснить, такой спад связан с тем, что, заканчивая трудовую деятельность, члены общества перестают поддерживать связь со своими региональными отделениями. Это особенно заметно в малочисленных отделениях. Большой урон нанесла двухлетняя эпидемия COVID-19.

За прошедшее пятилетие Президиум Центрального совета собирался очно на свои заседания 10 раз. Дважды применялась система «Опросного листа». Обычно обсуждались текущие дела, связанные с подготовкой и проведением важнейших мероприятий, предусмотренных Тематическими планами, отчёты по Конкурсам, финансовые проблемы, а также обсужда-

лись кандидатуры на присвоение почётных званий Общества и награждений, представленные региональными организациями.

Ежегодно Президиум РНТОРЭС:

— утверждает звания Почётного члена РНТОРЭС им. А. С. Попова;

— направляет в Минцифру представления на награждение знаком «Почётный радист» за большую общественную работу в региональных отделениях Общества;

— награждает высшим знаком Общества «За заслуги в развитии радиоэлектроники и связи».

За пятилетие ушли из жизни активные члены РНТОРЭС:

— Юрий Семёнович Хурхула,

— Любовь Ильинична Алексеева,

— Евгений Михайлович Лазарев,

— Евгений Михайлович Сухарев,

— Николай Семёнович Данилин,

— Виктор Павлович Дворкович,

— Марк Иосифович Кривошеев,

— Сергей Михайлович Смольский,

— Роман Юрьевич Иванюшкин.

Съезд почтил память ушедших коллег.

На съезде были избраны президент, вице-президенты, главный ученый секретарь и Президиум РНТОРЭС в следующем составе:

Президент:

Никитов Сергей Аполлонович, академик РАН, директор ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Вице-президенты:

Аджемов Артём Сергеевич, д. т. н., профессор, Президент МТУСИ;

Зубарев Юрий Борисович, член-корреспондент РАН;

Кирпичников Алексей Петрович (вице-президент по инновационной деятельности);

Растягаев Дмитрий Владимирович, штатный директор исполнительной дирекции;

Сушкова Людмила Тихоновна, от Владимирской организации РНТОРЭС;

Цимбал Владимир Анатольевич, от Серпуховской организации РНТОРЭС.

Главный учёный секретарь:

Третьяков Геннадий Николаевич, к. т. н., доцент.

Члены Президиума:

Алёшин Виктор Сергеевич, к. т. н., доцент;

Брюханов Юрий Александрович, от Ярославской организации РНТОРЭС;

Бугаев Александр Степанович, академик РАН, члена Президиума ВАС;

Бутенко Валерий Владимирович, д. т. н., профессор;

Васильев Андрей Георгиевич, от Московской межрегиональной организации РНТОРЭС;

Васильев Константин Константинович, от Тверской организации РНТОРЭС;

Витязев Владимир Викторович, от Рязанской организации РНТОРЭС;

Гуляев Юрий Васильевич, академик РАН, (Почётный член Президиума РНТОРЭС);

Дворкович Александр Викторович, член-корреспондент РАН;

Ермолов Павел Петрович, от Крымской региональной организации РНТОРЭС;

Зайцев Александр Владимирович, от Смоленской организации РНТОРЭС;

Золотинкина Лариса Игоревна, от Санкт-Петербургской организации РНТОРЭС;

Калошин Вадим Анатольевич, д. ф.-м. н., профессор;

Каляев Игорь Анатольевич, от Ростовской-на-Дону организации РНТОРЭС;

Мамон Юрий Иванович, от Тульской организации РНТОРЭС;

Мартынов Ливон Михайлович, д. э. н., профессор;

Мироненко Игорь Германович, от Санкт-Петербургской организации РНТОРЭС;

Пахотин Валерий Анатольевич, от Калининградской организации РНТОРЭС;

Пашинцев Владимир Петрович, от Серпуховской организации РНТОРЭС;

Самсонов Геннадий Андреевич, к. т. н., доцент;

Сергеев Вячеслав Андреевич, от Ульяновской организации РНТОРЭС;

Смольская Наталья Николаевна, от Московской межрегиональной организации РНТОРЭС;

Туляков Юрий Михайлович, от Нижегородской организации РНТОРЭС;

Федоров Игорь Борисович, академик РАН (Почётный член Президиума);

Чиров Денис Сергеевич, д. т. н., профессор;
Ягодкин Вячеслав Леонидович, от Нижегородской организации
РНТОРЭС.



Рис. 1. Вице-президент РНТОРЭС, исполнительный директор Президиума РНТОРЭС
Г. А. Самсонов открывает VII съезд Общества. Москва, конгресс-центр МТУСИ,
7 июня 2022 г.

Fig. 1. Vice President of RNTORES, Executive Director of the Presidium of RNTORES
G. A. Samsonov opens the VII Congress of the Society. Moscow, MTUCI congress center,
June 7, 2022

5. Заключение

В работе VII съезда РНТОРЭС им. А. С. Попова, который состоялся 7 июня 2022 г. в конгресс-центре МТУСИ, приняли участие около 60 делегатов — представителей Президиума и региональных отделений РНТОРЭС. Делегаты съезда одобрили деятельность РНТОРЭС за отчетный период, избрали новый состав руководящих органов Общества и выразили уверенность в успешном развитии РНТОРЭС на новом этапе.

Список литературы

1. Гуляев Ю. В., Бугаев А. С., Ермолов П. П. Юбилей общества им. А. С. Попова. К 70-летию ВНОРИЭ — ВНТОРЭС — РНТОРЭС. В сб. : СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015). Материалы докладов 25-й Международной Крымской конференции в 2 тт. 2015. Т. 1. С. 2—6.
2. Ермолов П. П. КрыМиКо : проблемы и перспективы (к 25-летию конференции). В сб. : 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). Материалы конференции в 13 тт. 2016. Т. 1. С. 70—83.

Информация об авторах

Самсонов Геннадий Андреевич, кандидат технических наук, доцент, вице-президент и директор Исполнительной дирекции РНТОРЭС, Москва, Российская Федерация.

Ермолов Павел Петрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий базовой кафедрой «Инновационная радиоэлектроника» Института радиоэлектроники и информационной безопасности Севастопольского государственного университета, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

VII Congress of RNTORES n. a. A. S. Popov

G. A. Samsonov¹ and P. P. Yermolov²

¹ Russian NTORES named after A. S. Popov
6/9/20, Rozhdestvenka st., Moscow, 107031, Russian Federation
rntores@mail.ru

² Sevastopol State University
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russian Federation
ppyermolov@sevsu.ru

Received: June 21, 2022

Peer-reviewed: June 22, 2022

Accepted: June 22, 2022

Abstract: Information is provided on the VII Congress of the all-Russian public organization “Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications named after A. S. Popov”, which was held in Moscow on June 7, 2022. The results of the activities of the RNTORES for the reporting period (2016–2022) are considered: publishing magazines and holding conferences. Information is given on the activities of regional branches (Moscow, Nizhny Novgorod, Vladimir, Tula, Krimea), as well as on the organizational work of RNTORES. The composition of the newly elected governing bodies of RNTORES for a 5-year period (president, vice-presidents and the Presidium) is given.

Keywords: congress, RNTORES, regional branches, journals, conferences.

For citation (IEEE): G. A. Samsonov and P. P. Yermolov, “VII Congress of RNTORES n. a. A. S. Popov,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 378–394, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.29. (In Russ.).

References

- [1] Yu.V. Gulyaev, A. S. Bugaev, and P. P. Ermolov, “To the 70th anniversary of VNORIE – VNTORES – RNTORES n. a. A. S. Popov,” 25th International Crimean Conference *Microwave and Telecommunication Technology* (CriMiCo’2015), vol. 1, pp. 2–6, 2015. (In Russ.).
- [2] P. P. Yermolov, “CriMiCo: problems and prospects (to the 25th anniversary of the conference),” 26th International Crimean Conference *Microwave and Telecommunication Technology* (CriMiCo’2016), vol. 1, pp. 70–83, 2016. (In Russ.).

Information about the authors

Gennady A. Samsonov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vice President and Director of the Executive Directorate of RNTORES, Moscow, Russian Federation.

Pavel P. Yermolov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Basic Department “Innovative Radio Electronics” of the Institute of Radio Electronics and Information Security, Sevastopol State University, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9089-974X.

УДК 621.37-621.39(091)

Выбор тренда развития *Bell System* в начале XX века

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 22 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: *Исследован выбор тренда развития Bell System в начале 20 века в условиях жесткой конкуренции на рынке телефонной связи и экономического кризиса 1907 г. в США. Подробно показана перестройка научно-технической деятельности компании Bell, которая способствовала привлечению инноваций и сосредоточению расходов на научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы. Это позволило в дальнейшем создать условия для разработки телефонного лампового репитера и приступить к прокладке трансконтинентальной телефонной линии Нью-Йорк — Сан-Франциско. Отмечено, что выход компании на лидирующие позиции в телефонном бизнесе связан в значительной степени с привлечением к выполнению проекта талантливых ученых и инженеров.*

Ключевые слова: *Bell System, AT&T, экономический кризис 1907 г., Хаммонд В. Хейс, Джон Дж. Карти, Фрэнк Б. Джеветт, репитер, телефонная линия Нью-Йорк — Сан-Франциско, исследовательская группа Колпиттса.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Выбор тренда развития Bell System в начале XX века // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 395—427.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Выбор тренда развития Bell System в начале XX века / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 395—427.

1. Введение

AT&T (*American Telephone & Telegraph Co.*) столкнулась с конкуренцией в 1893 и 1894 годах, когда истек срок действия патентов на телефон Белла. В конкурентную борьбу вступили многие появившиеся незави-

симые телефонные компании. К 1900 году почти 6000 новых компаний обслуживали почти 600000 клиентов в США.

Стремясь противостоять этой конкуренции, *AT&T*, будучи теперь центральной холдинговой компанией всей *Bell System*, чрезмерно расширила свои финансовые возможности, но не сумела ни заблокировать продвижение независимых компаний, ни поддерживать особенно высокое качество обслуживания [1]. Борьба против независимых компаний сказалась на общественной репутации *Bell System* и ослабила ее политическое положение, которое и без того было шатким в том, что касалось федеральной антимонопольной политики.

В 1881 году *AT&T* провела первые организационные мероприятия в технической деятельности и создала два отдела: электротехнический и патентный. Электротехнический отдел занимался экспериментальными и общими электротехническими работами. Этот отдел отражал реорганизацию деятельности *Bell System* после урегулирования в 1879 году взаимоотношений с *Western Union*, и когда его деятельность находилась под непосредственным руководством в тот период времени Теодора Н. Вейла (*Theodore Newton Vail*, 16.07.1845—16.04.1920), генерального директора (*General Manager*) *Bell Telephone Company* (1878—1887). Эта ранняя организация технической деятельности *Bell System* была направлена в большей степени на разработку или покупку патентов, которые должны были усилить ее патентный контроль в области телефонии и сделать доступными такие телефонные услуги, которые можно было бы использовать с прибылью.

13 марта 1879 г. была зарегистрирована *National Bell Telephone Co.* (позже переименованная в *American Telephone & Telegraph Co.*), объединившая компанию Белла и *New England Telephone Co.* под председательством президента Уильяма Форбса (*William Hathaway Forbes*, 1840—1897), зятя Ральфа Эмерсона (*Ralph Waldo Emerson*) и лидера группы бостонских инвесторов.

У Вейла было свое видение телефонной отрасли и ее потенциала. Он воплотил это видение в жизнь благодаря своему сильному деловому чутью. Вейл считал, что телефон должен быть настолько доступным, чтобы развитие национальной телефонной системы могло принести пользу всем — концепция универсального обслуживания была очевидна Вейлу уже тогда. Он был убежден, что деньги — это только средство для развития системы, и хотел, чтобы в компанию было вложено как можно больше денег. Взгляды Вейла противоречили воззрениям Уильяма Форбса, в то время президента компании (1879—1887). Форбс считал, что щедрые дивиденды для акционеров должны быть главным приоритетом компании.

Вместо того, чтобы сделать выбор между своим видением компании и позицией сотрудника, Вейл в 1887 году ушел в отставку. Хотя другие руководители компании разделяли взгляды Вейла, только 20 лет спустя его попросили вернуться, но уже в качестве президента.

2. Преобразования в компании AT&T

Организация инженерной деятельности, установленная в 1881 г., к 1883 г. претерпела изменения: в дополнение к двум отделам был организован экспериментальный цех. Патентная деятельность была полностью отделена от электротехнического отдела. В июне 1884 г. название созданной организационной структуры было изменено на «Механический отдел». Некоторые основные технические функции электротехнического отдела были переданы новому отделу, который стал известен как механический отдел в Бостоне. Во главе механического отдела был поставлен изобретатель телефонного коммутатора Эзра Т. Гиллиленд¹ (*Ezra Torrance Gilliland*, 17.06.1845—13.05.1903, рис. 1). Гиллиленд ушел в отставку в ноябре 1885 года, когда отделу было всего около года. Заведующим механическим отделом стал Хаммонд В. Хейс (*Hammond Vinton Hayes*, 28.08.1860—22.03.1947, рис. 1) из Массачусетского технологического института в Кембридже (штат Массачусетс). Хейс был выпускником Гарвардского университета и одним из первых докторов философии этого университета в области физики (*Ph.D*). В ноябре в *Bell Telephone Company* начались научные исследования. Сформировавшаяся структура отдела и его эффективность, которой он позже достиг, были получены благодаря вкладу Хейса.

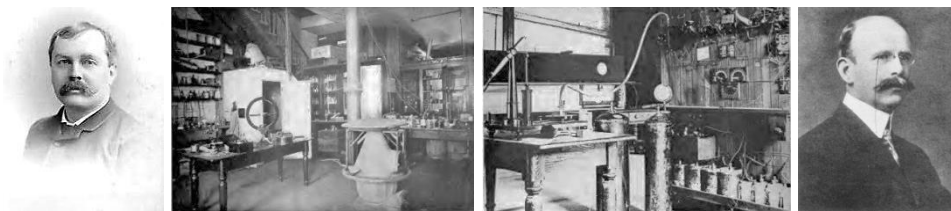


Рис. 1. Эзра Торранс Гиллиленд. Лаборатория механического отдела на Перл-стрит, 141, Бостон, 1886 г. Часть лаборатории механического факультета на Пёрч-стрит, 127, около 1890 г. Хаммонд В. Хейс.

Fig. 1. Ezra T. Gilliland. The laboratory of the Mechanical department at 141 Pearl Street, Boston, in 1886. A corner of the Mechanical Department laboratory at 127 Purchase Street about 1890. Hammond V. Hayes

¹ Гиллиленд Эзра был другом и коллегой Томаса Эдисона. Они познакомились молодыми людьми и называли друг друга *Damon and Pythias* из-за их близкой дружбы. Друзья долго были деловыми партнерами, но потом поссорились из-за владения компанией *Edison Phonograph Company*. Эдисон встретил свою вторую жену Мину Миллер в доме Гиллиленда (1886 г.).

1 апреля 1889 г. президентом компании AT&T стал адвокат Джон Хадсон (*John Elbridge Hudson*, 03.08.1839—01.10.1900). Заметим, что в то время для телефонного бизнеса было чрезвычайно важно иметь во главе компании человека интеллектуального и высокого морального уровня. Таким был президент AT&T Джон Хадсон, рис. 2. Его хобби было собрание редких книг и старых английских гравюр. Он владел греческим языком и очень любил им пользоваться. Во всех возможных случаях он использовал в своем разговоре язык Перикла и даже дошел до того, что стал писать свои деловые записки на греческом языке. Прежде всего он был ученым, а затем уже юристом и, между прочим, центральной фигурой в телефонном мире.



Рис. 2. Президент AT&T с 1889 по 1900 гг. Джон Хадсон

Fig. 2. President of AT&T since 1889 to 1900 John Hudson

Хадсон придал телефону социальный статус. За стиль жизни и престиж люди готовы были платить. Он создал себе доброе имя и держал его в чистоте и ясности, чтобы не было никаких подозрений в правонарушениях. Хадсон крепко держался за то, что когда-либо было достигнуто. Им была подготовлена почва для периода экспансии. Он занял пятьдесят миллионов долларов на улучшения в AT&T и значительно укрепил силу и влияние компании. Хадсон оставался во главе телефонной компании до самой своей смерти

в 1900 году и, таким образом, дожил до рассвета эры большого бизнеса. При его руководстве были сделаны большие дела в развитии технологий. Бизнес продвигался вперед поэтапно благодаря своим капитанам. Каждый на своем месте старался делать немного лучше, чем вчера, — таков был лейтмотив эпохи Хадсона. Не было ни одного выдающегося гения, каждый важный шаг вперед был результатом сотрудничества многих умов и нужд растущего трафика.

В 1891 году для стандартизации конструкций и методов эксплуатации станций был создан инженерный отдел под руководством Джозефа Дэвиса (*Joseph P. Davis*). В 1894 году Дэвис был назначен номинально ответственным за инженерный и механический отделы.

После внезапной смерти Хадсона президентом AT&T в 1901 г. стал известный специалист по патентному праву Фредерик Фиш² (*Frederick*

² Фиш во время своего пребывания в AT&T курировал завершение создания единой национальной сети телефонных линий. В 1907 году Фиш вернулся к юриспруденции. В том же году он впервые предложил Томасу Эдисону идею *hello* как более эффективное телефонное приветствие, чем *Are you there?* или *Are you ready to talk?* Александр Грэм Белл предложил *ahoy*. В 1906 году Фиш помог братьям Райт получить патент на деформацию крыла.

Perry Fish, 13.01.1855—06.11.1930), рис. 3. За сорок лет активной практики он выступал в качестве адвоката почти во всех патентных делах перво-степенной важности. Эти дела включали патенты, касающиеся телефона, пневматических тормозов, паровой турбины, автомобилей, обувного оборудования, радиоаппаратуры. Партнер фирмы *Fish, Richardson, Herrick & Neave* Уильям Ричардсон (*William King Richardson*) написал в своем панегирике о Фише: «Он был великим юристом и великим ученым, но, прежде всего, он был великим человеком. Каждый из тысяч, кто соприкасался с ним во время его необычайно активной жизни, лучше знает его. Он излучал доброту, сочувствие и мужество».

К 1902 году у Дэвиса начало сдавать здоровье, и он не мог продолжать активно руководить инженерным отделом. В результате инженерный и механический отделы были объединены в единую организацию под названием «Инженерный отдел» и подчинены комитету из трех человек, который формально подчинялся Дэвису. Хейс был одним из этого руководящего комитета и отвечал в тот период времени за подготовку ежегодных



Рис. 3. Президент AT&T с 1901 по 1907 гг. Фредерик Фиш.

Fig. 3. President of AT&T since 1901 to 1907 Frederic Fish

отчетов инженерного отдела для Дэвиса. Однако 1 января 1905 года Дэвис подал в отставку, после которой Хейс был назначен главным инженером, а также ответственным за объединенный инженерный отдел.

В 1907 году в США разразился финансовый кризис³. Это привело к тому, что компания AT&T стала испытывать трудности не только финансовые, но и в борьбе с конкурентами. В этот период времени были сделаны важнейшие изменения в политике компании и ее технической деятельности, а также изменен управленческий контроль над Американской компанией под влиянием инвестиционных банкиров. До 1907 года фундаментальным исследованиям уделялось мало внимания (или совсем не уделялось). Приобретение контрольных патентов осуществлялось через патентный отдел из источников, не входящих в *Bell System*. Политика компании скорее заключалась в том, чтобы расширить междугородные услуги за счет таких технических

³ Кризис 1907 года — один из самых знаменитых кризисов XX века. Этот кризис был вызван коллапсом кредитных организаций, что привело к возникновению четырехлетней рецессии. Некоторые историки и экономисты считают, что толчком к кризису 1907 года послужили действия банка Англии, который в 1906 году увеличил учетную ставку в два раза. Это привело к масштабному оттоку капиталов из Соединенных Штатов.

мероприятий, которые помогали бы в борьбе с конкурентами, а также в проектировании и улучшении аппаратов до мелочей. Все это должно было в целом направлено на попытки удовлетворить все конкурентные предложения телефонных услуг повышенного качества, но по более низкой цене и в значительно большем количестве.

Паника 1907 года привела к смене руководства компании и назначению нового главного инженера.

3. Привлечение ученых к разработкам компании

В 1892 году, после обсуждения работ по перекрестным помехам, затуханию, импедансу, искажениям и самоиндукции, Хейс в годовом отчете от 7 марта 1892 г. президенту Джону Хадсону написал [2]: «Я решил в будущем отказаться от некоторой части работы этого отдела, уделив все внимание практической разработке приборов и устройств. Я думаю, что теоретическая работа может быть выполнена гораздо лучше и экономичнее в сотрудничестве со студентами [Массачусетского] Технологического института и, возможно, Гарвардского колледжа». В соответствии с этим решением он отказался и от идеи проведения исследования методов передачи речи из-за выполнения непосредственных обязанностей, связанных с проектированием инструментов и контролем за производством телефонов.

Сосредоточив внимание отдела на «практических» разработках, Хейс начал привлекать в свой штат ученых с университетским образованием. Первым нанятым в 1890 году стал сотрудник из Университета Джона Хопкинса (*Johns Hopkins University*) по рекомендации авторитетного физика Генри Роуланда⁴, Джон Стоун Стоун (англ. *John Stone Stone*, 24.09.1869—20.05.1943), который применил свои современные математические знания сначала к теории передачи голоса, а затем к усилителям и волнам Герца. В 1883 г. Генри Роулэнд (рис. 4) заявил на собрании Американской ассоциации содействия развитию науки (*American Association for the Advancement of Science*) [3]: «Здесь я утверждаю, что все могут найти время для научных исследований, если захотят. Наши колледжи и университеты редко приглашают людей с первоклассной репутацией, и я даже слышал, как попечитель одного известного колледжа утверждал, что ни один профессор не должен заниматься исследованиями из-за потраченного впустую времени».

⁴ Генри Август Роулэнд (*Henry Augustus Rowland*, 27.11.1848—16.04.1901) — известный американский физик. Его статья по исследованиям магнитной проницаемости была отклонена *American Journal of Science*, после этого он отправил ее Джеймсу Максвеллу в Великобританию. Впечатленный Максвелл опубликовал ее в Лондоне в *Philosophical Magazine*. Между 1899 и 1901 годами он был первым президентом Американского физического общества.



Рис. 4. Генри Август Роуленд
Fig. 4. Henry Augustus Rowland

В 1897 году Хейс нанял Джорджа Кэмпбелла (*George Ashley Campbell*), получившего степень бакалавра инженерии в Массачусетском технологическом институте в 1891 году и степень магистра в Гарварде в 1893 году. Кэмпбелл действительно был, как позже сказал о нем Фрэнк Джеветт, первый президент *Bell Telephone Laboratories*, «тщательно подготовленным с научной точки зрения» [4]. Кэмпбелл сразу же обратился к принципиальным проблемам на рубеже веков, уменьшению затухания и фазовых искажений в телефонной линии. К 1899 году он разработал фундаментальную теорию нагрузочной катушки. Работа Кэмпбелла представляла собой рабочий пример принципов развития научных исследований в промышленности. Ненаучная цель расширения услуг дальней связи породила технологические проблемы затухания и фазовых искажений, которые затем стимулировали научные исследования Кэмпбелла. Его технологический успех в конечном итоге повысил признание компанией полезности и важности внутренних фундаментальных исследований.

Третьим ученым с университетским образованием, нанятым Хейсом на рубеже веков, был канадец Эдвин Колпиттс (*Edwin Henry Colpitts*, 19.01.1872—06.03.1949), который несколько лет спустя возглавил научно-исследовательское подразделение Белла. Колпиттс, нанятый в 1899 году вместо Стоуна (который ушел в том же году для проведения независимых исследований), имел степень магистра физики, полученную в Гарварде в 1897 году, и два года дополнительного изучения физики и математики, так же в Гарварде. Как и Стоун и Кэмпбелл до него, Колпиттс изначально занимался инженерными проблемами, работая с Кэмпбеллом над созданием новых методов и приборов для измерения переменного тока, над тем, как нагружать фантомные цепи, а также над проблемой уменьшения индуктивных помех, создаваемых электропоездами троллейбусами, и автомобилями.

В период 1900—1907 годов Хейс продолжал уделять внимание работам по проблемам, связанным с электромагнитной теорией, включая теоретическое исследование передачи по нагруженным линиям дальней связи, электрическим помехам, фантомной цепи и множественному коммутатору, но в то же время он преуменьшал значение науки и даже оригинальных изобретений штатными сотрудниками. Например, в 1906 г. Хейс писал Фредерику Фишу: «В отделе прилагаются все усилия для совершенствования инженерных методов, однако нет ни одного изобретателя, спо-

собного создать новое устройство. Вследствие этого во многих случаях будет необходимо полагаться на приобретение изобретений посторонних людей, оставляя их адаптацию нашим собственным инженерам и *Western Electric Company*» [4, p. 527].

С другой стороны, Стоун, Колпиттс, Кэмпбелл и Джейвett (всех их нанял Хейс) и даже сам Хейс были не только «способны создавать новые устройства новой конструкции», но и успешно это делали. Хейс занял двойственную позицию в отношении науки и изобретений в 1890-е годы. Несмотря на очевидный успех исследований в компании, таких как работа над нагрузочной катушкой, он продолжал в своих отчетах преуменьшать значение оригинальных изобретений и научных исследований, и даже подвергать сомнению роль в качестве научных руководителей таких ученых, как он сам, Колпиттс или Джейвett. По словам Хейса: «Сам тот факт, что любое великое изобретение в настоящее время должно, по всей вероятности, исходить от какого-то человека с необычными научными достижениями, делает лабораторию под руководством таких людей очень дорогим и, вероятно, непродуктивным предприятием» [4, p. 527]. Одно из разумных объяснений этого факта заключается в том, что в своей официальной переписке Хейс реагировал на отношение сверху, то есть руководства компании, которое считало науку несколько рискованным вложением средств. Хейс, столкнувшись с остатками давнего скептицизма и консерватизма, которых многие бизнесмены все еще придерживались по отношению к внутренним исследованиям, был, по словам коллег, просто слишком скромным и сдержанным джентльменом, чтобы отстаивать свою убежденность в ценности внутренних фундаментальных исследований внутри компании [5].

Ключевая роль Хейса в начале осуществления программы фундаментальных исследований в *Bell System* проистекала не из его влияния на политику, а скорее из того, что к 1904 году он нанял небольшое ядро академически подготовленных ученых, которые со временем создали первое исследовательское подразделение системы *Bell System*.

4. Возвращение Теодора Вейла

Конкуренция дала *AT&T* необходимый толчок, заставив компанию расширяться и расти, но в то же время ослабила ее финансовое положение. Между 1902 и 1906 годами долг вырос с 60 до 200 миллионов долларов. Посредством серии покупок облигаций, начиная с 1903 года, американский банкир и финансист Дж. П. Морган (англ. *John Pierpont Morgan*, 17.04.1837—31.03.1913, рис. 5) пытался получить контроль над компанией *AT&T* у бостонских капиталистов, начав беспроектный вариант, кото-

рый длился несколько лет. В результате он добился своего. Морган приобрел контроль над AT&T в 1907 году с целью сделать ее монополией по образцу американской железной дороги. Морган и его сторонники из Нью-Йорка и Лондона победили. В этот период времени американская компания столкнулась с трудностями при реализации крупного выпуска облигаций, и «финансовое небо было заполнено бегущими тучами, которые предсказывали надвигающийся шторм. Начался период сокращений и сомнений» [6]. Эта ситуация привела к отставке Фредерика Фиша с поста президента. После этого был возвращен харизматичный Теодор Н. Вейл, которого 1 мая 1907 г. избрали на пост президента AT&T, рис. 6.

Вейл, хотя и был новичком в коммуникациях, но его идеи о том, какой должна быть AT&T, соответствовали духу его времени. Он пришел второй раз к власти в эпоху, когда поклонялись размеру и скорости и когда господствовала сильная вера как в человеческое совершенство, так и в единственную оптимальную конструкцию систем. Это были последние десятилетия «викторианской утопии», эпохи веры в технологическое планирование, научное управление и социальную обусловленность, которая была свидетелем подъема евгеники, «научного управления» Фредерика Тейлора, социализма и дарвинизма [7]. И поэтому верить в способность человека к совершенствованию коммуникаций было далеко не фантастическим представлением.

Теодор Вейл тщательно спланировал и сразу начал радикальную реорганизацию телефонной компании. Морган использовал свою власть над капиталом, чтобы лишить противников AT&T средств, необходимых им для конкуренции. Тем временем на местах Вейл приказал установить достаточно низкие цены, чтобы конкурировать с *Bell System* было самоубийственной миссией, а затем выкупил убыточные фирмы по дешевке. Таким образом, монополия была делом рук людей, а не Бога.

Вейл ушел из AT&T в 1887 году из-за разногласий с бостонцами, чьи взгляды были сосредоточены исключительно на краткосрочной прибыли. У Вейла и его сторонников было более широкое видение, чем у бостонцев, и они считали, что им следует создать всеобъемлющую общенациональную систему связи. Даже в свои 62 года Вейл был полностью привержен тому, чтобы воплотить свое видение в жизнь. На этот раз у него был Мор-



Рис. 5. Американский банкир и финансист Дж. П. Морган.

Fig. 5. American banker and financier John P. Morgan

ган, чтобы противостоять любому капризу со стороны правления. При этом Вейл прекрасно понимал, что в своих деяниях он должен обязательно учитывать мнение Моргана.



Рис. 6. Президент компании AT&T Теодор Н. Вейл. Конец 19 века.

Fig. 6. AT&T President Theodore N. Vail. Late 19th century

Критики Моргана считали его безжалостным капиталистическим пиратом, олицетворением гнетущей силы Уолл-Стрит, которая распяла человечество на золотом кресте. Однако, его целью было заменить беспощадную конкуренцию экономической стабильностью. Морган сыграл важную роль в создании современной американской экономики.

После экономической депрессии в США, начавшейся в 1893 году, он реорганизовал многие обанкротившиеся железные дороги и промышленные компании. Он считал, что объединение соперничающих интересов в рациональные системы необходимо для стабилизации экономики США и предотвращения пагубных ценовых войн.

Во время финансовой паники 1907 года, которая грозила спровоцировать бегство из страны банков, Морган взял на себя ответственность и не позволил развиваться такому ходу событий. Он собрал президентов ведущих банков в своей библиотеке и запер дверь. В 4 часа утра его адвокат зачитал им соглашение, в котором оговаривалось, сколько каждый должен внести в пакет помощи. Морган сказал одному банкиру: «Вот место, а вот и ручка». Когда он решил купить *Carnegie Steel Company*⁵ на пути к созданию *United States Steel*, он попросил Эндрю Карнеги (англ. *Andrew Carnegie*, 25.11. 1835—11.08.1919) назвать его цену. Карнеги написал на листе бумаги 480 миллионов долларов. Морган взглянул на бумагу и сказал: «Я принимаю эту цену». Он организовал синдикаты для выпуска облигаций и акций, которые породили такие компании, как AT&T.

AT&T, контролируемая Морганом, с 1907 года тоже стремилась к регулированию. Компания получила то, что хотела в 1910 году, когда телефоны были переданы под юрисдикцию Комиссии по торговле между штатами (*Interstate Commerce Commission* — сокращенно ICC). Это привело к тому, что тарифные войны остались в прошлом. Президент AT&T

⁵ *Carnegie Steel Company* была сталелитейной компанией, изначально созданной Эндрю Карнеги (*Andrew Carnegie*) и несколькими близкими партнерами для управления бизнесом на сталелитейных заводах в Питтсбурге, штат Пенсильвания, в конце 19 века. Продажа сделала Карнеги одним из самых богатых людей в истории.

Вейл сказал: «Мы верим и были первыми, кто выступал за... государственный контроль и регулирование коммунальных услуг».

После возвращения 30 апреля 1907 года Вейла в AT&T в качестве президента, было положено начало концу телефонной конкуренции. Его возвращение в компанию изменило ее основную направленность с конкуренции на консолидацию. Наиболее важными целями Вейла после приобретений AT&T компаний, были устранение конкурентов, установление дружеских отношений с политиками и регулирующими органами, а также расширение телефонных услуг для широкой публики.

Отражая веру Вейла в превосходство единой телефонной системы, AT&T приняла в рамках обширной рекламной кампании новый корпоративный девиз: «Одна политика, одна система (AT&T) и одна универсальная служба, так как никакая совокупность отдельных компаний не способна обеспечить обществу того, что может дать *Bell System*». Исходя из этого, Вейл сформулировал принцип «естественной управляемой монополии», который получил название «Принцип Вейла». Согласно этому принципу телефонные операции в силу ряда технологических причин должны быть сосредоточены в одних руках, то есть в этом виде бизнеса наиболее эффективно будет работать монополия, оказывающая весь комплекс услуг во всех регионах. При этом государственное регулирование должно быть «независимым, разумным, непредвзятым, добросовестным и честным» и стать приемлемой заменой рыночной конкуренции.

Подобно Теодору Рузвельту, он прикрывал свои имперские инстинкты языком общественного долга. «Мы признаем “ответственность” и “подотчетность” перед общественностью с нашей стороны, — писал Вейл в 1911 году, как голос AT&T, — что отличается от обязательств других общественных компаний, не столь тесно связанных с ними, и является чем-то большим, вплетенным в повседневную жизнь всего общества» [7]. Служа чему-то хорошему, вкус Вейла к величию был безошибочным. «Он ничего не мог сделать по мелочи», — пишет его биограф Альберт Пейн (*Albert Paine*). «Он мог бы начать строить беличью клетку, но в конце концов это превратилось бы в зверинец». Томас Эдисон отзывался о Вейле очень просто [7]: «Господин Вейл является большим человеком».

В годовом отчете AT&T за 1910 год Вейл резюмировал свою веру в единую систему [7]: «Эффективная, агрессивная конкуренция, а также регулирование и контроль несовместимы друг с другом и не могут осуществляться одновременно». Для реализации этого видения Вейл приобрел ряд независимых телефонных конкурентов, а потом телеграфного гиганта *Western Union*. Однако правительство быстро дало понять, что такая деятельность подозрительна в соответствии с существующими антимонопольными законами.

5. Кингсберское соглашение

Руководство компании AT&T было преисполнено решимости превратить *Bell System* в «единственного продавца с практически полной монопольной властью» [8]. Уже к 1913 году компания AT&T стала крупнейшей незаконной монополией. За свое поведение и действия, направленные на ограничение конкуренции, компания часто подвергалась нападкам со стороны Министерства юстиции США. Вейл в ответ на обвинения в нарушении федерального антимонопольного законодательства поручил первому вице-президенту AT&T Натану Кингсбери (*Nathan Corning Kingsbury*, 29.07.1866—25.01.1920), который был видным экономистом, 9 декабря 1913 года написать письмо генеральному прокурору США. В этом письме с датой отправления 13 декабря 1913 г. корпорация соглашалась продать свой контрольный пакет акций телеграфной компании *Western Union*, передать междугородную связь независимым компаниям и телефонным станциям, а также отказаться от дальнейших приобретений независимых телефонных компаний без разрешения Комиссии по торговле между штатами [9].

Письмо из кабинета Кингсбери незамедлительно оказалось в кабинете генерального прокурора, а вскоре после этого и в кабинете президента Вудро Вильсона. Письмо Кингсбери, содержавшее менее 900 слов, все сгладило и произвело благоприятный эффект на Вильсона и его заместителя в Министерстве юстиции. Вильсон по этому поводу сказал [10]: «С каждой неделей у меня все больше и больше складывается впечатление, что бизнесмены страны искренне желают соблюдать закон, и очень приятно, в данном случае, иметь возможность вести дело с ними с полной откровенностью, и иметь возможность показать им, что все, чего мы желаем, так это возможность сотрудничать с ними».

Генеральный прокурор Джеймс С. Макрейнольдс (*James C. McReynolds*, 03.02.1862—24.08.1946, рис. 7) в ответ на письмо Кингсбери написал [10]: «Ваше ведение откровенных переговоров по этим вопросам заставляют поверить: то, что вы предлагаете, будет выполнено добросовестно». На этом антимонопольное расследование было завершено.

Антимонопольные опасения Белого дома были решены практически за одну ночь. Но влияние письма Кингсбери ощущается и сегодня. Отказавшись от антимонопольного дела, администрация Вильсона благословила господство AT&T в телефонной индустрии. В обмен на эту спонсируемую государством монополию AT&T согласилась работать в качестве коммунального предприятия, в конечном итоге предоставляя высококачественные телефонные услуги подавляющему большинству американцев незави-

симо от дохода или географического положения. Обязательства Кингсбери перед президентом Вильсоном позже были формализованы и расширены Конгрессом в виде юридических обязательств, которые до сих пор связывают современных преемников старой AT&T: *Verizon Communications*, *CenturyLink* и новой AT&T.

В 1913 году правительство США признало «принцип Вейла» и заключило с AT&T соглашение, согласно которому *Bell System* должна была подключать к своей сети независимые телефонные компании, а также от-



Рис. 7. Джеймс
С. Макрейнольдс.
1913—1914 гг.

Fig. 7. James C.
McReynolds. 1913–1914

казаться от контроля над телеграфным бизнесом *Western Union* (1910 г.). Заключенное соглашение получило название «Кингсберское соглашение» (англ. *Kingsbury Commitment*) по фамилии Натана Кингсбери.

К этому моменту существовало огромное количество независимых телефонных компаний, чьи сети не были соединены между собой. Из-за этого абоненты разных компаний не могли звонить друг другу. Кингсберское соглашение было направлено на решение этой проблемы. Что еще более важно, это расположило телефонную компанию AT&T к правительству и проложило путь к тому, чтобы она стала санкционированной государством монополией — как в лучшем, так и в худшем смысле этого слова.

В 1934 году правительство США передало AT&T под юрисдикцию только что созданной Федеральной комиссии по связи, и *Bell System* превратилась в законную регулируемую монополию.

Почти 100 лет спустя, с 1 января 1984 года, AT&T была освобождена от своих телефонных компаний-операторов решением Федерального суда. AT&T доказала свою конкурентоспособность, пройдя через серьезные испытания, что позволило ей стать крупнейшей государственной регулируемой монополией в мире.

6. Реорганизация научной деятельности AT&T

В 1906 году, за год до того, как Вейл стал президентом AT&T, главный инженер AT&T Хаммонд Хейс направил президенту компании Фредерику Фишу удручающую служебную записку об усилиях по модернизации и координации использования технологий на уровне операционной компании: «Связь инженерного отдела AT&T с телефонными разработками в

целом неудовлетворительна...». Это он объяснил следующим образом [9, р. 109]: «Наши отношения с управляющими компаниями зависят от личной доброй воли, влияния и престижа, которые исходят от людей, хорошо оснащенных и выполняющих хорошую работу. Однако многие инженеры операционных фирм игнорируют рекомендации и спецификации, которые мы считаем правильными, и заменяют их своими по каждому вопросу. Большинство таких замен являются неправильными и не соответствуют наилучшим разработкам их собственной компании или бизнеса в целом». Хейс, невзирая на это, не решился вырвать власть у местных инженеров.

Вейл оказался другим человеком. После того как Вейл встал у руля и привел в порядок финансы *Bell System*, он начал увеличивать финансовую долю *AT&T* в операционных компаниях, подталкивая их менеджеров к реорганизации по функциональным направлениям. Вейл назначил своим главным операционным директором, тихого, но настойчивого в достижении цели Генри Б. Тайера (*Harry Bates Thayer*, 17.08.1858—03.09.1936), чтобы тот поработал над этой проблемой, рис. 8.

Вейл, озадаченный некоторыми неудачами компании в бизнесе, а также успехом в промежуточный период, связывал неудачи с плохой деятельностью инженеров. Он сомневался в том, что инженеры смогут реально помочь *Bell System*. Вейл, впечатленный успехами главного инженера Нью-Йоркской телефонной компании (*New York Telephone Company*) Джона Дж. Карти (*John Joseph Carty*, 14.04.1861—27.12.1932), заранее решил для реализации своих обширных планов в области инженерии, разработок и исследований, назначить его главным инженером *AT&T*, рис. 9.

Три самых важных краеугольных камня на тот период времени, которые использовались везде, где функционировала телефония, явились творениями Джона Карти. Его изобретение «общей батареи» (*Common Battery*⁶) для подачи рабочего тока от одной батареи центрального офиса к любому количеству соединенных между собой телефонов сделало возможным коммерческое развитие телефонии в городских районах. К 1896



Рис. 8. Генри Б. Тайер.

Fig. 8. Harry B. Thayer

⁶ Первая система с общей батареей (англ. *Common Battery Telephone*) для абонентской телефонной станции была введена в декабре 1893 года в Лексингтоне (*Lexington*), штат Массачусетс, до этого, абонентам требовалась собственная батарея и магнето (ручная магнитоэлектрическая машина). В России система центральной батареи была установлена на Московской бирже и обслуживала 60000 абонентов в 1910 г.

году, телефонная центральная система батарей (*Common Battery*) открыла новую эру.

Его разработка мостового сигнального звонка (рис. 9) с высоким сопротивлением для абонентских подстанций взамен универсального, использовавшегося до сих пор последовательного звонка с низким сопротивлением, убрала преграды на пути широкого распространения телефона в повседневной жизни. Каждый звонивший тогда телефонный аппарат содержал звонок Карти, рис. 9.

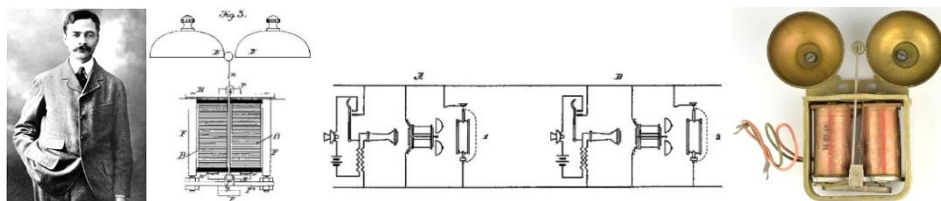


Рис. 9. Главный инженер AT&T Джон Дж. Карти (1907 г.) и его конструкция мостового сигнального звонка (Патент US449106A с приоритетом от 16 августа 1890 г.).

Fig. 9. AT&T Chief Engineer John J. Carty (1907) and his construction of a bridge signal bell (Patent US449106A with priority dated August 16, 1890)

Столь же революционным и носившим более отчетливый научный характер было его открытие того, что основной причиной перекрестных помех между телефонными цепями является электростатический, а не электромагнитный дисбаланс. Это открытие и правила, разработанные Карти для правильного построения смежных телефонных линий, стали использоваться повсеместно [11].

Характерной чертой отдельно взятого из этих достижений является то, что каждое из них явилось прямым и логическим результатом того, что было одним из самых мощных интеллектуальных орудий Карти — его способность отбрасывать несущественное и понимать суть проблемы. Он мог делать с телефонными линиями то же, что Диккенс делал со словами. Его лейтмотив был такой: «Давайте сделаем это правильно, ребята, и тогда нам не будут сниться дурные сны» [12].

Вейл сообщил Хейсу, что его не устраивает состояние инженерных работ, поскольку они обходятся слишком дорого. Компания, как заметил Вейл, очень сильно обременена долгами. В итоге Вейл объявил Хейсу об отставке и немедленной передаче обязанностей главного инженера Карти. Хейсу предложили мизерный оклад, а в придачу — унижение. Все это произошло в начале лета 1907 года, незадолго до переноса штаб-квартиры материнской компании из Бостона в Нью-Йорк. Для Хейса, аристократического джентльмена и ученого, этот эпизод никогда не имел оправдания.

Для него в поступке была бесчеловечная жестокость, которую он не смог забыть. Однако его интерес к телефонии не исчез, несмотря на потрясение.

Летом 1907 года Карти централизовал большую часть инженерных исследований и разработок *Bell System*. Он закрыл лаборатории *Bell* в Бостоне и Чикаго. В результате исследовательские группы *Western Electric* и *AT&T* были объединены в *Western Electric Engineering Department*⁷ в Нью-Йорке. Заведующим физической лабораторией (*Physical Laboratory*) стал Эдвин Колпиттс, ассистент Джорджа А. Кэмпбелла.

Была расширена область деятельности Исследовательского отдела до инженерной практики в операционных компаниях. Помимо этого было приказано производственному подразделению *Western Electric* прекратить принимать заказы на оборудование от региональных компаний. Это делалось для того, чтобы устранить то, что Карти назвал «чрезмерным и нерентабельным разнообразием». Все решения, касающиеся оборудования и операций, должны были приниматься центральным инженерным отделом *AT&T*.

Реорганизация 1907 года привела к тому, что *Western Electric Company* взяла на себя всю инспекционную деятельность, которая ранее выполнялась подразделениями инженерного отдела компании. Сам инженерный отдел в Бостоне резко сократился в размерах и в сентябре 1907 года вместе с исполнительными отделами переехал в Нью-Йорк.

Шаги, предпринятые Вейлом для улучшения финансового положения компании, к счастью, оказались эффективными. Телефонная компания работала при относительно низком психологическом напряжении в течение значительного периода времени, невзирая на критическую общую деловую панику, которая взорвалась на Уолл-стрит в октябре 1907 г.

7. Основополагающее предложение Фрэнку Джеветту

Инженерному отделу компании *AT&T* для решения сложных технических проблем телефонии в этот период времени требовались хорошо подготовленные научные сотрудники. Однажды руководитель небольшой группы этого отдела, доктор Джордж А. Кэмпбелл (*George Ashley Campbell*), посетил профессора Гарри Э. Клиффорда⁸ (*Harry Ellsworth*

⁷ *Western Electric Engineering Department* слился с инженерным отделом *AT&T* 1 января 1925 года, образовав исследовательский центр под названием *Bell Telephone Laboratories, Inc.* Первым президентом этой лаборатории стал Фрэнк Джеветт (1925—1940).

⁸ Гарри Клиффорд считал лекционный метод обучения студентов уступает использованию хорошего текстового материала с обсуждением сложных концепций в классе и решением проблем под руководством преподавателей. Поэтому все лекции по предметам бакалавриата на факультете были заменены разделами декламации, которые читали преподаватели факультета. Такая «замена в большинстве случаев давала удовлетворительные результаты».

Clifford. 21.04.1866—07.07. 1952) в Массачусетском технологическом институте (MIT) с целью ознакомления с только что приобретенным высокочастотным генератором для экспериментальных исследований. В то время, когда Кэмпбелл и Клиффорд вели разговор, мимо них проходил Фрэнк Джеветт⁹ (Frank Baldwin Jewett, 05.09.1879—18.11.1949, рис. 10), преподаватель физики и электротехники. Клиффорд не преминул его представить Кэмпбеллу. Фрэнк Джеветт сразу произвел на него благоприятное впечатление. У Джорджа А. Кэмпбелла мелькнула мысль: а не привлечь ли этого молодого человека к решению вопросов пупинизации телефонных линий и теоретических проблем телефонной связи? Кэмпбелл заинтересовался у Клиффорда о возможности приглашения его в инженерный отдел. Узнав, что у Джеветта контракт с MIT еще на один год, решение вопроса было отложено.



Рис. 10. Фрэнк Джеветт и медаль Эдисона, полученная им в 1928 году.

Fig.10. Frank Jewett and the Edison medal he received in 1928

По прошествии 10—12 месяцев Кэмпбелл поднял вопрос о Джеветте снова, и в результате пригласил того посетить инженерный отдел AT&T в Бостоне. Молодой человек встретился с руководителями инженерного отдела и оставил о себе приятные воспоминания.

Фрэнк Джеветт был прекрасно образован. Он окончил аспирантуру Чикагского университета (*The University of Chicago*) и в 1902 году получил степень доктора философии по физике (*Ph.D*) [13]. Тема его докторской диссертации была предложена известным физиком-экспериментатором А. А. Майкельсоном, а именно соотношению давления и плотности паров натрия при температурах вплоть до точки кипения натрия. В Чикагском университете он

⁹ Фрэнк Джеветт - Президент Академии наук США (1939-1947). В 1928 году награжден AIEE медалью Эдисона (*Edison Medal*) «За вклад в области электрической связи» (*For his contributions to the art of electric communication*).

подружился с Робертом Эндрюсом Миллиkenом (*Robert Andrews Millikan*, 22.03.1868—19.12.1953), в то время молодым преподавателем физики, который познакомил Джеветта с некоторыми последними достижениями в новой области электронной физики. Позже Джеветт использовал эти знания при организации первого исследовательского подразделения *Bell System*.

После этого Джеветт проработал 1 год научным сотрудником у физика экспериментатора Альберта А. Майкельсона, а на следующий год отправился в Массачусетский технологический институт (*MIT*) преподавать физику и электротехнику. В *AT&T* решили взять молодого ученого на работу и назначить ему стартовую зарплату \$1600 в год, что почти в три раза превышало стандартную ставку для студентов колледжа без последипломного образования. В то время это были очень большие деньги, даже для такого человека, как Джеветт, с образованием и с опытом работы.

В конце 1904 года Фрэнк Джеветт начал свою карьеру в *AT&T* как помощник Кэмпбелла. В 1906 году группа Кэмпбелла провела удачные исследования передач по телефонным каналам. Что касается Кэмпбелла, то он больше занимался теоретическими исследованиями, нежели исполнением своих административных обязанностей.

В 1907 году в рамках корпоративной реорганизации Джеветта перевели из Бостона в Нью-Йорк и назначили научным менеджером при главном инженере компании *AT&T* Джоне Дж. Карти.

8. Главный приоритет *AT&T*

В конце 1908 года группа инженеров *AT&T* посетила штат Калифорния, чтобы помочь местным телефонным чиновникам в разработке планов восстановления после землетрясения¹⁰ телефонной инфраструктуры и расширению телефонной станции. Одним из приехавших был инженер по передаче и защите Фрэнк Джеветт.

Первоначальная цель поездки Джеветта заключалась в том, чтобы дать рекомендации инженерам *Pacific Telephone & Telegraph Co.*, как улучшить условия передачи в определенных частях их территории обслуживания, особенно в районе Окленда и на магистралях до Сан-Франциско, а также в районе Лос-Анджелеса — Пасадены. Одной из причин этих проблем была агрессивная конкуренция со стороны местных независимых телефонных компаний. В связи с этим потребовалось улучшение и в системе взимания платы *Pacific Company* за междугородние переговоры.

¹⁰ 18 апреля 1906 года в 5 часов 12 минут утра 370-километровую долину Сан-Андреас, по которой проходит тектонический разлом, и в которой находится Сан-Франциско, сотрясли сильные подземные толчки мощностью 7,8 баллов по шкале Рихтера. Город был разрушен почти до основания.

Прежде чем Джеветт справился с поставленными задачами, в Сан-Франциско прибыли Джон Карти и заводской инженер Банкрофт Герарди (*Bancroft Gherardi*, 06.04.1873—14.08.1941). Они намеревались обсудить с руководителями Pacific Company некоторые изменения в их бюджете на 1909 год, которые были необходимы, ввиду охвата телефонной сетью обширной территории. В это время в 1915 году уже шла подготовка к Всемирной выставке Панама — Тихий океан в парке Бальбоа¹¹ города Сан-Франциско [14]. Заявленная цель выставки состояла в том, чтобы отпраздновать завершение строительства Панамского канала (рис. 11), а также продемонстрировать промышленные возможности восстановленного Сан-Франциско после землетрясения 1906 года. Первоначально выставка была запланирована на 1914 год, но позднее перенесена на 1915 год.



Рис. 11. Республика Панама на карте мира. Карта Панамского канала (1919 г.) и вид одной из его зон.

Fig. 11. Republic of Panama on the world map. Map of the Panama Canal (1919) and view of one of its zones

Во время пребывания в Сан-Франциско Карти чувствовал отсутствие ежедневных деловых телефонных разговоров со своими сотрудниками в Нью-Йорке и как, уроженец Калифорнии, заметил Джеветту с искоркой в глазах, что «был очень впечатлен изоляцией этой части страны». Эта изоляция была очень реальной и угнетающей. Кроме того, большие расстояния между телефонными линиями ассоциированных компаний Тихоокеанского побережья и Среднего Запада вносили ограничение тока при телефонной передаче по наилучшему доступному типу цепи, которое оказывалось значительно меньше своего значения на большей части трансконтинентальной линии.

Трансконтинентальная телефония всегда была целью будущего, и ввиду необходимости ее скорейшей реализации Карти и его сотрудники проводили долгие часы на побережье, изучая проблемы, которые необхо-

¹¹ Парк города Сан-Франциско Бальбоа парк (*Balboa Park*) — назван по имени испанского конкистадора и исследователя, который первым из европейцев в 1513 году увидел восточный берег Тихого океана.

димо было решить, чтобы сделать ее возможной. Успех казался достижимым, и прежде чем группа покинула побережье, президент Вейл, который позже приехал из Нью-Йорка, чтобы присоединиться к ним, заверил руководство выставки в том, что он попытается завершить трансконтинентальную телефонную линию к ее открытию. Ответственность за выполнение этого обещания была возложена в первую очередь на Фрэнка Джеветта. Это было первое крупное предприятие, при осуществлении которого Джеветт продемонстрировал свои способности, что стало характерным для большей части его дальнейшей работы.

В 1908 году Вейл сделал строительство трансконтинентальной телефонной линии главным техническим приоритетом *AT&T*. Перед отъездом из Сан-Франциско Карти публично, еще раз заверил деловых партнеров о намерении *AT&T* завершить трансконтинентальную телефонную линию к открытию Всемирной выставки.

9. Бизнес-план компании *AT&T*

В 1909 году Теодор Вейл представил главный технический приоритет компании в виде бизнес-плана¹². Основной целью программы явилась постройка общенациональной телефонной сети от побережья Атлантического океана до побережья Тихого океана. При этом предполагалась прокладка трансконтинентальной телефонной линии Нью-Йорк — Сан-Франциско, хотя он и знал, что на тот момент не было совершенных технологий для реализации поставленной задачи. Даже с использованием нагрузочных катушек телефонная связь на таких больших расстояниях была невозможна без какого-либо усиления. Поэтому предполагалось привлечение инноваций и сосредоточение расходов на научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы.

Это была амбициозная цель. В то время дальность ведения телефонных разговоров ограничивалась существующими телефонными технологиями. Практика показала, что телефонные линии того времени могли работать без трансляторов (телефонных усилителей сигнала) только когда их длина не превышала расстояние между Нью-Йорком и Денвером, то есть 1600 миль (около 2600 км).

Теодор Вейл провел энергичную рекламную кампанию среди предполагаемых инвесторов. Инвесторы вначале выделили для маркетинга¹³

¹² Бизнес-план — документ, который описывает все основные аспекты будущего предприятия, анализирует все проблемы, с которыми оно может столкнуться, а также определяет способы решения этих проблем.

¹³ Маркетинг — процесс, который начинается с исследования целевого сегмента рынка, для которого собирается работать компания. Маркетологи определяют потенциальный спрос и его размер

\$250000, утверждая, что все и так знают о существовании телефона. Однако Т. Вейл им ответил: «Но не все думают об этом».

Джон Карти хорошо понимал, что для осуществления телефонной связи от атлантического до тихоокеанского побережья США, то есть при длине телефонных линий свыше 3000 миль, требуются ретрансляторы другого типа. Но самый главный его вывод состоял в том, что без научного прорыва в области дальней телефонной связи шансов на успех нет. В связи с этим для достижения необходимых результатов данного предприятия им было инициировано выделение больших денежных средств на исследовательские работы по устройствам, для усиления электрических сигналов в телефонной линии, или «ретрансляторам». Были начаты поиски среди научного и электротехнического сообщества ученых, способных разработать и создать необходимые усиливающие устройства.

Примерно в 1910 году Теодор Вейл в обязанности Фрэнка Джеветта, кроме кураторства инженерных исследований в *Western Electric*, включил и руководство разработками телефонных ретрансляторов.

10. Технологии усиления электрического сигнала к 1909 году

Одним из основных требований к трансконтинентальной линии было наличие удовлетворительного ретранслятора, то есть устройства, которое могло бы принимать речевые сигналы после того, как они были ослаблены при прохождении по линии, и усиливать их для дальнейшей передачи.

Идея подключения к телефонной линии одного или нескольких ретрансляторов, или реле, как их называли в начале, для усиления ослабленного телефонного тока от местного источника энергии была почти такой же старой, как и сам телефон. Было изобретено несколько таких устройств, как в *Bell System*, так и вне ее, но ни одно из них не было удовлетворительным из-за нечеткой работы. Еще в 1896 году Джон Стоун Стоун, восхищенный недавним изобретением рентгеновской трубки, предпринял исследования и эксперименты по использованию рентгеновских и аналогичных трубок в качестве телефонного ретранслятора. Подобные исследования по использованию технологии ртутной дуги в качестве телефонного усилителя, изобретенной Питером Купером Хьюиттом (*Peter Cooper Hewitt*), были начаты в 1904 году. В 1906—1907 годах Г. А. Кэмпбелл (*G. A. Campbell*) и Т. К. Хебб (*T. C. Hebb*) изучали с аналогичной целью характеристики отрицательного сопротивления электрических устройств.

Только в 1903 году Х. Э. Шриве (*H. E. Shreeve*), сотрудник из отдела Хейса, разработал телефонный ретранслятор механического типа, который можно было использовать в коммерческих целях. В 1904 году, когда Джеветт присоединился к *Bell System*, было проведено первое успешное испытание этого ретранслятора [15]. Он широко использовался после 1904 года, невзирая на то, что имел серьезные недостатки, присущие устройствам подобного типа. Этот факт Джеветт отметил в служебной записке, представленной в октябре 1919 г. Бэнкрофту Герарди перед совместным заседанием *AIEE* и *IRE* [16]: «Усиление в значительной степени зависит от амплитуды и частоты входного сигнала, поэтому не удалось их наилучшим образом адаптировать для использования в тандеме, хотя они успешно использовались на телефонных линиях, длина которых не требовала более трех ретрансляционных станций механического типа».

На тот момент времени телефонные усилители или трансляционные усилители, которые в *AT&T* называли «ретрансляторы» (англ. *repeaters*), еще не стали составляющей частью телефонной системы. Подключение к телефонной линии двух и более существовавших тогда механических ретрансляторов приводило к электрическому эху из-за затухания электрического сигнала. *Bell System* к 1907 году, несмотря на указанные недостатки механических ретрансляторов, установила на линиях 61 такой аппарат. Модель ретранслятора 1912 года показана на рис. 12. Эта модель, никогда не считалась полностью совершенной, но использовалась за неимением лучшего, пока в 1915 году ее не заменило устройство на электронном вакуумном триоде.

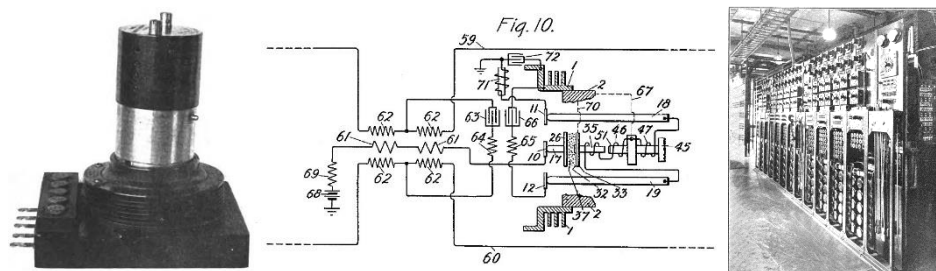


Рис. 12. Общий вид электромеханического ретранслятора типа 3А (слева) и в центре его устройство (рисунок из патента Шриве US1156636 с приоритетом от 25 мая 1911 г.). Справа показаны стойки с блоками ретрансляторов типа 3А на магистральной телефонной линии AT&T Бостон — Вашингтон в коммутационном центре Провиденс, штат Род-Айленд, в 1919 году.

Fig. 12. General view of the type 3A electromechanical repeater (left) and its device in the center (drawing from US1156636 patent Shreeve with priority dated May 25, 1911). Shown at right are racks of type 3A repeater units on the AT&T Boston–Washington trunk telephone line at the Providence, Rhode Island switching center in 1919

Разработка ретранслятора имела стратегическое значение. Быстрый рост новых беспроводных коммуникаций казался угрозой для проводной связи, а ретрансляторы давали *Bell System* возможность контролировать радиотехнологии, для которых требовались аналогичные типы усилителей.

11. Размышления Фрэнка Джеветта о путях решения возникших проблем

Телефонные линии можно было удлинять только до тех пор, пока величина возросших в них потерь не сравняется с усилением трех ретрансляторов. Серьезность этого ограничения становится очевидной, если в трансконтинентальной сети использовать до 400 ретрансляторов в тандеме. Джеветт давно признал, что было бы экономически нецелесообразно пытаться построить телефонную инфраструктуру до Сан-Франциско без совершенно нового типа ретранслятора.

Джеветт проанализировал проблему и понял, что затухание электрического сигнала в телефонной линии связано с медлительностью вибрирующих элементов механических ретрансляторов. В служебной записке от 10 декабря 1910 года он писал [17]: «...Я более чем когда-либо впечатлен очень большой потребностью в создании удовлетворительного ретранслятора для работы на загруженных линиях, если мы хотим создать действительно универсальную услугу на североамериканском континенте на платной основе, а также на основе истинной экономии. ...После предварительного изучения ситуации я чувствую себя очень уверенно в том, что если этот вопрос с ретранслятором будет решен надлежащим образом компетентными людьми, работающими с полной координацией и под соответствующим руководством, то желаемые результаты могут быть получены при относительно небольших затратах. Однако я чувствую, что для достижения этого результата *необходимо будет нанять квалифицированных физиков*, которые знакомы с последними достижениями в области молекулярной физики и которые способны оценить такие дальнейшие достижения, которые постоянно делаются, а также что работа должна тщательно контролироваться кем-то, кто полностью понимает требования».

Вспоминая свои исследования с пучками электронов в высоком вакууме, которые он проводил с 1900 по 1902 год со своим другом Робертом Миллиkenом в Чикагском университете, Ф. Джеветт утвердился в мысли использовать в усилителях электрического сигнала в телефонной линии в качестве вибрирующего элемента электронный пучок [18].

В апреле 1911 года Джеветт более конкретно изложил план решения проблемы репитера. Для его реализации необходимо было провести общее

исследование по определению соответствующих характеристик наилучшего телефонного ретранслятора, его схемы и общие принципы работы терминала и линии, которые должны быть соблюдены, чтобы сделать этот ретранслятор способным работать как на загруженных, так и на незагруженных линиях. Это исследование, кроме указанного, должно включать [17, р. 372, 373]:

1. Полное изучение характеристик существующего ретранслятора типа приемник-передатчик [*Shreeve*] с целью определения возможности улучшения работы устройства, а также установления на предмет того, как повлияли внесенные изменения в элемент ретранслятора, его схему или в условия линии на его пригодность для общего использования на загруженных линиях.

2. Изучение других возможных конструкций повторителей, особенно базирующихся на законах из области молекулярной физики. Определение характеристик прохождения электричества через газы и пары, что по-видимому, позволяет создать телефонный усилитель, который будет пригоден для использования на загруженных или ненагруженных линиях и который даст желаемое усиление без значительных искажений.

3. Математическое и лабораторное исследование схем двухстороннего ретранслятора с целью определения наилучшей схемы ретрансляционных цепей, которые могут быть использованы в сочетании с любым определенным элементом ретранслятора и любым типом загруженной линии.

4. Математическое и экспериментальное исследование характеристик загруженной линии на существующей установке и определение того, какие изменения, если таковые возможны, необходимо внести в конструкцию и установку загрузочных катушек и кабелей, чтобы сделать загруженные линии пригодными для применения телефонных ретрансляторов.

В 1910 году Фрэнк Джеветт, работавший тогда инженером в лабораториях *Western Electric* в Нью-Йорке, отметил проблему создания телефонного ретранслятора в своем хорошо известном письме профессору Роберту А. Милликену из Чикагского университета. В письме д-ра Джеветта сказано [18]: «Такое устройство для отслеживания всех мельчайших изменений человеческого голоса, очевидно, должно быть практически безынерционным, и я думаю, что мы, по всей видимости, получим такой безынерционный движущийся элемент, если применим каким-то образом исключительно электронные потоки, с которыми вы работали в физике последние десять лет».

Роберт Милликен экспериментировал с катодными трубками разной конструкции в исследованиях с заряженными капельками масла для измерения заряда электрона, рис. 6.11 [20]. В 1923 году за эти исследования, а

также за проверку эйнштейновской корпускулярной теории света он 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» [19].

12. Организация исследовательской группы

Начиная с зимы 1910—1911 годов была отобрана небольшая группа ученых и начаты исследования под общим руководством доктора Фрэнка Джеветта. Сотрудники, которые должны были заниматься исследованием проблем, связанных с установкой на линиях ретрансляторов, располагались в телефонной компании в отделе Джеветта.

В 1911 году для разработки репитеров трансконтинентальной связи в производственном подразделении *West Electric Company*¹⁴ была образована исследовательская группа (*Research Group*), которую возглавил Эдвин Колпиттс. Собранные таким образом ученые стали в будущем ядром исследовательского отдела *Bell Telephone Laboratories*.



Рис. 13. Гарольд де Форест Арнольд.
1933 г.

Fig. 13. Harold De Forest
Arnold. 1933

Расширение объема научно-исследовательских работ компании вызвало потребность в привлечении к их исполнению новых сотрудников с соответствующей квалификацией. Поскольку никто из сотрудников компании не имел достаточных знаний в области молекулярной физики, то летом 1910 года Фрэнк Джеветт обратился за помощью к своему другу Роберту Милликену, с просьбой порекомендовать ему одного из лучших своих студентов, обладающего знаниями в области формирующейся новой науке «электронике» и способного сделать экспериментальную конструкцию телефонного усилителя электрических сигналов для проектируемой трансконтинентальной линии телефонной системы *Bell*. В ответ Р. Милликен

настоятельно порекомендовал своего ученика Гарольда де Фореста Арнольда (*Harold De Forest Arnold*, 03.09.1883—10.07.1933), который недавно получил докторскую степень (*Ph.D.*) по физике в Университете Чикаго,

¹⁴ Американская электротехническая компания *Western Electric Company* (иногда сокращенно *WE* или *WECO*) была в составе *AT&T* с 1881 по 1995 гг.

рис. 6.12 [20]. Милликен особо отметил способности Арнольда к проведению научных исследований и его сильный характер. Арнольд стал первым ученым, который был включен в исследовательскую группу.

Джеветт понимал, что успех разработки репитера *Bell System* в ближайшие годы будет в значительной степени зависеть от того, какие люди будут привлечены в *Bell System* для выполнения ее программы. Уже в 1905 году он заложил основу для блестящего послужного списка в качестве агента по подбору персонала для сотрудников штаб-квартиры, и многие из людей, которых он привел в *Bell System*, внесли заметный вклад в ее технический и материальный рост. Его способность выбирать людей, которые могли умело направлять и координировать делегированную им работу, в значительной степени способствовала обеспечению успеха в последующие годы, когда под его непосредственным руководством находился только широкий круг вопросов общей политики.

Джеветт пригласил для работы в исследовательской группе Джона Миллса (*John A. Mills*, 1880—1948), с которым он учился в аспирантуре у А. А. Майкельсона. Миллс восемь лет был связан с различными учебными заведениями, в частности, Западным резервным университетом (*Western Reserve University*), MIT и колледжем Колорадо (*Colorado College*). В этот период времени у него развился талант к преподаванию, а вместе с ним и объективное отношение к новым идеям. В 1908 году, работая в Западном резервном университете, он написал в соавторстве с Р. Миллиkenом учебник «Электрический звук и свет»¹⁵ [21]. Миллс был одним из первых, кто признал, что явление эха может влиять на качество передачи речи. Базовый патент US1434790A на подавители эха зарегистрирован на его имя. С учреждением 1 февраля 1925 года *Bell Telephone Laboratories* Джон Миллс был назначен директором издательства. Он взял на себя некоторые функции, такие как информационное обеспечение ассоциированных компаний и общественности, Исторического музея *Bell System*, сбор комментариев к техническим статьям и их окончательное разрешение на публикацию.

Роберт Милликен, будучи консультантом AT&T по дальней телефонной связи, продолжал оказывать помощь компании в привлечении

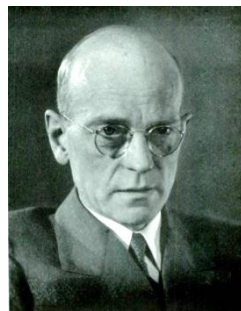


Рис. 14. Джон Миллс.
1945 г.

Fig. 14. John Mills.
1945

¹⁵ Robert Andrews Millikan and John Mills. *Electricity Sound and Light*. Boston, New York. Ginn & Co. First Edition. January 1, 1908. 389 p. Этот учебник вместе с раннее изданным в 1902 г. пособием Роберта Милликена «Механика, Молекулярная физика и теплота» составили годичный курс общей физики.

квалифицированных ученых для работы в исследовательской группе. Еще в период работы над учебниками физики Милликен занимался экспериментальным исследованием фотоэлектрического эффекта. Полученные им результаты противоречили теории этого явления, изложенной в статье Альберта Эйнштейна¹⁶, в которой была сделана попытка объяснить некоторые особенности фотоэлектрического эффекта с помощью гипотезы о том, что свет состоит из частиц, которые он назвал фотонами. Милликен был убежден, что эта теория неверна, так как к этому времени существовало большое количество доказательств в пользу волновой природы света. Гипотеза Эйнштейна была обобщением более ранней, выдвинутой Максом Планком гипотезы о том, что энергия колеблющегося атома излучается порциями, или квантами. Поскольку идея Эйнштейна противоречила общепринятому представлению о свете как о волне (волновая природа света была подтверждена убедительными экспериментальными данными), в нее не поверило большинство физиков, рис. 15. Сам Планк оказался одним из самых стойких критиков идеи «кванта света», в то время как Милликен отклонил гипотезу Эйнштейна как «опрямительную, чтобы не сказать глупую гипотезу» и быстро приступил к работе над тем, чтобы экспериментально показать Эйнштейну ошибочность его утверждений. Милликен стал «общепризнанным противником световых квантов».



Рис. 15. Встреча физиков, лауреатов Нобелевской премии Вальтера Нернста, Альберта Эйнштейна, Макса Планка, Роберта Милликена и Макса фон Лауэ в Берлине. 1 ноября 1931 г.

Fig. 15. Meeting between the physicists Nobel Prize Winners Walther Nernst, Albert Einstein, Max Planck, Robert Millikan, and Max von Laue in Berlin. November 1, 1931

Милликену было около сорока лет, когда он приехал в Германию, чтобы прочитать лекцию о наблюдавшихся им высоких скоростях излучения, которые находились в прямом противоречии с электронной теорией и для которых не нашлось адекватного объяснения. Лекция вызвала некоторый переполох в научном мире. Он посетил Королевскую технологическую школу (*Royal School of Technology*) в Дрездене. Познакомить Милли-

¹⁶ Einstein A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*. 1905. Band 17. S. 132–148. Русский перевод в сборнике: «Собрание научных трудов». Под редакцией И. Е. Тамма. М.: Наука, 1966, т. 3. С. 92. Эйнштейн А. «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света».

кена с лабораториями школы было поручено молодому ассистенту физике выходцу из Южно-Африканской республики Хендрику ван дер Бейлю (*Hendrik Johannes van der Bijl*, 23.11.1887—02.12.1948). Обходя лаборатории, они обсудили свои исследования и обнаружили, что определение поля рассеяния Ван дер Бейлом не только подтвердило выводы электронной теории, но и правильно объяснило кажущиеся высокие скорости¹⁷, которые наблюдал профессор Милликен.

После этого Милликен превратился из противника фотоэлектрической теории Эйнштейна в человека, который в итоге доказал правильность уравнения Эйнштейна. Профессор Милликен был так впечатлен умом молодого человека, что по возвращению в Соединенные Штаты он посоветовал компании *Western Electric* (Нью-Йорк) нанять серьезного южноафриканца Ван дер Бейла для исследования вакуумного триода, который был изобретен Ли де Форестом и только начал применяться в быстро развивающейся отрасли радио. Ван дер Бейл принял предложение о работе, рис. 16.

В течение 1913 года политическая ситуация в Германии становилась все более тревожной, и Ван дер Бейл 20 марта написал письмо профессору Милликану с напоминанием о сделанном предложении. 28 мая Колпиттс написал в Дрезден, предложив Ван дер Бейлу навестить их в Нью-Йорке, чтобы узнать, не захочет ли он присоединиться к их группе промышленных исследований. К тому времени, когда письмо дошло до Германии, Ван дер Бейл уже уехал в Чикаго. В июле Джеветт познакомился с Ван дер Бейлом в Чикаго и предложил ему работу в их исследовательском отделе при стартовой зарплате в 36 долларов в неделю. Ван дер Бейл провел некоторое время в отпуске, прежде чем присоединиться в сентябре 1913 года к лаборатории *Western Electric* в Нью-Йорке [22]. Его исследования аудиона де Фореста при содействии Гарольда Арнольда привели к разработке и установке первого лампового ретранслятора на телефонной линии Нью-Йорк — Сан-Франциско.

Кроме рассмотренных ученых, привлеченных к работе в исследовательской группе Эдвина Колпиттса, были и другие, которые внесли свой



Рис. 16. Хендрик ван дер Бейл, ассистент физики. Дрезден, 1912 г.

Fig. 16. Hendrik van der Bijl physics assistant. Dresden. 1912

¹⁷ В апреле 1913 года Ван дер Бейл опубликовал статью о проведенном им в Дрездене исследовании фотоэлектрического эффекта под названием «Определение начальных энергий фотоэлектрически освобожденных электронов» (нем. Zur Bestimmung der Erstenergien lichtelektrisch ausgelöster Elektronen) [23].

посильный вклад в реализацию проекта трансконтинентальной телефонной линии Нью-Йорк — Сан-Франциско в 1915 году.

В 1913 году Милликен стал консультантом по проблемам электронных ламп исследовательского отдела *Western Electric Company*. Милликен сыграл большую роль в разработке современных электронных ламп компанией *Western Electric* не только привлечением в ряды ее исследовательской группы своих талантливых учеников, но и своими фундаментальными экспериментальными исследованиями фотоэлектрического эффекта и измерения величины электрического заряда электрона.

13. Заключение

В начале 20 века *Bell System* для снижения риска и обеспечения устойчивости бизнеса использовала государственное субсидирование инноваций. Под руководством Теодора Н. Вейла компания *Bell* финансировала научные исследования за счет возмещения затрат на основе ставок, что было разрешено постановлением комиссии, главным образом на уровне штата. Хотя основной целью комиссионного регулирования была защита общества путем ограничения рынка и политической власти крупных монополий. Компания *Bell* умело приспособилась к его требованиям, чтобы обеспечить богатый источник финансирования научных исследований. В конечном итоге это позволило провести перестройку научно-технической деятельности *Bell System*, которая способствовала привлечению инноваций и сосредоточению расходов на научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы. В 1911 году в *West Electric Company* были созданы условия для организации исследовательской группы под руководством Эдвина Колпиттса, в которую вошли лучшие специалисты. Оснащение для исследовательских работ было осуществлено на самом высоком уровне. Благодаря этому были созданы условия для разработки телефонного лампового репитера, которые позволили во второе десятилетие 20 века претворить в реальность прокладку трансконтинентальной телефонной линии Нью-Йорк — Сан-Франциско.

Интересно отметить, почему концепция безынерционного электронного усилителя потребовала так много времени, прежде чем ее начали развивать другие исследователи. Джордж А. Кэмпбелл пришел к этой необходимости еще в 1907 году. Последовавшая депрессия того года помешала активной работе над этой концепцией. Та же самая депрессия пришла в Англию, и остановила в 1908 году разработку британских ламп на Исследовательской станции Почтового отделения. К счастью, финансовые ресурсы, которыми располагал, к примеру, австрийский физик Роберт фон

Либен, не ограничились его усилия, и он разработал газонаполненный парами ртути триод.

Bell System вышла на лидирующие позиции в телефонном бизнесе благодаря привлечению к выполнению проекта требуемых финансов, талантливых ученых, инженеров, и инноваций.

Список литературы

1. Federal Communications Commission. Proposed Report, Telephone Investigation (Pursuant to Public Resolution No. 8, 74th Congress). Washington : United States Government Printing Office, 1938. P. 204.
2. Annual report from Hammond V. Hayes to President Hudson, dated Mar. 7, 1892. P. 2, 3.
3. Selected papers of great American physicists. Henry Augustus Rowland 1848—1901. URL: <https://history.aip.org/exhibits/gap/Rowland/Rowland.html> (12.07.2022).
4. Hoddeson L. The Emergence of Basic Research in the Bell Telephone System, 1875—1915 // Technology and Culture. July 1981. Vol. 22, no. 3. P. 524.
5. Jewett F. B. Utilizing the Results of Fundamental Research in the Communications Field // Bell Telephone Quarterly. April 1932. Vol. 11, no. 2. P. 143—161.
6. Shaw T. The conquest of distance by wire telephony // The Bell System Technical Journal. October 1944. Vol. 23, no. 4. P. 348.
7. Wu Tim. How Theodore Vail Built the AT&T Monopoly. URL: <https://slate.com/technology/2010/11/how-theodore-vail-built-the-at-t-monopoly.html> (12.07.2022).
8. Милинд Л. Абсолютное оружие. Как убить конкуренцию : захват и удержание рынка. Питер ; Коммерсантъ, 2009. 224 с.
9. Calambos L. Theodore N. Vail and the Role of Innovation in the Modern Bell System // The Business History review. Vol. 66, no. 1. P. 103.
10. Fung B. This 100-year-old deal birthed the modern phone system. And it's all about. URL: <https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2013/12/19/this-100-year-old-deal-birthed-the-modern-phone-system-and-its-all-about-to-end/> (12.07.2022).
11. Carty. J. J. Inductive disturbances in telephone circuits // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Mar. 17, 1891. Vol. 8. P. 100—109.
12. Biography of John Joseph Carty. URL: <https://nitum.wordpress.com/2012/10/01/biography-of-john-joseph-carty/> (12.07.2022).
13. Brittain J. E. Electrical Engineering Hall of Fame : Frank B. Jewett // Proceedings of the IEEE. Vol. 95, no. 2. P. 453—455.
14. Jewett F. B. Biographical memoir of John Joseph Carty 1861—1932. Presented to the Academy at the Autumn meeting, 1936. P. 77.
15. Hill R. B., Shaw T. Hammond V. Hayes : 1860—1947 // Bell telephone magazine. Autumn 1947. P. 165.
16. Buckley O. E. Frank Baldwin Jewett 1879—1949. A Biographical Memoir. Washington : National Academy of Sciences, 1952. P. 245.
17. Shaw T. The conquest of distance by wire telephony // The Bell System Technical Journal. October 1944. Vol. 23, no. 4. P. 371.
18. The History of Engineering and Science in the Bell System. The Early Years (1875—1925). Vol. I. By M. D. Fagen, Ed. New York : Bell Telephone Laboratories, Inc., 1975. P. 258.
19. Милликен Р. Э. Лауреаты Нобелевской премии. Энциклопедия. В двух томах. Том 2. М—Я. Пер. с англ. М. : Прогресс, 1992. С. 81.

20. Harold De Forest Arnold // Review of Scientific Instruments. 1933. Vol. 4, iss. 8. P. 421.
21. Findley P. B. John Mills // Bell Laboratories Record. May 1945. Vol. 23, no. 5. P. 165—167.
22. Vermeulen D. J. The Remarkable Dr. Hendrik van der Bijl // Proceedings of the IEEE. December 1998. Vol. 86, no. 12. P. 2445—2454.
23. Van der Bijl H. J. Zur Bestimmung der Erstenergien lichtelektrisch ausgelöster Elektronen // Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft. Apr. 1913. S. 330—347.

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.

Choice of Development Trend of Bell System at the Beginning of the 20th Century

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: May 22, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The choice of the development trend of the Bell System at the beginning of the 20th century in the conditions of fierce competition in the telephone market and the economic crisis of 1907 in the USA is studied. It shows in detail the restructuring of Bell's scientific and technical activities, which contributed to attracting innovation and focusing spending on research, development and technological work. This made it possible in the future to create conditions for the development of a telephone tube repeater and to begin laying a transcontinental telephone line from New York to San Francisco. It is noted that the company's emergence as a leader in the telephone business is largely due to the involvement of talented scientists and engineers in the project.*

Keywords: *Bell System, AT&T, economic crisis of 1907, Hammond V. Hayes, John Joseph Carty, Frank B. Jewett, repeater, New York – San Francisco telephone line, Colpitts research group.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Choice of Development Trend of Bell System at the Beginning of the 20th Century," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 395–427, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.30. (In Russ.).

References

- [1] *Federal Communications Commission. Proposed Report, Telephone Investigation (Pursuant to Public Resolution No. 8, 74th Congress).* Washington: United States Government Printing Office, p. 204, 1938.
- [2] *Annual report from Hammond V. Hayes to President Hudson, dated Mar. 7, 1892.*
- [3] *Selected papers of great American physicists. Henry Augustus Rowland 1848–1901.* URL: <https://history.aip.org/exhibits/gap/Rowland/Rowland.html> (12.07.2022).
- [4] L. Hoddeson, "The Emergence of Basic Research in the Bell Telephone System, 1875–1915," *Technology and Culture*, vol. 22, no. 3, p. 512, Jul. 1981, doi: 10.2307/3104388.
- [5] F. B. Jewett, "Utilizing the Results of Fundamental Research in the Communications Field," *Bell Telephone Quarterly*, vol. 11, no. 2, pp. 143–161, April 1932.
- [6] T. Shaw, "The conquest of distance by wire telephony," *The Bell System Technical Journal*, vol. 23, no. 4, p. 348, October 1944.
- [7] Wu Tim. *How Theodore Vail Built the AT&T Monopoly.* URL: <https://slate.com/technology/2010/11/how-theodore-vail-built-the-at-t-monopoly.html> (12.07.2022).

- [8] M. M. Lele *Monopoly rules: how to find, capture, and control the most lucrative markets in any business*, New York: Crown Business, 2005.
- [9] L. Galambos, "Theodore N. Vail and the Role of Innovation in the Modern Bell System," *Business History Review*, vol. 66, no. 1, pp. 95–126, 1992, doi: 10.2307/3117054.
- [10] B. Fung, *This 100-year-old deal birthed the modern phone system. And it's all about.* URL: <https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2013/12/19/this-100-year-old-deal-birthed-the-modern-phone-system-and-its-all-about-to-end/> (12.07.2022).
- [11] J. J. Carty, "Inductive Disturbances in Telephone Circuits," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. VIII, no. 1, pp. 99–126, Jan. 1891, doi: 10.1109/t-aiee.1891.5570139.
- [12] *Biography of John Joseph Carty*. URL: <https://nitum.wordpress.com/2012/10/01/biography-of-john-joseph-carty/> (12.07.2022).
- [13] J. E. Brittain, "Electrical Engineering Hall of Fame: Frank B. Jewett," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 2, pp. 453–455, Feb. 2007, doi: 10.1109/jproc.2006.888371.
- [14] F. B. Jewett, *Biographical memoir of John Joseph Carty. 1861–1932*. Presented to the Academy at the Autumn meeting, p. 77, 1936.
- [15] R. B. Hill and T. Shaw, "Hammond V. Hayes: 1860–1947," *Bell telephone magazine*, p. 165, Autumn 1947.
- [16] O. E. Buckley, *Frank Baldwin Jewett 1879–1949. A Biographical Memoir*. Washington: National Academy of Sciences, p. 245, 1952.
- [17] T. Shaw, "The Conquest of Distance by Wire Telephony," *Bell System Technical Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 337–421, October 1944.
- [18] *The History of Engineering and Science in the Bell System. The Early Years (1875–1925)*. Vol. I. By M. D. Fagen, Ed. New York: Bell Telephone Laboratories, Inc., 1975.
- [19] R. A. Millikan, *Nobel Prize Winners. Encyclopedia*. Vol. 2. Moscow: Progress, 1992.
- [20] "Harold DeForest Arnold," *Review of Scientific Instruments*, vol. 4, no. 8, pp. 421–421, Aug. 1933, doi: 10.1063/1.1749162.
- [21] P. B. Findley, "John Mills," *Bell Laboratories Record*, vol. 23, no. 5, p. 165–167, May 1945.
- [22] D. J. Vermeulen, "The remarkable Dr. Hendrik van der Bijl," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 12, pp. 2445–2454, 1998, doi: 10.1109/5.735450.
- [23] H. J. Van der Bijl, "Zur Bestimmung der Erstenergien lichtelektrisch ausgelöster Elektronen," *Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft*, s. 330–347, Apr. 1913.

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, № 3, 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.

Подписано к печати 05.06.2022. Заказ 2201562. Дата выхода в свет: 11.09.2022. Тираж: 50 экз.
Свободная цена. Формат 64×90/16. Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 7,65
