
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит шесть раз в год

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований,
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники

Редакционная коллегия

Л. М. Лыньков (зам. главного редактора),
В. Р. Степицкий (зам. главного редактора),
О. В. Бойправ (ответственный секретарь редколлегии),
М. П. Багура, В. Е. Борисенко, М. Г. Гасанов, С. В. Козлов,
В. А. Лабунов, Ю. В. Писецкий, А. С. Сигов,
А. Г. Смирнов, М. М. Татур, В. Ю. Цветков

Редакционный совет

И. И. Абрамов, В. Е. Агабеков, И. С. Азаров, А. И. Белоус, Н. В. Гапоненко,
С. В. Гапоненко, В. В. Голенков, В. Ф. Голиков, А. Л. Гурский, А. П. Достанко,
В. А. Емельянов, А. А. Иванюк, Ф. Ф. Комаров, В. К. Конопелько, А. П. Кузнецов,
А. А. Кураев, В. И. Курмашев, В. Л. Ланин, Н. И. Листопад, В. Е. Матюшков,
Ф. И. Пантелеенко, В. А. Пилипенко, С. Л. Прищепа, Н. К. Толочко,
А. А. Хмыль, В. В. Цегельник, Г. П. Яблонский, В. Н. Ярмолик

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Лазарук С. К., Бондаренко В. П., Борисенко В. Е., Гапоненко Н. В., Горох Г. Г., Лешок А. А., Мигас Д. Б., Чубенко Е. Б. Перспективные оптические и электронные межсоединения элементов интегральных микросхем.....	7
Достанко А. П., Мадвейко С. И., Телеш Е. В., Мельников С. Н., Завадский С. М., Голосов Д. А. Ионно-плазменные системы в технологии тонких пленок.....	20
Козлов С. В., Ковалевич Д. А., Листопад Н. И. Основные результаты и направления исследований по созданию антенных систем перспективных радиоэлектронных средств	32

Богуш В. А., Лыньков Л. М., Насонова Н. В., Прищепа С. Л., Белоусова Е. С., Бойправ О. В., Давыдов Г. В., Попов В. А., Потапович А. В., Пухир Г. А. Исследования и разработки в области создания материалов, технологий и средств обеспечения безопасности.....	42
Лихачёв Д. С., Ма Ц., Петровский Н. А., Азаров И. С., Цветков В. Ю. Перспективные результаты исследований и разработки в области обработки изображений и речевых сигналов	55
Голенков В. В., Гулякина Н. А., Ивашенко В. П., Шункевич Д. В. Интеллектуальные компьютерные системы нового поколения и комплексная технология их разработки, применения и модернизации	70
Мордачев В. И., Свистунов А. С., Синькевич Е. В. Электромагнитная безопасность систем мобильной связи 4G/5G.....	80
Гаврилюк В. С., Дежкунов Н. В., Котухов А. В., Колтович В. А., Минчук В. С., Федоринчик М. П., Курлюк Е. А. Исследование акустической кавитации: результаты, практическая реализация и перспективы развития	92
Бондарик В. М., Вашкевич М. И., Давыдов М. В., Давыдова Н. С., Зельманский О. Б., Камлач П. В., Меженная М. М., Осипов А. Н. Методы проектирования приборов и систем медицинской электроники.....	105
Гусинский А. В. Перспективные результаты исследований и разработки в области СВЧ-технологий.....	116
Лабунов В. А. Расширение возможностей микроэлектроники с помощью технологий радиофотоники.....	126

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Подписано в печать 05.03.2024. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 15,58. Уч.-изд. л. 16,0. Тираж 95 экз. Заказ 21.

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 329а, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-41. doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 24.12.2020.
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

Учредитель – учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Индекс для индивидуальной подписки 00787. Индекс для ведомственной подписки 007872

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2024

DOKLADY BGUIR

Published 6 times a year

The journal is being published since January, 2003

The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. No 1087

The journal is included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index

Editor-in-Chief

Vadim Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Lazarouk S. K., Bondarenko V. P., Borisenko V. E., Gaponenko N. V., Gorokh G. G., Leshok A. A., Migas D. B., Chubenko E. B. Perspective Optical and Electronic Interconnects of Integrated Circuit Elements	7
Dostanko A. P., Madveyko S. I., Telesh E. V., Melnikov S. N., Zavadski S. M., Golosov D. A. Plasma Systems in Thin Film Technology	20
Kozlov S. V., Kovalevich D. A., Listopad N. I. Main Results and Directions of Research on the Creation of Antenna Systems for Advanced Radio-Electronic Equipment	32
Bogush V. A., Lynkou L. M., Nasonova N. V., Prischepa S. L., Belousova E. S., Boiprav O. V., Davydau H. V., Papou V. A., Patapovich A. V., Pukhir H. A. Research and Development in the Field of Creating Materials, Technologies and Safety Equipment	42
Likhachov D. S., J. Ma, Petrovsky N. A., Azarov I. S., Tsviatkou V. Yu. Promising Research and Development Results in the Field of Image and Speech Signal Processing	55
Golenkov V. V., Gulyakina N. A., Ivashenko V. P., Shunkevich D. V. Intelligent Computer Systems of New Generation and Complex Technology of Their Development, Application and Modernization	70
Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications	80

Gavriluk V. S., Dezhkunov N. V., Kotukhov A. V., Koltovich V. A., Minchuk V. S., Fedorinchik M. P., Kurliuk E. A. Research of Acoustic Cavitation: Results, Practical Implementation and Development Prospects.....	92
Bandaryk V. M., Vashkevich M. I., Davydov M. V., Davydova N. S., Zelmanski O. B., Kamlach P. V., Mezhennaya M. M., Osipov A. N. Methods for Designing Devices and Systems of Medical Electronics	105
Gusinsky A. V. Promising Research Results and Development in the Field of Microwave Technology	116
Labunov V. A. Microelectronics Capabilities Expanding Using Radiophotonics Technology	126

Responsible Secretary T. Mironenka

Signed for printing 05.03.2024. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.
Ed.-pr. l. 15,58. Ed.-ed. l. 16,0. Edition 95 copies. Order 21.

Editorial Address: P. Brovki St., 6, Off. 329a, Minsk, 220013, Republic of Belarus
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
Tel.: +375 17 293-88-41. doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

Printed in BSUIR. License LP No 02330/264 from 24.12.2020.
220013, Minsk, P. Brovki St., 6

Founder – Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”
Index for individual subscription 00787. Index for departmental subscription 007872

*К 60-летию
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники*



15 марта 2024 года отмечает свое 60-летие одно из ведущих учреждений образования Республики Беларусь – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР).

Сегодня БГУИР – это крупный образовательный и научный центр, который вносит существенный вклад в социально-экономическое развитие страны. В основу организации и развития образовательной и научно-исследовательской деятельности заложен принцип ориентации на конечный результат. Это касается подготовки инженеров и научных кадров высшей квалификации, а также создания образцов современной техники и передовых технологий, что невозможно без новых научных результатов.

Имея статус научной организации и мощный кадровый состав, включающий более 700 преподавателей и научных работников, в том числе двух академиков и двух членов-корреспондентов Национальной академии наук Беларуси, 43 доктора и 259 кандидатов наук, БГУИР проводит научные исследования и создает востребованные разработки в самых передовых областях науки и технологий: радиоэлектронике и радиолокации, электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, микро-, нано- и оптоэлектронике, физике ультразвука, информационной безопасности и др. В числе зарубежных партнеров – крупнейшие университеты, научные организации и промышленные корпорации России, Китая, Индии, Вьетнама и других стран. На базе университета функционируют две отраслевые лаборатории и три международных центра.

В данном выпуске журнала представлены статьи ведущих ученых университета, приуроченные к 60-летию БГУИР и отражающие наиболее значимые результаты по основным направлениям научной деятельности вуза.

Искренне благодарю коллектив университета и наших партнеров за целенаправленную работу, высокий уровень квалификации и профессионализма, умение мыслить творчески и работать с полной отдачей сил!

Уверен, что совместная работа позволит достигать новых научных успехов, способствовать развитию научных школ БГУИР.

Доктор физико-математических наук,
профессор, ректор,
главный редактор
журнала «Доклады БГУИР»



В. А. Богуш



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-7-19>

Оригинальная статья

Original paper

УДК 538.91, 539.143.5

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

С. К. ЛАЗАРУК, В. П. БОНДАРЕНКО, В. Е. БОРИСЕНКО, Н. В. ГАПОНЕНКО,
Г. Г. ГОРОХ, А. А. ЛЕШОК, Д. Б. МИГАС, Е. Б. ЧУБЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 31.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Обобщены результаты научных исследований, выполненных в научных подразделениях кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в области разработки перспективных оптических и электронных внутричиповых и межчиповых соединений элементов кремниевых интегральных микросхем. Представлены примеры использования наноструктурированных материалов для предложенных, интегрированных с монокристаллическим кремнием, источников и детекторов света (Si), а также волноводов (Al_2O_3/TiO_2). Развита и опробована стратегия применения межчиповых вставок – интерпозеров – для обеспечения оптических и электронных соединений в объемных (2,5D и 3D) сборках кристаллов интегральных микросхем. Приведены результаты поиска новых материалов и структур для источников света, волноводов, оптически прозрачных проводников и защиты от СВЧ-излучения.

Ключевые слова: оптическое межсоединение, электронное межсоединение, микросхема, интерпозер, наноматериал, наноструктура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т23МЭ-018. Авторы работы благодарны академику В. А. Лабуну за стимулирующие дискуссии по темам проводимых исследований.

Для цитирования. Перспективные оптические и электронные межсоединения элементов интегральных микросхем / С. К. Лазарук [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 7–19. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-7-19>.

PERSPECTIVE OPTICAL AND ELECTRONIC INTERCONNECTS OF INTEGRATED CIRCUIT ELEMENTS

SERGEI K. LAZAROUK, VITALY P. BONDARENKO, VIKTOR E. BORISENKO,
NIKOLAI V. GAPONENKO, GENNADII G. GOROKH, ANDREI A. LESHOK,
DMITRI B. MIGAS, EUGENE B. CHUBENKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 31.01.2024

Abstract. The recent results of the investigations performed in the research units of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics in the field of the development of perspective optical and electronic intra-chip and inter-chip interconnections of silicon integrated circuits are summarized. Examples of the use of nanostructured materials for the proposed light sources and detec-

tors (Si) as well as light guides ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$) integrated with monocrystalline silicon are presented. The strategy of an application of inter-chip interposers for optical and electronic connections in bulk (2.5D and 3D) packages of integrated circuits was promoted and tested. Novel materials and structures promising for light sources, optically transparent electrical conductors and protectors against microwave electromagnetic radiation are demonstrated.

Keywords: optical interconnect, electronic interconnect, integrated circuit, interposer, nanomaterial, nanostructure.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was carried out with the financial support of the project of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research No T23ME-018. The authors of the work are grateful to Academician V. A. Labunov for stimulating discussions on the topics of the research.

For citation. Lazarouk S. K., Bondarenko V. P., Borisenko V. E., Gaponenko N. V., Gorokh G. G., Leshok A. A., Migas D. B., Chubenko E. B. (2024) Perspective Optical and Electronic Interconnects of Integrated Circuit Elements. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 7–19. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-7-19> (in Russian).

Введение

На современном этапе развития интегральной электроники особое внимание уделяется межсоединениям элементов как внутри самой микросхемы, так и между микросхемами. В частности, из-за резистивно-емкостных задержек быстродействие микропроцессорных устройств (чипов) ограничено пределом на уровне единиц гигагерц (5–8 ГГц). Чтобы преодолеть данное ограничение, необходимо использовать принципиально другой (отличный) способ передачи сигнала, когда носителями информации становятся фотоны. Именно оптические (оптоволоконные) системы используются как для связи между континентами, так и на бытовом уровне для высокоскоростного интернета. Замена «медленных» электронов «быстрыми» фотонами позволит не только повысить быстродействие всей системы, но и увеличить помехоустойчивость, степень защищенности передаваемого сигнала, что, в конечном счете, приведет к существенному количественному росту передаваемой и обрабатываемой информации.

Для реализации системы оптических межсоединений необходимы следующие компоненты: источник светового сигнала, световод (волновод), фотодетектор. Если фотодетекторы и световоды давно изготавливаются на кремниевых чипах, то создание источников света, в частности светодиодов на кремнии, связано с фундаментальными ограничениями. Кремний, будучи основным материалом при производстве интегральных микросхем, является непрямозонным полупроводником, что не позволяет создавать на его основе эффективные светоизлучающие диоды. Также осаждение пленок других прямозонных полупроводников типа нитрида галлия затруднено из-за разницы параметров решетки и коэффициентов объемного расширения при нагреве, что приводит к нежелательным эффектам отслаивания осаждаемых пленок во время последующих технологических операций.

Разработкой перспективных оптических и совершенствованием электронных межсоединений элементов интегральных микросхем, позволяющих преодолеть названные ограничения, успешно занимается кафедра микро- и нанoeлектроники и лаборатории научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР). При этом основное внимание уделяется как разработке оптимальных конструктивных решений на основе традиционных для кремниевой микроэлектроники материалов, так и поиску новых материалов и наноструктур, перспективных для создания источников света, а также пленочных структур, выполняющих функции волноводов, оптически прозрачных проводников и защиты от СВЧ-излучения. Результаты научных исследований и разработок, выполненных в БГУИР, кратко обобщены в данной статье.

Оптические межсоединения элементов интегральных микросхем

Перспектива изготовления источников света на кремнии появилась после обнаружения эффективной фотолюминесценции наноструктурированного пористого кремния [1]. За счет эффекта квантового ограничения удалось при уменьшении размеров кремниевого «скелета» получить светоизлучение с эффективностью несколько процентов, что было принципиально невозможно в случае объемного монокристаллического кремния. Важно отметить, что в то время пористый кремний исследовался лишь в нескольких научных лабораториях в мире, среди которых была проблемная лаборатория БГУИР (тогда МРТИ). Опыт работы с пористым кремнием позволил создать на его основе светоизлучающие диоды, излучающие свет при обратном смещении [2–4].

По эффективности и стабильности светоизлучения эти светодиоды превосходили известные аналоги, что отмечено публикациями в журнале Nature [5, 6]. На основе вышеупомянутых исследований были разработаны лавинные светодиоды на базе наноструктурированного кремния, первое упоминание о которых сделано в 2000 г. [7]. Далее последовали работы, позволившие улучшить параметры лавинных светодиодов, в частности быстродействие [8]. Анализ литературных источников показывает, что после 2004 г. лавинные кремниевые светодиоды активно исследуются учеными США, Европы (Нидерланды, Франция, Дания, Швейцария, Россия, Хорватия), Азии (Япония, Китай, Израиль, Иран), ЮАР и Австралии [9].

На рис. 1 представлены схемы функционирования внутри- и межчиповых оптических межсоединений. В обоих случаях световой сигнал генерируется лавинными светодиодами (LED – Light Emitting Diodes), использующими наноструктурированный кремний в качестве источника света. Далее световой сигнал (на рисунке показан стрелками) распространяется либо по световоду (рис. 1, *a*) внутри чипа, либо через оптический интерпозер (рис. 1, *b*) между чипами. Затем световой сигнал регистрируется фотоприемниками (PD – Photodetectors).

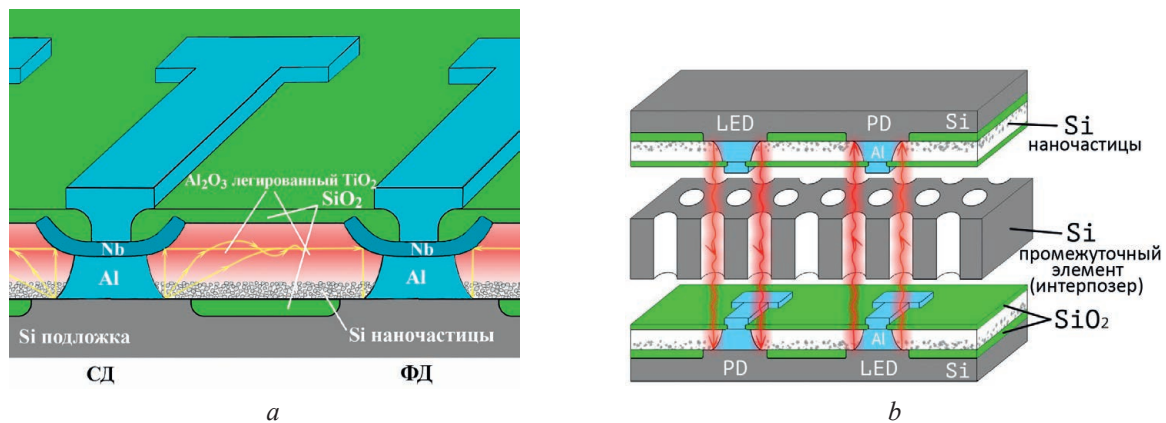


Рис. 1. Схемы функционирования внутричиповых (*a*) и межчиповых (*b*) оптических межсоединений
Fig. 1. Functional principles of intra-chip (*a*) and inter-chip (*b*) optical interconnects

Светодиоды функционируют за счет барьера Шоттки между алюминиевыми электродами и кремниевой подложкой, на поверхности которой сформирован слой кремниевых наночастиц, что схематично показано на рис. 1. Во внутричиповых оптических межсоединениях сверху алюминиевых электродов расположены ниобиевые отражатели (рис. 1, *a*), при помощи которых световой сигнал перенаправляется в нужную сторону по световоду. Роль световода (волновода) выполняет пленка анодного оксида алюминия, ее внутренний слой легирован оксидом титана. Этот слой является сердцевиной волновода, по которой происходит распространение светового сигнала за счет более высокого значения показателя преломления [8, 10].

Световой сигнал в межчиповых оптических межсоединениях после его генерации светодиодом проходит через оптический интерпозер [11], представляющий собой микроканальную пластину со сквозными отверстиями, что позволяет свету распространяться только в вертикальном направлении, как это схематично показано на рис. 1, *b*. Функции фотоприемников выполняют те же диоды, используемые в качестве источников светового сигнала. Отличие их функционирования заключается в том, что если светоизлучение имеет место при электрическом смещении диодов свыше напряжений, при которых происходит лавинное умножение носителей заряда, т. е. лавинный пробой, то режим фотоприемника имеет место при смещении диодов менее напряжения лавинного пробоя [12]. Благодаря универсальности конструкции светодиодов и фотоприемников удается реализовать микросистемы оптических межсоединений на минимальной площади кремниевых чипов.

Высокое быстродействие лавинного умножения носителей заряда обеспечивает еще одно важное преимущество разработанных микросистем оптических межсоединений. Если в оптоволоконной оптической связи кроме вышеотмеченных компонент используется оптический модулятор, необходимый для управления световым сигналом, то в предлагаемых авторами микросистемах используется внутренняя модуляция светового сигнала за счет модуляции света при изменении напряжения смещения светодиодов, высокое быстродействие которых обеспечивает функционирование систем в гигагерцовом диапазоне частот, что не могут обеспечить альтернативные устройства. Изготовление разработанных конструкций соответствует традиционной технологии

производства кремниевых КМОП интегральных микросхем, что позволяет интегрировать оптические межсоединения с классическими металлическими межсоединениями на едином кремниевом чипе [13]. Кроме этого, разработанные конструкции могут быть интегрированы с новыми элементами интегральной электроники. В частности, следует отметить разработки в области спинтроники, где пористые анодные оксиды с упорядоченной структурой пор используются в качестве формозадающих матриц (темплатов) при формировании новых наноструктурированных материалов и устройств на их основе. При изготовлении таких матриц была достигнута рекордная величина коэффициента регулярности пористого оксида алюминия 96 % [14], что позволило создать переключающиеся магниторезистивные элементы [15–19].

Перспективные материалы для интегральных источников света

Актуальными задачами в разработке оптических межсоединений элементов интегральных микросхем являются поиск и исследование новых материалов для светоизлучающих структур, которые могли бы составить конкуренцию традиционно используемым нитридным полупроводникам и полупроводниковым соединениям группы A^{III}B^V. Один из таких материалов – графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$), имеющий, как и графен, гексагональную кристаллическую решетку и обладающий полупроводниковыми свойствами ($E_g \sim 2,7$ эВ). Наряду с перспективами его использования в оптоэлектронике, он уже продемонстрировал свою эффективность при фотокаталитической очистке воды от органических загрязнений и бактерий, преобразовании и накоплении энергии, включая генерацию водорода фотокаталитическим разложением воды и фотосинтез углеводов из воды и углекислого газа, а также при создании новых элементов сенсорики. В исследованиях этого материала [20–25], выполненных в 2019–2023 гг., основной акцент сделан на поиске возможностей управления его оптическими, в первую очередь люминесцентными, свойствами и на разработке методов формирования пленок из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ [26–28]. Получены тонкие пленки $g\text{-C}_3\text{N}_4$ методами химического осаждения из газовой фазы в двухзонном реакторе в инертной атмосфере [27] и на воздухе в муфельной печи (рис. 2) [28].

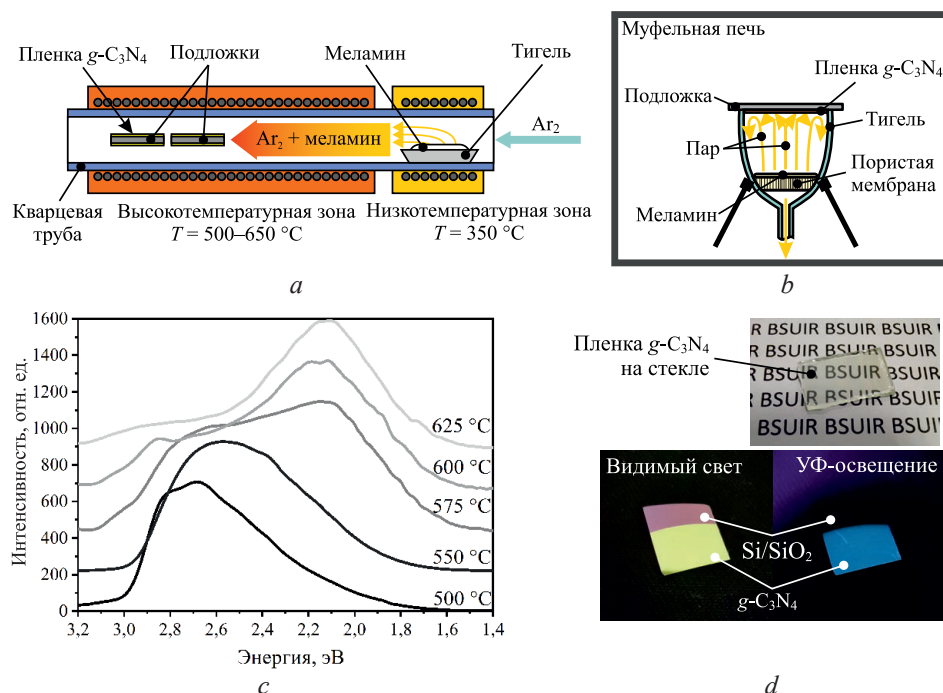


Рис. 2. Синтез пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ методом химического осаждения из газовой фазы в двухзонном реакторе (а) и быстрым осаждением в муфельной печи (b), спектры фотолюминесценции $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (с) при различных температурах, и внешний вид пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (d), полученных на стеклянных и кремниевых подложках при различном освещении

Fig. 2. Synthesis of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ films by chemical vapor deposition in a two-zone reactor (a) and by rapid deposition in a muffle furnace (b), photoluminescence spectra of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (c) at different temperatures and photos of the films $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (d) of glass and silicon substrate at different light illumination

Второй способ дает возможность получить гомогенные покрытия из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ всего за 3–5 мин [28], что не менее чем на порядок быстрее аналогичных технологических процессов. Показано, что управление люминесцентными характеристиками формируемых таким образом пленок осуществляется простым изменением температуры синтеза в пределах 500–625 °С, что обеспечивает сдвиг положения максимума фотолюминесценции. Композитные материалы, включающие помимо $g\text{-C}_3\text{N}_4$ также полупроводниковые оксид цинка и/или сульфид цинка, обеспечивают получение источников белого света с различной цветовой температурой [23, 25].

Еще одним исследованным авторами статьи материалом, представляющим интерес для создания светоизлучающих приборов, интегрированных с кремниевыми структурами, является оксид цинка (ZnO). Это широкозонный полупроводник, демонстрирующий эффективную экситонную и примесную люминесценцию. Он может быть легирован различными металлами для придания электропроводящих свойств и модификации оптических характеристик [29–31]. Методом химического гидротермального осаждения с использованием зародышевых слоев, нанесенных на поверхность кремниевой подложки методом послойного атомного осаждения, и электрохимическим методом получены тонкие пленки ZnO, легированного никелем, кобальтом и медью. Изменение концентрации названных примесей позволяет контролировать электропроводность и люминесцентные свойства полученных пленок (рис. 3).

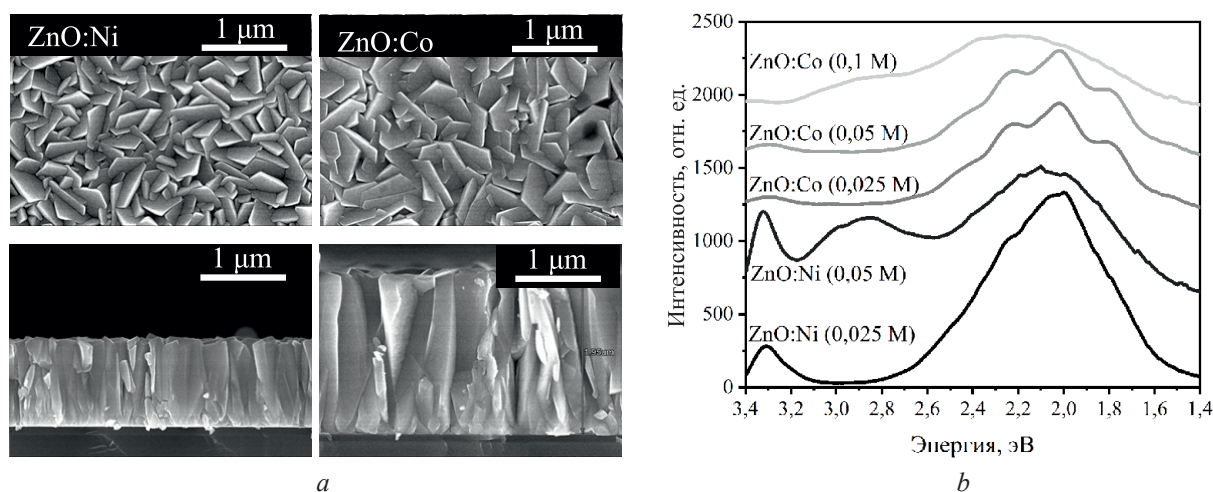


Рис. 3. Поверхность и поперечное сечение тонких пленок ZnO, легированного переходными металлами (а), и их спектры люминесценции (b)
Fig. 3. Surface and cross-sectional view of thin films ZnO doped by metals (a) and their photoluminescence spectra (b)

Исследованные материалы – $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и ZnO – представляют интерес не только для создания светоизлучающих элементов в составе оптоэлектронных пар в интегральном исполнении, но и для дискретных источников света и фотокатализаторов.

Функциональные оптические материалы и структуры

Фотонные кристаллы сегодня рассматривают в качестве перспективных структур для оптической обработки информации. В процессе исследований в этом направлении авторами статьи разработаны золи для формирования пленок и порошков титаната бария золь-гель-методом. На подложках кремния и кварцевого стекла получены образцы легированных лантаноидами многослойных структур с периодически изменяющимся показателем преломления $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ – фотонных кристаллов и микрорезонаторов, демонстрирующих усиление стоксовой и ап-конверсионной люминесценции лантаноидов [32–34]. В этих структурах наблюдается ап-конверсионная люминесценция трехвалентных ионов эрбия для длины волны возбуждения 980 нм. Она проявляется наличием полос люминесценции в видимом диапазоне в области 500–700 нм. В некоторых экспериментах интенсивность ап-конверсионной люминесценции удалось увеличить более чем в 300 раз в микрорезонаторе, состоящем из 13–17 чередующихся слоев контролируемой толщины $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$, по сравнению с первоначально полученными пленками ксерогелей на кремнии. Это достигнуто за счет оптимизации соотношения эрбия и иттербия в титанате бария, выбора режимов термообработки и оптимизации самой структуры многослойного микрорезонатора. По-

казано, что в микрорезонаторах интенсивность ап-конверсионной люминесценции уменьшается при повышении температуры образца, однако сохраняется даже при 170 °С.

Кроме элементов планарной оптоэлектроники, разработанные структуры фотонных кристаллов представляют интерес для удаленного оптического мониторинга окружающей среды, поскольку на изменение люминесценции и спектров отражения фотонных кристаллов и микрорезонаторов влияют такие внешние факторы, как температура, влажность, напряженность электрического поля и др. Получены первые образцы прозрачных покрытий на стекле, демонстрирующие ап-конверсионную люминесценцию. Образцы испытаны в качестве преобразователей излучения для расширения спектрального диапазона чувствительности кремниевых фотоэлектронных умножителей, разрабатываемых ОАО «Интеграл», за счет преобразования возбуждающего ИК-излучения в видимое.

Важной проблемой при эксплуатации электронных изделий, использующих микросхемы, является их защита от электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Эта проблема решается за счет прозрачно-проводящих покрытий, способных пропускать сигнал видимого и инфракрасного диапазонов и экранировать СВЧ-излучение (длина волны более 100 мкм). Разработанные экраны на основе алюминиевых сеток [35], встроенных в анодный оксид алюминия, обеспечивают пропускание оптического сигнала на уровне 90 %. При этом слои сопротивления покрытия составляет 1 Ом/квадрат, что меньше, чем у известных аналогов из альтернативных материалов.

Авторами статьи проводятся исследования и других прозрачно-проводящих материалов. Одним из перспективных в качестве проводящих проводников является дисилицид кальция (CaSi_2). Теоретические и экспериментальные исследования электронных и оптических характеристик CaSi_2 [36, 37] показывают, что этот силицид имеет свойства бесщелевого полупроводника с двумя типами подвижных носителей заряда (электроны и дырки с концентрацией порядка 10^{21} см^{-3}) в районе уровня Ферми. Анализ коэффициентов оптического поглощения и отражения указывает на окно прозрачности в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Установлено, что пленки CaSi_2 сохраняют низкое электрическое сопротивление при комнатной температуре – порядка 6,6 Ом/квадрат, что важно для создания полупрозрачных и проводящих контактов.

Еще одним материалом, перспективным в качестве прозрачных проводников, является субстехиометрический оксид вольфрама $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ ($\text{WO}_{2.722}$). Известно, что высший оксид вольфрама (WO_3) представляет собой широкозонный полупроводник. В то же время $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ – это выроджденный полупроводник с *n*-типом проводимости, шириной запрещенной зоны около 2 эВ и концентрацией свободных электронов порядка 10^{22} см^{-3} [38]. Анализ оптических свойств $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ показал полосу пропускания в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

Альтернативным способом защиты электронных изделий от нежелательных воздействий является разработка ученых БГУИР по защите микросхем от несанкционированного доступа. Радикальным способом защиты информации в электронных изделиях от несанкционированного доступа является их уничтожение. Авторы предлагают эту задачу решать, используя тепловой эффект от быстрого окисления наноструктурированного кремния в специализированном чипе-актюаторе [39, 40]. Так, в случае обнаружения несанкционированного проникновения к электронному устройству подается электрический либо оптический сигнал к чипу-актюатору, что инициирует процесс самоуничтожения всего электронного устройства.

Электронные межсоединения элементов интегральных микросхем

Обеспечение надежного быстродействующего электронного соединения отдельных чипов, смонтированных на печатной плате, актуально для современной электроники. Если раньше решение рисунка проводников печатной платы было достаточным для монтажа на ней различных интегральных микросхем, таких как схемы памяти, логические и другие специализированные схемы, то сейчас с ростом количества выводных электродов интегральных схем, да и самого количества микросхем, возможности двумерной интеграции на печатных платах ограничены.

Для изготовления конечных электронных изделий на основе современных микросхем между печатной платой и микросхемами помещают промежуточную пластину – интерпозер. Он обеспечивает вертикальное соединение внешних электрических выводов микросхемы с контактными областями печатной платы, как это показано на рис. 4. Таким образом, интерпозер выполняет функции интерфейса, обеспечивающего электрическую коммутацию микросхем и печатной пла-

ты (PCB – Printed Circuit Board) за счет сквозных проводников (TSV – Through Silicon Via) внутри него и шарообразных контактов (Bump) на концах этих проводников. В связи с тем, что в данном случае появляется еще одно пространственное направление межсоединений, такую интеграцию называют 2,5D-интеграцией, когда используется один интерпозер, либо 3D-интеграцией, когда используется два или более интерпозеров, как это показано на рис. 4.

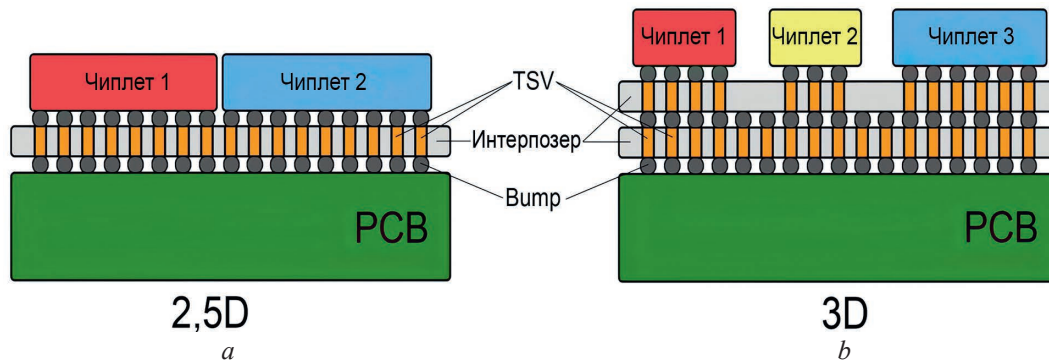


Рис. 4. Схематическое изображение 2,5D- и 3D-интеграции чиплетов через интерпозер
Fig. 4. Schematic views of 2.5D and 3D chiplet integration via interposer

Журнал Массачусетского технологического института MIT Technology Review составил список из 10 прорывных технологий, которые могут изменить мир в 2024 г. [41]. На шестое место поставлена технология чиплетов – небольших интегральных микросхем с определенным функционалом, которые соединяются при помощи 3D-интерпозеров, чтобы выполнить те же функции, как и большинство интегральных микросхем. В этом случае уменьшается себестоимость конечного изделия и расширяются его функциональные возможности. Таким образом, использование интерпозеров при изготовлении электронных устройств открывает новые перспективы 3D-интеграции специализированных микросхем.

Формирование интерпозеров начинается с изготовления микроканальных пластин. В качестве исходного рабочего материала в основном используется кремний, иногда силикатное или органическое стекло. В [42] предложена оригинальная технология изготовления интерпозеров на основе кремния или анодного оксида алюминия. В качестве исходных образцов используются алюминиевые пластины. Сквозные отверстия в них формируются при помощи операций электрохимического анодирования с последующим заполнением этих отверстий металлом [43, 44]. На рис. 5 представлены фотографии готовых микроканальных пластин из кремния (рис. 5, а) и анодного оксида алюминия (рис. 5, б). Диаметр сквозных отверстий в них составляет от 5 до 40 мкм при толщине пластин от 50 до 200 мкм.

Интерпозеры на основе кремния и анодного оксида алюминия обладают значимым преимуществом в сравнении с аналогами, изготовленными из альтернативных материалов. За счет высоких значений коэффициента теплопроводности данных материалов они эффективно рассеивают выделяющееся при работе микросхем тепло, что повышает надежность функционирования всей микросборки. Таким образом, использование интерпозеров для электронной коммутации микросхем позволяет увеличить возможности интеграции специализированных компонентов в конечных электронных изделиях. В частности, разработанные сенсоры движения на основе наноструктурированного кремния [45, 46], биосенсоры [47, 48], газовые [49–51] и температурные [52–54] сенсоры могут быть соединены со специализированными схемами управления в единое устройство благодаря 3D-интеграции с помощью интерпозеров.

При формировании интерпозеров для коммутации специализированных микросхем необходимо принимать во внимание способы корпусирования микросхем и микросборок, а также защиту конечных электронных изделий от внешних воздействий. Проблемы корпусирования микросхем обострились в последние годы из-за санкционной политики ряда стран. ОАО «Интеграл» активизировал работу по импортозамещению материалов и компонент, используемых при изготовлении корпусированных микросхем. В 2020 г. «Интеграл» объявил международный тендер по формированию антиотражающих покрытий на поверхности корпусов микросборок, используемых в космических аппаратах для дистанционного зондирования поверхности Земли. В конкурсе разработок антиотражающих покрытий участвовало несколько белорусских организаций. По результатам проведения тендера победителем была объявлена разработка БГУИР, после чего

выполнено несколько хозяйственных договоров по формированию антиотражающих покрытий на корпусах микросборок для дистанционного зондирования поверхности Земли. Сформированные покрытия имеют ряд преимуществ перед известными аналогами, среди которых – высокий коэффициент конформности, низкий коэффициент отражения и высокая надежность покрытия при испытаниях контрастными температурами [55].

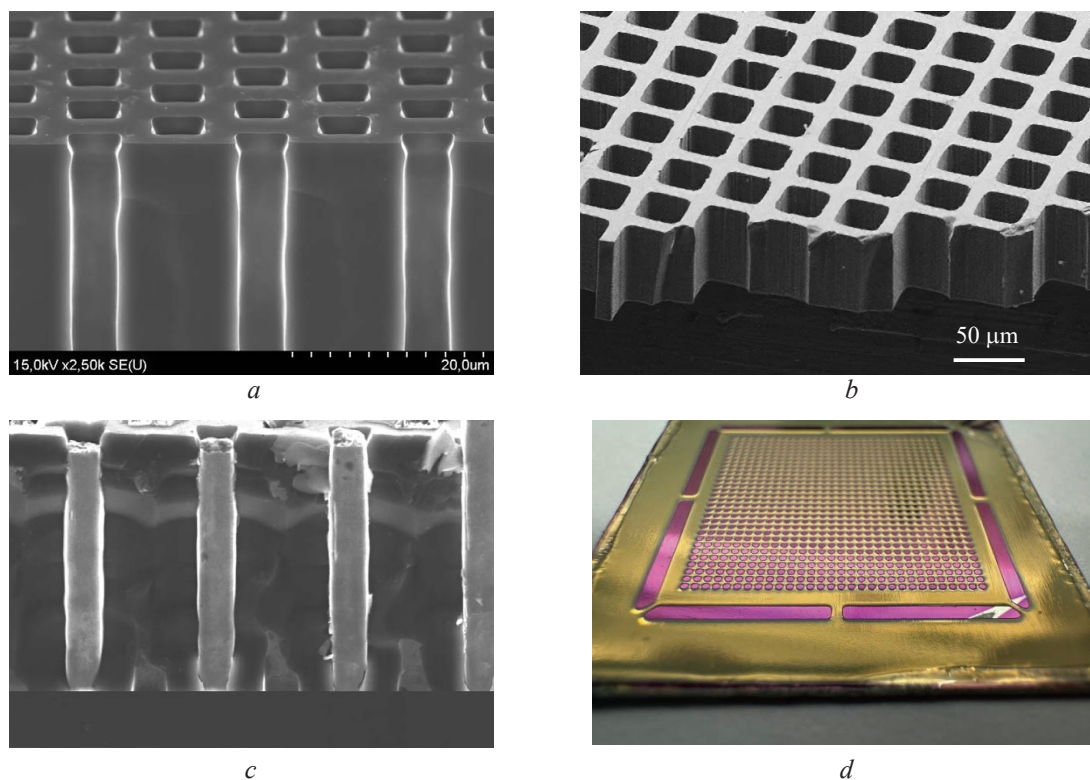


Рис. 5. Микроканальные пластины из кремния (*a*) и анодного оксида алюминия (*b*) и интерпозеры на их основе со сквозными металлическими электродами (*c, d*)

Fig. 5. Microchannel plates made of silicon (*a*) and aluminum oxide (*b*) and interposers based on them with through metal electrodes (*c, d*)

Заключение

1. Представленные результаты исследований и разработок оптических и электронных межсоединений элементов интегральных микросхем по ряду достигнутых параметров соответствуют уровню лучших мировых аналогов. Среди таких параметров – коэффициент передачи по току и рабочая частота функционирования. Следует отметить оригинальность конструкции ряда разработок отдельных компонентов интегральной фотоники: светодиодов, световодов, оптических интерпозеров, резонаторов, фотоприемников.

2. Разработанные интерпозеры позволяют интегрировать в единую микросборку различные специализированные чипы-микросхемы за счет 2,5D- и 3D-интеграции. Исследованные новые наноструктурированные функциональные покрытия открывают перспективы в совершенствовании этого направления.

Список литературы

1. Canham, L.T. Silicon Quantum Wire Array Fabricaiton by Electrochemical Dissolution of Wafers / L. T. Canham // Applied Physics Letters. 1990. Vol. 57, No 10. P. 1046–1048.
2. Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate N-Type Silicon / S. Lazarouk [et al.] // MRS Online Proceedings Library. 1994. Vol. 358. P. 659–664.
3. Stable Electroluminescence from Reverse Biased N-Type Porous Silicon-Aluminum Schottky Junction Device / S. Lazarouk [et al.] // Applied Physics Letters. 1996. Vol. 68. P. 2108–2110.
4. Electroluminescence from Aluminum-Porous Silicon Reverse Bias Schottky Diodes Formed on the Base of Highly Doped N-Type Polysilicon / S. Lazarouk [et al.] // Thin Solid Films. 1996. Vol. 276. P. 296–298.

5. Hirschman, K. D. Silicon-Based Visible Light-Emitting Devices Integrated into Microelectronic Circuits / K. D. Hirschman, L. Tsybeskov, S. P. Duttagupta // *Nature*. 1996. Vol. 384. P. 338–341.
6. Miller, A. B. Silicon Integrated Circuits Shine / A. B. Miller // *Nature*. 1996. Vol. 384. P. 307–308.
7. Avalanche Porous Silicon Light Emitting Diodes for Optical Intra-Chip Interconnects / S. Lazarouk [et al.] // *Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology*. World Scientific. 2001. P. 41–44. http://dx.doi.org/10.1142/9789812810861_0009.
8. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2005. Т. 39, № 1. С. 149–152. <http://dx.doi.org/10.1134/1.1852663>.
9. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для оптических межсоединений / Ле Динь Ви [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2020. Т. 18, № 3. С. 63–71. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-63-71>.
10. Si-Based Optoelectronic Couple / P. Jaguiro [et al.] // *Physica E*. 2009. Vol. 41. P. 1094–1096.
11. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections through Optical Interposer / S. K. Lazarouk [et al.] // *International Journal of Nanoscience*. 2019. Vol. 18. <http://dx.doi.org/10.1142/S0219581X1940091X>.
12. Фоточувствительные свойства лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния / С. К. Лазарук [и др.] // *Опто, микро- и СВЧ-электроника*. 2022. С. 175–185.
13. Влияние анодного оксида алюминия, используемого в качестве разделительного диэлектрика кремниевых лавинных светодиодов, на их характеристики / Ле Динь Ви [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2019. № 7–8. С. 165–172.
14. Формирование пористого оксида алюминия с трубчатой структурой в различных электролитах / С. К. Лазарук [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 2 т.* Минск: Физ-техн. ин-т Нац. акад. наук Беларуси, 2022. Т. 1. Материаловедение. С. 163–172.
15. Effect of Flattened Surface Morphology of Anodized Aluminum Oxide Templates on the Magnetic Properties of Nanoporous Co/Pt and Co/Pd Thin Multilayered Films / T. N. Anh Nguyen [et al.] // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 427. P. 649–655.
16. Enhanced Perpendicular Exchange Bias in Co/Pd Antidot Arrays / T. N. Anh Nguyen [et al.] // *Journal of Electronic Materials*. 2019. Vol. 48, No 3. P. 1492–1497.
17. Complex Magnetic Ordering in Nanoporous [Co/Pd]5-IrMn Multilayers with Perpendicular Magnetic Anisotropy and its Impact on Magnetization Reversal and Magnetoresistance / W. Wu [et al.] // *J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 22, No 6. P. 3661–3674. <http://dx.doi.org/10.1039/C9CP05947D>.
18. Correlation of Magnetic and Magnetoresistive Properties of Nanoporous Co/Pd Thin Multilayers Fabricated on Anodized TiO₂ Templates / T. N. A. Nguyen [et al.] // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10.
19. Influence of Interfacial Magnetic Ordering and Field-Cooling Effect on Perpendicular Exchange Bias and Magnetoresistance in Nanoporous IrMn/[Co/Pd] Films / W. Wu [et al.] // *J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 127.
20. Синтез легированного кислородом графитоподобного нитрида углерода из тиомочевины / Н. М. Денисов [и др.] // *Письма в журнал технической физики*. 2019. Т. 45, вып. 3. С. 49–51.
21. Structural and Photoluminescence Properties of Graphite-Like Carbon Nitride / A. V. Baglov [et al.] // *Semiconductors*. 2020. Vol. 54, No 2. P. 228–232.
22. Recovery Behavior of the Luminescence Peak from Graphitic Carbon Nitride as a Function of the Synthesis Temperature / E. B. Chubenko [et al.] // *Cryst. Res. Technol.* 2020. Vol. 55, Iss. 3.
23. Chubenko, E. B. One-Step Synthesis of Visible Range Luminescent Multicomponent Semiconductor Composites Based on Graphitic Carbon Nitride / E. B. Chubenko, A. V. Baglov, V. E. Borisenko // *Advanced Photonics Research*. 2020. Vol. 1.
24. Structure of Photoluminescence Spectra of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride / E. B. Chubenko [et al.] // *J. Appl. Spectrosc.* 2020. Vol. 87, No 1. P. 9–14.
25. Broad Band Photoluminescence of g-C₃N₄/ZnO/ZnS Composite Towards White Light Source / E. B. Chubenko [et al.] // *Mater. Sci. Eng. B*. 2021. Vol. 267.
26. Synthesis of Graphitic Carbon Nitride in Porous Silica Glass / E. B. Chubenko [et al.] // *Int. J. Nanosci.* 2019. Vol. 18, No 3–4.
27. Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized g-C₃N₄ Layered Films / E. B. Chubenko [et al.] // *J. Phys. Chem.* 2022. Vol. 126, No 9. P. 4710–4714.
28. Rapid Chemical Vapor Deposition of Graphitic Carbon Nitride Films / E. B. Chubenko [et al.] // *Materialia*. 2023. Vol. 28.
29. Янушкевич, К. О. Формирование и оптические свойства осажденного электрохимическим методом легированного никелем оксида цинка / К. О. Янушкевич, Е. Б. Чубенко, В. Е. Борисенко // *Доклады БГУИР*. 2020. Т. 18, № 2. С. 37–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-37-44>.
30. Формирование электрохимическим методом композитных материалов на основе оксида цинка и меди / Н. М. Ткачёнок, Е. Б. Чубенко, В. П. Бондаренко // *Доклады БГУИР*. 2020. Т. 18, № 5. С. 17–25. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-17-25>.
31. Optical Properties of Hydrothermally Deposited Ni and Co Doped Nanostructured ZnO Thin Films as Scintillating Coatings for Beta-Particles Detection / E. B. Chubenko [et al.] // *J. Lumin.* 2022. Vol. 247.

32. Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived BaTiO₃/SiO₂ Multilayer Cavity Structure / N. V. Gaponenko [et al.] // *Optical Materials*. 2019. Vol. 96.
33. Optical Properties and Upconversion Luminescence of BaTiO₃ Xerogel Structures Doped with Erbium and Ytterbium / E. I. Lashkovskaya [et al.] // *Gels*. 2022. Vol. 8. <http://dx.doi.org/10.3390/gels8060347>.
34. Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO₃ Film Structures and the Target Form / N. V. Gaponenko [et al.] // *Photonics*. 2023. Vol. 10, No 4.
35. Оптические свойства прозрачных проводящих покрытий на основе алюминиевой решетки, встроенной в анодный оксид алюминия / С. К. Лазарук [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 2 кн. Минск: Физ.-техн. ин-т Нац. акад. наук Беларуси, 2023. Кн. 1: Материаловедение. С. 168–176.*
36. Conductive CaSi₂ Transparent in the Near Infra-Red Range / N. G. Galkin [et al.] // *J. Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 770, No 2. P. 710–720.
37. Ca Silicide Films-Promising Materials for Silicon Optoelectronics / N. G. Galkin [et al.] // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2023. Vol. 62.
38. Migas, D. B. Effects of Bipolarons on Oxidation States, and the Electronic and Optical Properties of W₁₈O₄₉ / D. B. Migas, A. B. Filonov, N. V. Skorodumova // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2021. Vol. 23.
39. Быстрые экзотермические процессы в пористом кремнии / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2005. Т. 39, вып. 8. С. 917–919.
40. Использование процессов горения и взрыва наноструктурированного пористого кремния в микро-системных устройствах / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2007. Т. 39. С. 1130–1134.
41. 10 Breakthrough Technologies [Electronic Resource] // MIT Technology Review. Mode of access: <https://www.technologyreview.com/2024/01/08/1085094/10-breakthrough-technologies-2024/#chipllets>. Date of access: 23.01.2024.
42. Method of Making Multilevel Interconnections of Electronic Parts: United States Patent No 5,880,021 / V. A. Labunov [et al.]. March 9, 1999.
43. Электрохимическое заполнение TSv-отверстий на реверсированном токе / Л. К. Кушнер [и др.] // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: матер. Междунар. науч.-техн. конф. INTERMATIC-2018*. 2018. Т. 18, № 1. С. 179–182.
44. Lazarouk, S. K. High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask / S. K. Lazarouk // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. 2013. P. 355–358.
45. Self-Powered Acoustic Sensor Based on Triboelectric Nanogenerator for Smart / Y. Li [et al.] // *Acoustics Australia*. 2022. Vol. 50. P. 383–391. <http://dx.doi.org/10.1007/s40857-022-00275-4>.
46. A Micro-Airflow Sensor Sustem Enabled by Triboelectric Nano-Generator for Lab Safety and Human-Computer Interaction / X. Wang [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. 2024. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2024.3350707>.
47. A Highly Sensitive Silicon Nanowire Array Sensor for Joint Detection of Tumor Markers CEA and AFP / K. Lu [et al.] // *Biomaterials Science*. 2022. Vol. 10, No 14. P. 3823–3830.
48. A Supersensitive Silicon Nanowire Array Biosensor for Quantitating Tumor Marker ctDNA / L. Dujuan [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. 2021. Vol. 181.
49. Spatially Ordered Matrix of Nanostructured Tin-Tungsten Oxides Nanocomposites Formed by Ionic Layer Deposition for Gas Sensing / G. Gorokh [et al.] // *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/s21124169>.
50. A Micropowered Chemosensitive Sensor Based on a Thin Alumina Nanoporous Membrane and Sn_xBi_kMo_yO_z Nanocomposite / G. Gorokh [et al.] // *Sensors*. 2022. Vol. 22.
51. Heater Topology Influence on the Functional Characteristics of Thin-Film Gas Sensors Made by MEMS-Silicon Technology / G. Gorokh [et al.] // *Chemosensors*. 2023. Vol. 11. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11080443>.
52. A New Approach for Producing of Film Structures Based on Si_{1-x}Ge_x / I. M. Gavrilin [et al.] // *Mater. Lett.* 2022. Vol. 313.
53. Germanium Electrodeposition into Porous Silicon for Silicon-Germanium Alloying / N. Grevtsov [et al.] // *Materialia*. 2022. Vol. 26.
54. Composition-Adjustable Silicon-Germanium Alloy Films Based on Porous Silicon Matrices / N. Grevtsov [et al.] // *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 38.
55. Лазарук, С. К. Формирование наноструктурированных антиотражающих покрытий на титановых элементах оптических устройств / С. К. Лазарук, Д. А. Сасинович, С. В. Гранько // *Мокеровские чтения: сб. тр. 12-й Междунар. науч.-практ. конф. по физике и технол. наногетероструктурной СВЧ-электронике, 2021. С. 127–128.*

References

1. Canham L. T. (1990) Silicon Quantum Wire Array Fabricaiton by Electrochemical Dissolution of Wafers. *Applied Physics Letters*. 57 (10), 1046–1048.

2. Lazarouk S., Bondarenko V., Pershukevich P., La Monica S., Maiello G., Ferrari A. (1994) Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate *N*-Type Silicon. *MRS Online Proceedings Library*. 358, 659–664.
3. Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S., Masini G., La Monica S., Maiello G., et al. (1996) Stable Electroluminescence from Reverse Biased *N*-Type Porous Silicon-Aluminum Schottky Junction Device. *Appl. Phys. Lett.* 68, 2108–2110.
4. Lazarouk S., Bondarenko V., La Monica S., Maello G., Masini G., Pershukevich P., et al. (1996) Electroluminescence from Aluminum-Porous Silicon Reverse Bias Schottky Diodes Formed on the Base of Highly Doped *N*-Type Polysilicon. *Thin Solid Films*. 276, 296–298.
5. Hirschman K. D., Tsybeskov L., Duttagupta S. P. (1996) Silicon-Based Visible Light-Emitting Devices Integrated into Microelectronic Circuits. *Nature*. 384, 338–341.
6. Miller A. B. (1996) Silicon Integrated Circuits Shine. *Nature*. 384, 307–308.
7. Lazarouk S., Jaguiro P., Leshok A., Borisenko V. (2001) Avalanche Porous Silicon Light Emitting Diodes for Optical Intra-Chip Interconnects. *Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology*. World Scientific. 41–44. http://dx.doi.org/10.1142/9789812810861_0009.
8. Lazarouk S. K., Leshok A. A., Labunov V. A., Borisenko V. E. (2005) Efficiency of Avalanche Light-Emitting Diodes Based on Porous Silicon. *Semiconductors*. 39 (1), 149–152 (in Russian).
9. Le Dinh Vi, Leshok A. A., Dolbik A. V., Perko S. L., Lazarouk S. K. (2020) Avalanche LEDs Based on Nanostructured Silicon for Optical Interconnects. *Doclady BGUIR*. 18 (3), 63–71 (in Russian).
10. Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., Moore S., Smirnov A. (2009) Si-Based Optoelectronic Couple. *Physica E*. 41, 1094–1096.
11. Lazarouk S., Leshok A., Kozlova T., Dolbik A., Le Dinh V., Ilkov V., et al. (2019) 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 18. <http://dx.doi.org/10.1142/S0219581X1940091X>.
12. Lazarouk S. K., Dudich V. V., Klyutsky A. Y., Dolbik A. V., Leshok A. A., Dudarenko V. N., et al. (2022) Photosensitive Properties of Avalanche Leds Based on Nanostructured Silicon. *Opto, Micro- and Microwave Electronics*. 175–185 (in Russian).
13. Le Dinh Vi, Klyutsky A. Y., Dolbik A. A., Leshok A. A., Lazarouk S. K. (2019) The Influence of Anodic Aluminum Oxide Used as a Separating Dielectric of Silicon Avalanche LEDs on Their Characteristics. *Doclady BGUIR*. (7–8), 165–172 (in Russian).
14. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Orekhovskaya T. I., Kupreeva O. V., Korotkevich A. V., Dudich V. V., et al. (2022) Formation of Porous Aluminum Oxide with a Tubular Structure in Various Electrolytes. Book 1: Materials Science. *Modern Methods and Technologies for Creating and Processing Materials, a Collection of Scientific Papers*. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. 163–172 (in Russian).
15. Anh Nguyen T. N., Fedotova J., Kasiuk J., Bayev V., Kupreeva O., Lazarouk S., et al. (2018) Effect of Flattened Surface Morphology of Anodized Aluminum Oxide Templates on the Magnetic Properties of Nanoporous Co/Pt and Co/Pd Thin Multilayered Films. *Applied Surface Science*. 427, 649–655.
16. Anh Nguyen T. N., Fedotova J., Kasiuk J., Wu W.-B., Przewoznik J., Kapusta C., et al. (2019) Enhanced Perpendicular Exchange Bias in Co/Pd Antidot Arrays. *Journal of Electronic Materials*. 48 (3), 1492–1497.
17. Wu W., Kasiuk J., Nguyen T. N. A., Fedotova J., Przewoznik J., Kapusta C., et al. (2020) Complex Magnetic Ordering in Nanoporous [Co/Pd]5-IrMn Multilayers with Perpendicular Magnetic Anisotropy and its Impact on Magnetization Reversal and Magnetoresistance. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 22 (6), 3661–3674. <http://dx.doi.org/10.1039/C9CP05947D>.
18. Nguyen T. N. A., Wu W., Kasiuk J., Fedotova J., Przewoznik J., Kapusta C., et al. (2020) Correlation of Magnetic and Magnetoresistive Properties of Nanoporous Co/Pd Thin Multilayers Fabricated on Anodized TiO₂ Templates. *Scientific Reports*. 10.
19. Wu W., Kasiuk J., Nguyen T. N. A., Fedotova J., Przewoznik J., Kapusta C., et al. (2020) Influence of Interfacial Magnetic Ordering and Field-Cooling Effect on Perpendicular Exchange Bias And Magnetoresistance in Nanoporous IrMn/[Co/Pd] Films. *J. Appl. Phys.* 127.
20. Denisov N. M., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., Borisenko V. E. (2019) Synthesis of Oxygen-Doped Graphite-Like Carbon Nitride from Thiourea. *Technical Physics Letters*. 45 (3), 49–51 (in Russian).
21. Baglov A. V., Chubenko E. B., Hnitsko A. A., Borisenko V. E., Malashevich A. A., Uglov V. V. (2020) Structural and Photoluminescence Properties of Graphite-Like Carbon Nitride. *Semiconductors*. 54 (2), 228–232.
22. Chubenko E. B., Denisov N. M., Baglov A. V., Bondarenko V. P., Uglov V. V., Borisenko V. E. (2020) Recovery Behavior of the Luminescence Peak from Graphitic Carbon Nitride as a Function of the Synthesis Temperature. *Cryst. Res. Technol.* 55 (3).
23. Chubenko E. B., Baglov A. V., Borisenko V. E. (2020) One-Step Synthesis of Visible Range Luminescent Multicomponent Semiconductor Composites Based on Graphitic Carbon Nitride. *Advanced Photonics Research*. 1.
24. Chubenko E. B., Baglov A. V., Leonenya M. S., Yablonskii G. P., Borisenko V. E. (2020) Structure of Photoluminescence Spectra of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride. *Journal of Applied Spectroscopy*. 87 (1), 9–14.

25. Chubenko E. B., Baglov A. V., Leanenina M. S., Urmanov B. D., Borisenko V. E. (2021) Broad Band Photoluminescence of $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ Composite Towards White Light Source. *Materials Science and Engineering B*. 267.
26. Chubenko E. B., Baglov A. V., Lisimova E. S., Borisenko V. E. (2019) Synthesis of Graphitic Carbon Nitride in Porous Silica Glass. *International Journal of Nanoscience*. 18 (3–4).
27. Chubenko E. B., Kovalchuk N. G., Komissarov I. V., Borisenko V. E. (2022) Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Layered Films. *J. Phys. Chem. C*. 126 (9), 4710–4714.
28. Chubenko E. B., Maximov S. E., Bui C. D., Pham V. T., Borisenko V. E. (2023) Rapid Chemical Vapor Deposition of Graphitic Carbon Nitride Films. *Materialia*. 28.
29. Yanushkevich K. O., Chubenko E. B., Bondarenko V. P. (2020) Formation and Optical Properties of Nickel-Doped Zinc Oxide Deposited by Electrochemical Method. *Doklady BGUIR*. 18 (2), 37–44 (in Russian).
30. Tkachenok N. M., Chubenko E. B., Bondarenko V. P. (2020) Formation of Composite Materials Based on Zinc and Copper Oxide by Electrochemical Method. *Doklady BGUIR*. 18 (5), 17–25 (in Russian).
31. Chubenko E. B., Alhamd M. W., Bondarenko V. P. (2022) Optical Properties of Hydrothermally Deposited Ni and Co Doped Nanostructured ZnO Thin Films as Scintillating Coatings for Beta-Particles Detection. *J. Lumin.* 247.
32. Gaponenko N. V., Kholov P. A., Raichenok T. F., Prislowski S. Ya. (2019) Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ Multilayer Cavity Structure. *Optical Materials*. 96.
33. Lashkovskaya E. I., Gaponenko N. V., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Andreev B. A., Zhivulko V. D., et al. (2022) Optical Properties and Upconversion Luminescence of BaTiO_3 Xerogel Structures Doped with Erbium and Ytterbium. *Gels*. 8. <http://dx.doi.org/10.3390/gels8060347>.
34. Gaponenko N. V., Staskov N. I., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Karnilava Y. D., et al. (2023) Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO_3 Film Structures and the Target Form. *Photonics*. 10 (4).
35. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Zavadsky S. M., Golosov D. A., Meledina M. V., Dolbik A. V., et al. (2023) Optical Properties of Transparent Conductive Coatings Based on an Aluminum Grid Embedded in Anodic Aluminum Oxide. Book 1: Materials Science. *Advanced Methods and Technologies of Materials Development and Processing*. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. 168–176 (in Russian).
36. Galkin N. G., Galkin K. N., Goroshko D. L., Dotsenko S. A., Kropachev O. V., Chernev I. M., et al. (2019) Conductive CaSi_2 Transparent in the Near Infra-Red Range. *J. Alloys and Compounds*. 770 (2), 710–720.
37. Galkin N. G., Galkin K. N., Goroshko D. L., Dotsenko S. A., Kropachev O. V., Chernev I. M., et al. (2023) Ca Silicide Films-Promising Materials for Silicon Optoelectronics. *Jpn. J. Appl. Phys.* 62.
38. Migas D. B., Filonov A. B., Skorodumova N. V. (2021) Effects of Bipolarons on Oxidation States, and the Electronic and Optical Properties of $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 23.
39. Lazarouk S. K., Dolbik A. V., Zhagirop P. V., Labunov V. A., Borisenko V. E. (2005) Fast Exothermic Processes in Porous Silicon. *Semiconductors*. 39 (8), 917–919 (in Russian).
40. Lazarouk S. K., Dolbik V. A., Labunov V. A., Borisenko V. E. (2007) Combustion and Explosion of Nanostructured Silicon in Microsystem Devices. *Semiconductors*. 39, 1130–1134 (in Russian).
41. 10 Breakthrough Technologies. *MIT Technology Review*. Available: <https://www.technologyreview.com/2024/01/08/1085094/10-breakthrough-technologies-2024/#chipllets> (Accessed 23 January 2024).
42. Labunov V. A. (1999) *Method of Making Multilevel Interconnections of Electronic Parts*. United States Patent No 5,880,021.
43. Kushner L. K., Stepanova L. I., Kuzmar I. I., Khmyl A. A., Lazarouk S. K., Dolbik A. V. (2018) Electrochemical Filling of TSv-Holes on Reverse Current. *Fundamental Problems of Radio-Electronic Instrument Making: Materials of the International Scientific and Technical Conference "INTERMATIC-2018"*. 18 (1), 179–182 (in Russian).
44. Lazarouk S. K. (2013) High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. 355–358 (in Russian).
45. Li Y., Liu C., Hu S., Sun P., Fang L., Lazarouk S., et al. (2022) Self-Powered Acoustic Sensor Based on Triboelectric Nanogenerator for Smart. *Acoustics Australia*. 50, 383–391. <http://dx.doi.org/10.1007/s40857-022-00275-4>.
46. Wang X., Li Y., Liu C., You W., Zou H., Yue C., et al. (2024) A Micro-Airflow Sensor Systeem Enabled by Triboelectric Nano-Generator for Lab Safety and Human-Computer Interaction. *IEEE Sensors Journal*. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2024.3350707>.
47. Lu K., Liu C., Wang G., Yang W., Fan K., Lazarouk S., et al. (2022) A Highly Sensitive Silicon Nanowire Array Sensor for Joint Detection of Tumor Markers. *CEA and AFP Biomaterials Science*. 10 (14), 3823–3830.
48. Li D., Chen H., Fan K., Labunov V., Lazarouk S., Yue X., et al. (2021) A Supersensitive Silicon Nanowire Array Biosensor for Quantitating Tumor Marker ctDNA. *Biosensors and Bioelectronics*. 181.
49. Gorokh G., Bogomazova N., Taleb A., Zhylinski V., Galkovsky T., Zakhlebayaeva A., et al. (2021) Spatially Ordered Matrix of Nanostructured Tin-Tungsten Oxides Nanocomposites Formed by Ionic Layer Deposition for Gas Sensing. *Sensors*. 21, 1–14. <https://doi.org/10.3390/s21124169>.

50. Gorokh G., Zakhlebayaeva A., Taratyn I., Lozovenko A., Zhylnski V., Iji M., et al. (2022) A Micropowered Chemoresistive Sensor Based on a Thin Alumina Nanoporous Membrane and $\text{Sn}_x\text{Bi}_k\text{Mo}_y\text{O}_z$ Nanocomposite. *Sensors*. 22.
51. Gorokh G., Taratyn I., Fiadosenka U., Reutskaya O., Lozovenko A. (2023) Heater Topology Influence on the Functional Characteristics of Thin-Film Gas Sensors Made by MEMS-Silicon Technology. *Chemosensors*. 11. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11080443>.
52. Gavrilin I. M., Grevtsov N. L., Pavlikov A. V., Dronov A. A., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., et al. (2022) A New Approach for Producing of Film Structures Based on $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. *Mater. Lett.* 313.
53. Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S. (2022) Germanium Electrodeposition into Porous Silicon for Silicon-Germanium Alloying. *Materialia*. 26.
54. Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S., et al. (2024) Composition-Adjustable Silicon-Germanium Alloy Films Based on Porous Silicon Matrices. *Materials Today Communications*. 38.
55. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Granko S. V. (2021) Formation of Nanostructured Anti-Reflection Coatings on Titanium Elements of Optical Devices. *The 12th International Scientific and Practical Conference on Physics and Technology of Nanoheterostructural Microwave Electronics*. 127–128 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Лазарук С. К., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Бондаренко В. П., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Материалы и структуры нанoeлектроники» НИЧ, БГУИР

Борисенко В. Е., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Гапоненко Н. В., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Горох Г. Г., канд. техн. наук, зав. науч.-исслед. лаб. «Нанотехнологии» НИЧ, БГУИР

Лешок А. А., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Мигас Д. Б., д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Чубенко Е. Б., канд. техн. наук, доц., доц. кафедры микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-69
E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by
Лазарук Сергей Константинович

Information about the authors

Lazarouk S. K., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Bondarenko V. P., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Scientific Research Laboratory "Materials and Structures of Nanoelectronics" of R&D Department, BSUIR

Borisenko V. E., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Gaponenko N. V., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Gorokh G. G., Cand. of Sci., Head of the Scientific Research Laboratory "Nanotechnologies" of R&D Department, BSUIR

Leshok A. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Migas D. B., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Associate Professor, Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Chubenko E. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-69
E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by
Lazarouk Sergei Konstantinovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-20-31>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.793; 621.3.049.77

ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

А. П. ДОСТАНКО, С. И. МАДВЕЙКО, Е. В. ТЕЛЕШ,
С. Н. МЕЛЬНИКОВ, С. М. ЗАВАДСКИЙ, Д. А. ГОЛОСОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 12.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. В статье изложены современные тенденции развития ионно-плазменных систем для ионной обработки и нанесения тонких пленок. Рассмотрены применение импульсного реактивного магнетронного распыления для формирования пленок оксида ванадия и зависимость параметров процесса от частотных характеристик электропитания, особенности и применение процесса прямого осаждения из ионного пучка для формирования ориентирующих покрытий из SiO_2 , CH , CN , CHF для жидкокристаллических дисплеев, износостойких покрытий из алмазоподобного углерода ($\alpha\text{-C}$) и нитрида углерода (CN_x). Показаны преимущества непрерывного режима электропитания сверхвысокочастотного магнетрона по сравнению с импульсным. Приведена математическая модель расчета магнетронных распылительных систем и процессов магнетронного распыления, представлены основные возможности разработанного программного комплекса Deposition.

Ключевые слова: ионно-плазменная система, ионно-лучевой источник, магнетронная распылительная система, нанесение тонких пленок, реактивное распыление, модель магнетронного распыления.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ионно-плазменные системы в технологии тонких пленок / А. П. Достанко [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 20–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-20-31>.

PLASMA SYSTEMS IN THIN FILM TECHNOLOGY

ANATOLIY P. DOSTANKO, SERGEY I. MADVEYKO, EVGENI V. TELESH,
SERGEY N. MELNIKOV, SERGEY M. ZAVADSKI, DMITRIY A. GOLOSOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 12.02.2024

Abstract. The article discusses the current trends in the development of ion-plasma systems for ion processing and thin film deposition. Application of pulsed reactive magnetron sputtering for deposition of vanadium oxide films and dependence of process parameters on power supply frequency characteristics, peculiarities and application of direct ion-beam deposition for formation of coatings based on SiO_2 for optical coatings, SiO_2 , CH , CN , CHF for orientation coatings of LCD displays, wear-resistant coatings of diamond-like carbon ($\alpha\text{-C}$) and carbon nitride (CN_x) are considered. The advantages of continuous microwave magnetron power over pulsed mode are shown. The mathematical model for calculating magnetron sputtering systems, processes of magnetron sputtering and the main capabilities of the developed software complex Deposition are shown.

Keywords: ion-plasma system, ion-beam source, magnetron sputtering system, thin film deposition, reactive sputtering, magnetron sputtering model.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Dostanko A. P., Madveyko S. I., Telesh E. V., Melnikov S. N., Zavadski S. M., Golosov D. A. (2024) Plasma Systems in Thin Film Technology. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 20–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-20-31> (in Russian).

Введение

Одним из широко используемых методов получения тонкопленочных покрытий являются процессы ионного распыления благодаря их исключительным возможностям и достоинствам, таким как высокая воспроизводимость, применимость для нанесения широкого спектра пленочных материалов, гибкость и прецизионность в управлении процессом нанесения. Среди большого разнообразия технической реализации этих методов для промышленного использования основные – процессы магнетронного и ионно-лучевого распыления, сверхвысокочастотной (СВЧ) плазмохимической обработки материалов. В Центре «Ионно-плазменные системы и технологии» (Центр 2.1) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в течение многих лет ведутся работы в области исследования и разработки устройств и технологий ионной обработки и формирования тонкопленочных структур для оптики, опто- и микроэлектроники. Среди них – метод импульсного реактивного магнетронного распыления, который исследуется и используется в Центре 2.1 для нанесения пленок металлов и многокомпонентных материалов. Также ведутся исследования по развитию метода прямого осаждения из ионных пучков, при котором формирование тонкопленочных покрытий осуществляется из пучка ионов химически активных частиц, формируемых ионным источником. Возрастает интерес к использованию для решения практических задач в микро- и нанoeлектронике, оптике и мехатронике СВЧ низкотемпературной неравновесной плазмы. Это обусловлено рядом достоинств СВЧ-разрядов по сравнению с другими типами электрических газовых разрядов. Кроме того, в Центре 2.1 активно ведутся разработки математических моделей и программного обеспечения для расчета и проектирования как отдельных высокоэффективных магнетронных распылительных систем (МРС), так и технологических процессов нанесения тонких пленок, и систем магнетронного распыления с различным взаимным расположением МРС относительно подложек.

Применение методов компьютерного моделирования позволяет лучше понять основы функционирования ионно-плазменных устройств, исследовать различные конфигурации систем при изменяющихся физических условиях без их разрушения и проведения дорогостоящих комплексных экспериментов. Успешные результаты в этом направлении позволят значительно сократить период разработки и оптимизации конструкций реальных систем, время и затраты на проведение предварительных исследований, количество и разнообразие испытаний, а также минимизировать возможные ошибки при проектировании таких систем за счет исключения многочисленных итераций физического макетирования.

Формирование слоев методом импульсного реактивного магнетронного распыления

Среди плазменных методов нанесения тонких пленок одним из широко используемых является магнетронное распыление. Высокая производительность, простота использования – основные достоинства этого метода. Реактивное магнетронное распыление применяется для нанесения многокомпонентных тонких пленок оксидов, нитридов, оксинитридов, карбидов. Одна из проблем, возникающая при этом, – эффекты дугообразования. Для предотвращения данных явлений получил развитие метод импульсного магнетронного распыления (Pulsed Magnetron Sputtering, PMS) [1, 2]. Импульсный разряд постоянного тока при средней частоте 10–250 кГц предохраняет от образования дуг и стабилизирует процесс реактивного магнетронного распыления [3].

При работе магнетронной распылительной системы на постоянном токе в случае использования реактивного газа, например, кислорода, на поверхности металлической мишени в эрозивной зоне происходит образование микродуг, вызванное ростом оксидной пленки. В процессе ионной бомбардировки этой оксидной пленки на ее поверхности накапливается положительный заряд и происходит ее дуговой пробой. Развитие дуги носит лавинообразный характер, сопровождается резким увеличением тока разряда, что приводит к локальному изменению условий распыления, может сопровождаться капельным выбросом материала мишени и является причи-

ной нарушения стабильности процесса нанесения. При увеличении тока разряда активное формирование микродуг происходило при все большей концентрации кислорода. Так, для $I_t = 0,5$ А дуги отмечались при концентрации кислорода Γ_{O_2} более 22 %, а для $I_t = 1,5$ А – при $\Gamma_{O_2} > 50$ %. При $I_t = 1,5$ А и $\Gamma_{O_2} > 70$ % из-за большого количества дуг блок питания магнетрона не обеспечивал стабилизацию параметров питания МРС.

Эффективным средством для устранения дуг является асимметричное импульсное питание магнетрона током средней частоты (1–100 кГц) [4]. В течение рабочего отрицательного импульса происходит распыление материала мишени с одновременным накоплением заряда на оксидной пленке, затем во время импульса положительной полярности – компенсация заряда оксидной пленки электронами из области плазм. Анализ, проведенный в [3], показал, что время накопления заряда зависит от параметров разряда распылительной системы и свойств наносимого материала.

Установлено, что увеличение частоты импульсного питания магнетрона приводит к увеличению напряжения разряда U_t (рис. 1). Так, при токе разряда $I_t = 1,5$ А и частоте $F = 82$ кГц напряжение разряда U_t достигало максимально возможных значений для выходного напряжения используемого источника питания магнетрона (–800 В). Аналогичная зависимость характерна и для случая увеличения длительности положительного импульса (рис. 2). При фиксированной частоте 50 кГц увеличение длительности положительного импульса τ от 3 до 7 мкс приводило соответственно к увеличению напряжения разряда U_t от 613 до 744 В. При реактивном распылении металлической (ванадиевой) мишени наблюдалось уменьшение количества микродуг в разрядной зоне при частоте питающего напряжения более 5 кГц и длительности положительного импульса $\tau > 3$ мкс. В случае частоты питающего напряжения более 10 кГц и $\tau > 3$ мкс образование микродуг не регистрировалось, и таким образом обеспечивалась устойчивая работа МРС для всего используемого диапазона концентраций кислорода в смеси рабочих газов.

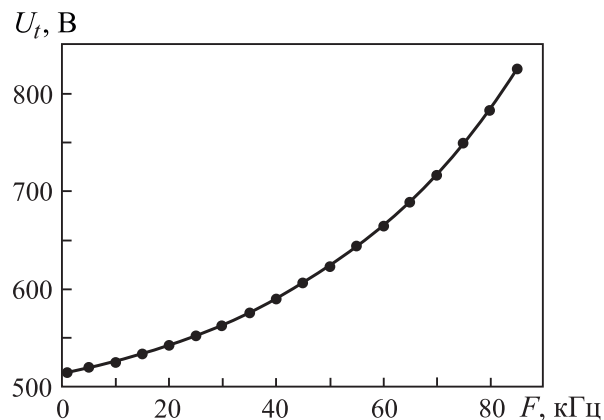


Рис. 1. Зависимость напряжения разряда от частоты следования импульсов ($\Gamma_{O_2} = 50$ %, $I_t = 1,5$ А, $\tau = 3$ мкс)

Fig. 1. Discharge voltage as a function of pulse frequency ($\Gamma_{O_2} = 50$ %, $I_t = 1.5$ А, $\tau = 3$ μ s)

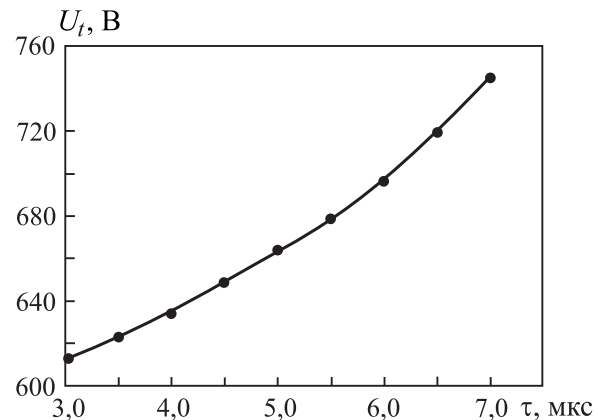


Рис. 2. Зависимость напряжения разряда от длительности положительного импульса ($\Gamma_{O_2} = 50$ %, $I_t = 1,5$ А, $F = 50$ кГц)

Fig. 2. Discharge voltage as a function of positive pulse duration ($\Gamma_{O_2} = 50$ %, $I_t = 1.5$ А, $F = 50$ kHz)

На рис. 3 представлены зависимости напряжения разряда от концентрации кислорода в Ar/O₂-смеси рабочих газов при реактивном импульсном магнетронном распылении металлической ванадиевой мишени (V-мишени) в режиме стабилизации тока ($F = 10$ кГц, $\tau = 3$ мкс, $U^+ = 25$ В) для токов разряда от 0,5 до 1,5 А. Характер зависимостей соответствует аналогичным зависимостям $U_t(\Gamma_{O_2})$ при работе на постоянном токе. Однако для сопоставимых режимов работы напряжение разряда при импульсном распылении принимает более высокие значения относительно напряжения постоянного тока. Также для обеих групп зависимостей отсутствуют зоны гистерезиса при увеличении и уменьшении концентрации кислорода. На рис. 4 приведены зависимости скорости нанесения слоев оксида ванадия от содержания кислорода в смеси рабочих газов для режимов распыления на постоянном токе и импульсном. Условия формирования для обоих случаев были одинаковыми: для расстояния мишень–подложка $h = 85$ мм – $F = 10$ кГц, $U^+ = 25$ В, $\tau = 3$ мкс, для тока разряда $I_t = 1,5$ А – режим стабилизации тока.

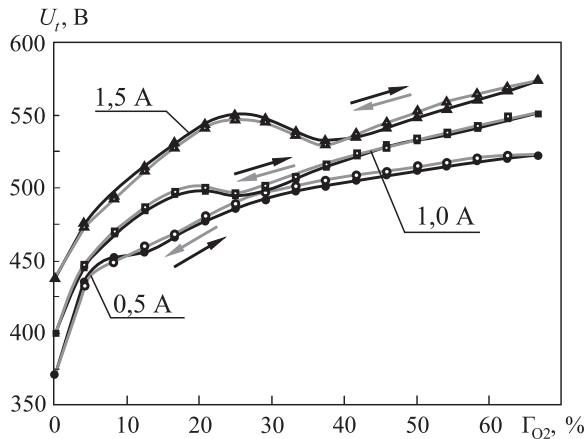


Рис. 3. Зависимость напряжения разряда от концентрации кислорода в Ar/O₂-смеси газов при распылении V-мишени импульсным током при различном токе разряда ($F = 10$ кГц, $U^+ = 25$ В, $\tau = 3$ мкс)

Fig. 3. Discharge voltage as a function of oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture at pulse sputtering of V target and different discharge current ($F = 10$ kHz, $U^+ = 25$ V, $\tau = 3$ μ s)

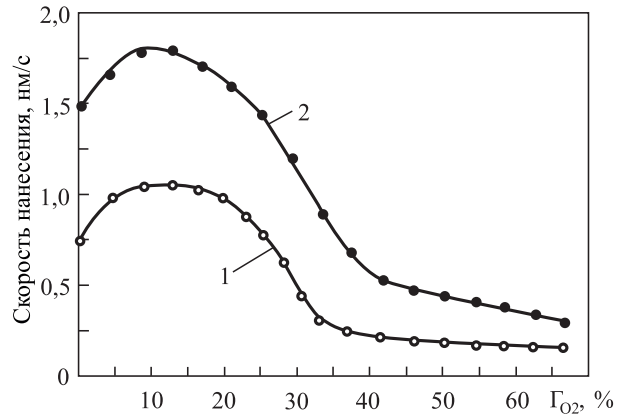


Рис. 4. Зависимость скорости нанесения пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в Ar/O₂-смеси газов для различных режимов распыления: 1 – на постоянном токе; 2 – импульсного ($I_t = 1,5$ А, $h = 85$ мм)

Fig. 4. Dependence of the deposition rate of vanadium oxide films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture for various sputtering modes: 1 – direct current; 2 – pulse ($I_t = 1.5$ A, $h = 85$ mm)

При распылении на постоянном токе (рис. 4, кривая 1) ванадиевой мишени с увеличением содержания кислорода скорость нанесения первоначально увеличивалась и достигала максимума (1,1 нм/с) при $\Gamma_{O_2} = 12$ %. С дальнейшим повышением Γ_{O_2} скорость нанесения начинала интенсивно уменьшаться и при $\Gamma_{O_2} = 33$ % достигала точки перегиба (0,22 нм/с), а разряд переходил в реактивный режим работы, и скорость нанесения практически не зависела от Γ_{O_2} . При импульсном распылении характер зависимости не изменялся (рис. 4, кривая 2). Отличие заключается в повышенном практически на 70 % максимальном значении достигаемой скорости нанесения. Также сместилось в область больших концентраций кислорода и положение точки перегиба (с 33 до 40 %). Это поведение хорошо объясняется более высоким напряжением разряда и компенсацией заряда на оксидной пленке на поверхности мишени во время положительного импульса при реактивном импульсном распылении. Таким образом:

- напряжение разряда при реактивном магнетронном распылении как на постоянном токе, так и при импульсном режиме работы однозначно зависит от концентрации кислорода;
- при частоте импульсного питания магнетрона более 10 кГц и длительности $\tau > 3$ мкс на поверхности мишени не формируются микродуги, и обеспечивается устойчивая работа МРС во всем диапазоне концентраций кислорода;
- увеличение напряжения разряда U_d вызвано увеличением частоты и длительности положительного импульса. Повышение U_d при импульсном питании может приводить к увеличению влияния эффектов, связанных с ионной и электронной бомбардировкой растущей пленки. Это такие эффекты, как дефектообразование, имплантация ионов и атомов отдачи и распыление наносимой пленки. При этом могут происходить обогащение поверхности отдельным элементом, кристаллизация или аморфизация поверхностного слоя. Также в ряде случаев бомбардировка ионами высокой энергии ведет к возникновению дефектов в виде вакансий, межузельных атомов, дислокаций и появлению неоднородностей [5, 6].

Прямое осаждение покрытий из ионных пучков

В настоящее время методы нанесения покрытий, основанные на использовании ионных потоков из пленкообразующих газов, интенсивно развиваются в нашей стране и за рубежом [7, 8]. Для генерации ионных пучков в таких системах чаще всего используются ионные источники на основе торцевого холловского ускорителя (ТХУ) или сеточные ионные источники. Они позволяют формировать ионные пучки с энергией от 30 до 1000 эВ и током пучка до 1,2 А. Ионные источники на базе ускорителя с анодным слоем (УАС) могут работать как в обычных условиях, так и в режиме ионно-пучкового фокуса. При определенных условиях УАС может генери-

ровать низкоэнергетичный вторичный ионный пучок, который обладает высокой плотностью до 5 mA/cm^2 и низким энергетическим разбросом. Пиковая энергия вторичного пучка может легко варьироваться в диапазоне от 40 до 150 эВ. Преимуществами УАС являются простота конструкции, отсутствие термокатада, применение дешевых блоков питания постоянного напряжения. Благодаря высокой энергии конденсирующихся частиц обеспечиваются отличная адгезия к любым подложкам, повышенная плотность и однородность по толщине покрытий. В качестве пленкообразующих газов могут использоваться SiH_4 , CH_4 , CF_4 , O_2 , N_2 , CO_2 , металлосодержащие газы и др. Это позволяет синтезировать широкий спектр тонкопленочных покрытий, которые могут успешно применяться в различных областях науки и техники: Si, SiO_2 , Si_3N_4 , SiC, алмазоподобные покрытия, SiOF, SiOC, SiON, SiCN, CH, CHF, CN, CF, металлы и т. п. Энергия конденсирующихся на подложку ионов может контролируемо изменяться от 30 до 300 эВ, ионный ток – от 0,05 до 0,50 А. Таким образом, применение прямого осаждения позволит получить высококачественные покрытия при небольших затратах на изготовление технологического оборудования и материалы.

Разработаны и исследованы процессы низкотемпературного синтеза оптических покрытий из диоксида кремния из вторичного ионного пучка, формируемого в УАС [9]. В качестве рабочих газов использовались смесь моносилана с аргоном (5 % SiH_4 + 95 % Ar) и кислород. Скорость нанесения v_n зависела от давления рабочих газов, мощности первичного разряда и потенциала дифрагмы и составляла 0,15–0,45 нм/с. Температура подложек из стекла К8 не превышала 323 К. В видимом диапазоне коэффициент пропускания составил 0,86–0,95.

При использовании ТХУ формирование пленок SiO_2 осуществляли двумя путями: осаждением из ионных пучков смеси 5 % SiH_4 + 95 % Ar и кислорода, а также осаждением с использованием пара тетраэтоксисилана (ТЭОС). При использовании моносилана скорость нанесения составляла 0,22–0,65 нм/с, пропускание в видимом диапазоне – 90–91 % [10]. Увеличение тока разряда и парциального давления ТЭОС приводило к существенному росту v_n до 4,33 нм/с, что сравнимо со скоростью нанесения при электронно-лучевом испарении кварца. Покрытия имели пропускание на уровне 83–92 %, причем оно увеличивалось с ростом парциального давления кислорода (рис. 5). Полученные покрытия обладали высокой адгезией к стеклу и кремнию. Инфракрасные (ИК) спектры показали отсутствие ИК-поглощения группы OH, что свидетельствует о плотной структуре покрытий.

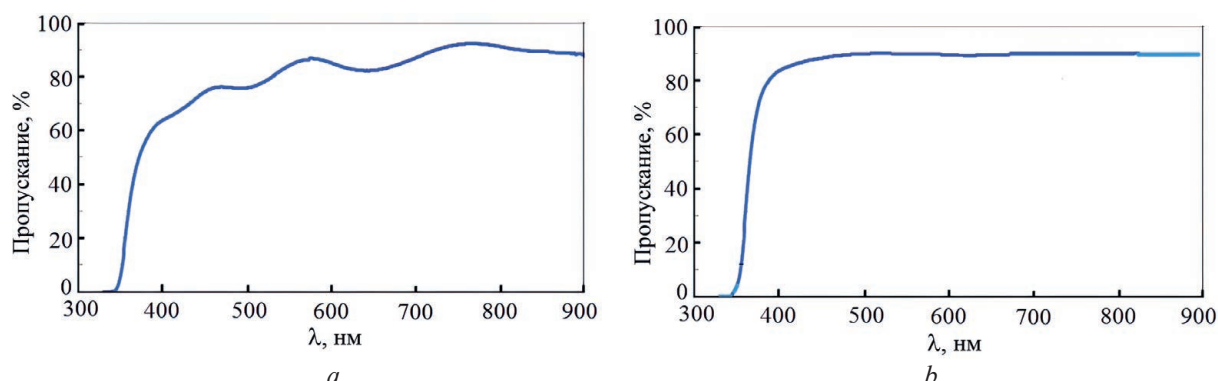


Рис. 5. Спектры пропускания покрытий, полученные при использовании тетраэтоксисилана (a) и смеси тетраэтоксисилана и кислорода (b)

Fig. 5. Transmission spectra of coatings obtained using tetraethoxysilane (a) and a mixture of tetraethoxysilane and oxygen (b)

Впервые ТХУ был успешно применен для формирования ориентирующих покрытий из SiO_2 , CH, CN, CHF для жидкокристаллических (ЖК) ячеек [6]. Покрытия наносили как на стеклянные, так и на гибкие полимерные (триацетилцеллюлоза, циклический олефиновый полимер) подложки, расположенные под углами 15° – 30° к ионному пучку. Сформированные ЖК-ячейки демонстрировали планарную и гомеотропную ориентацию очень высокого качества.

Разработаны процессы синтеза прямым осаждением из ионных пучков износостойких покрытий из алмазоподобного углерода ($\alpha\text{-C}$) и нитрида углерода (CN_x). Для формирования пленок $\alpha\text{-C}$ применялся УАС. Рабочими газами являлись метан, пропан и толуол. Скорость нанесения составляла 0,15–0,20 нм/с. Установлено, что на $\lambda = 555 \text{ nm}$ средняя величина пропускания 40–65 %. ЭПР-спектры показали наличие ярко выраженного сигнала с $g = 2,00286$, что свиде-

тельствует об образовании структуры α -C. Это подтверждается также измерением электрической прочности покрытия, которая достигала $1,5 \cdot 10^7$ В/см. Полученные результаты свидетельствуют о высоком проценте содержания алмазной фазы в покрытиях. Измерение микротвердости покрытий по Кнупу дало результаты от 1145 до 2155 НК. Разработанные процессы синтеза пленок α -C были успешно применены при формировании просветляющих и защитных покрытий для германиевой оптики тепловизионных приборов.

Покрытия из нитрида углерода получали осаждением из ионных пучков, формируемых ТХУ и УАС. В качестве рабочих газов использовали метан и азот. При применении ТХУ скорость нанесения составила 0,54–1,33 нм/с, ширина запрещенной зоны (2,48–2,51 эВ) возрастала при повышении температуры конденсации. На рис. 6, а приведен спектр пропускания пленки CN_x , который свидетельствует о высоком уровне прозрачности в видимом диапазоне. Максимальная микротвердость 1246 НК получена при давлении азота $5,32 \cdot 10^{-2}$ Па. При оптимальных режимах синтеза получены покрытия с низким коэффициентом трения (0,1–0,2). В случае применения УАС скорость нанесения была меньше и составила 0,10–0,16 нм/с. Однако покрытия имели большую прозрачность (рис. 6, б). Максимальная микротвердость составила 2260 НК, коэффициент трения – 0,05–0,20, ширина запрещенной зоны – 2,65 эВ.

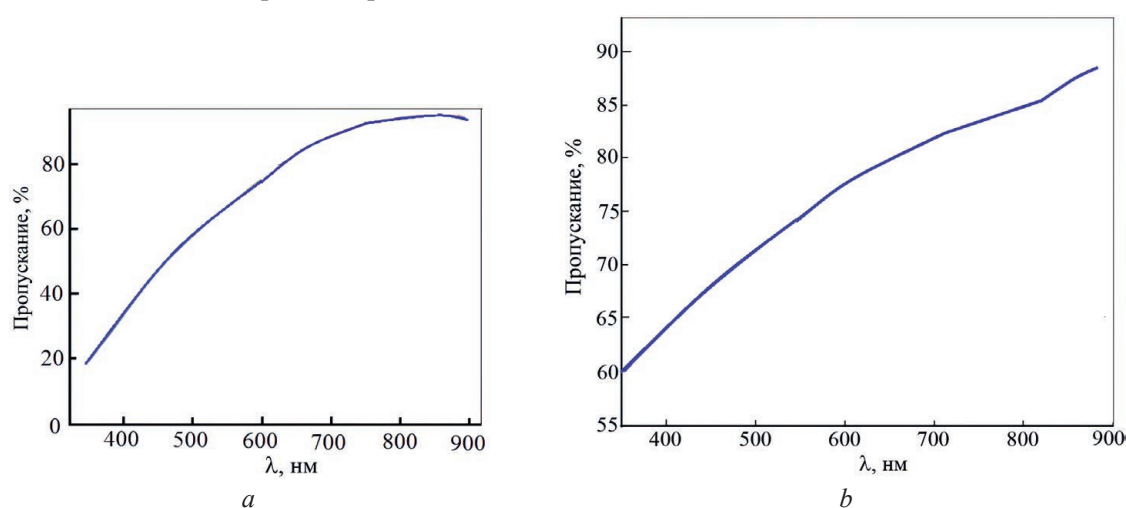


Рис. 6. Спектры пропускания пленок CN_x , полученные с применением торцевого холловского ускорителя (а) и ускорителя с анодным слоем (б)

Fig. 6. Transmission spectra of CN_x films obtained using an end Hall accelerator (a) and an accelerator with an anode layer (b)

Таким образом, разработанные процессы синтеза пленок CN_x позволяют получить покрытия с максимальным оптическим пропусканием 76 %, с высокими микротвердостью и трибологическими характеристиками, что делает их весьма перспективными для формирования защитных покрытий для дисплеев смартфонов, планшетов и т. п.

Сверхвысокочастотная плазмохимическая обработка материалов

Переход микроэлектронной промышленности на использование полупроводниковых пластин диаметром до 200–300 мм и необходимость эффективного проведения процессов групповой обработки пластин с меньшим диаметром на операциях активации поверхности, удаления фоторезистивных пленок, плазменной очистки и т. д. обуславливают потребность в разработке новых и модернизации существующих технологических процессов СВЧ плазмохимической обработки материалов. При увеличении количества обрабатываемых в камере плазмотрона полупроводниковых пластин для обеспечения требуемой скорости процесса обработки необходимо увеличивать мощность подводимого СВЧ-излучения. А поскольку СВЧ-магнетроны средней мощности технологического назначения имеют величину номинальной мощности порядка 0,7–1,5 кВт, возникает необходимость использовать дополнительные стимулирующие воздействия на процесс как в случаях групповой, так и индивидуальной СВЧ плазмохимической обработки кремниевых пластин.

Существует несколько способов решения данной проблемы: проводить процесс плазмохимического удаления фоторезиста в плазме, возбуждаемой при комбинировании высокочастотных

и СВЧ-полей; использовать для запитки плазмотрона несколько СВЧ-магнетронов, работающих на общую плазменную нагрузку; интенсифицировать процесс плазмохимического удаления фоторезиста путем разогрева полупроводниковых пластин ИК-излучением и др. Данные способы интенсификации применяются в технологии микроэлектроники для прецизионных процессов плазменной обработки единичных полупроводниковых пластин и экономически нецелесообразны для непрецизионной обработки. В связи с этим актуальной задачей является поиск более простых способов интенсификации процессов групповой обработки полупроводниковых пластин с минимальной доработкой существующего технологического оборудования, к которым в первую очередь можно отнести использование усовершенствованных источников электропитания СВЧ-магнетронов средней мощности и нагрев обрабатываемых материалов от имеющегося в составе плазмотрона источника СВЧ-энергии. Применительно к технологии обработки полупроводниковых материалов особый интерес представляют возможность увеличения энерговклада в плазму СВЧ-разряда и повышение эффективности процессов СВЧ плазменной обработки, в том числе путем перехода к такому режиму электропитания СВЧ-магнетрона, который позволил бы обеспечить управляемый непрерывный режим генерации плазмы СВ-разряда в отличие от распространенных сегодня импульсных.

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено [11, 12], что изменение режима электропитания СВЧ-магнетрона с импульсного питания на непрерывный приводит к изменению характера формируемого плазменного разряда. Это, в частности, проявляется в наличии постоянной составляющей сигнала интегрального оптического свечения плазмы. При минимальных уровнях постоянной составляющей анодного тока СВЧ-магнетрона, достаточных для устойчивой генерации плазмы в непрерывном режиме, проявляется эффект нелинейного увеличения амплитуды сигнала интегрального оптического свечения СВЧ-разряда с ростом подводимой к СВЧ-магнетрону мощности. Рост интенсивности регистрируемых спектральных линий свидетельствует о повышении концентрации химически активных частиц в объеме плазмы. Это является одним из важнейших факторов при разработке процессов вакуумно-плазменной обработки материалов. Таким образом, экспериментально установлена возможность формирования и устойчивого поддержания плазмы СВЧ-разряда большого объема (около 9000 см³) в крупногабаритной камере СВЧ-плазмотрона резонаторного типа в импульсном и непрерывном режимах ее генерации [13].

Известно, что методы вакуумно-плазменной обработки материалов при изменении энергетической составляющей плазмы могут вносить, как правило, значительную дополнительную дефектность в кристаллическую структуру приповерхностных слоев и пленок [14–16], что ухудшает их электрофизические свойства, а значит, и параметры приборов, изготовленных на их основе. Большую группу дефектов, возникающих в результате плазменного воздействия, составляют дефекты, связанные с нарушением электрических режимов функционирования сформированных структур в результате электрических пробоев.

Уменьшение уровня энергетического воздействия плазмы на структуру приповерхностных слоев и пленок является одной из актуальных проблем технологии микроэлектроники. Поэтому для условий перехода от импульсного к постоянному режиму формирования СВЧ-разряда, сопровождающегося увеличением энерговклада в плазму, были проведены исследования величины СВЧ-мощности, проникающей в плазменный объем. Полученные экспериментальные зависимости представлены на рис. 7. Для обоих режимов электропитания наблюдается близкий к линейному характер роста величины мощности СВЧ-энергии в плазменном объеме с увеличением мощности, потребляемой СВЧ-генератором. Однако при постоянном режиме генерации плазмы наблюдаются меньшие значения проникающей в разряд СВЧ-мощности, чем при импульсном режиме при близких величинах потребляемой генератором мощности электропитания. Зарегистрированные показания измерителя мощности МЗ-28 на уровне ~1850 Вт указывают на уменьшение примерно в 2,3 раза уровня СВЧ-мощности в объеме плазмы СВЧ-разряда. Переход от импульсного к непрерывному режиму работы источника электропитания СВЧ-магнетрона при одинаковом уровне энергопотребления генераторной системой характеризуется ростом ее локальной проводимости в отдельных зонах реакционно-разрядного объема [8, 9], что оказывает влияние на химическую активность плазмы СВЧ-разряда. Полученные положительные результаты можно объяснить тем, что уменьшение скважности импульсов анодного тока источника электропитания СВЧ-магнетрона приводит к уменьшению скважности следования импульсов плазменных формирований.

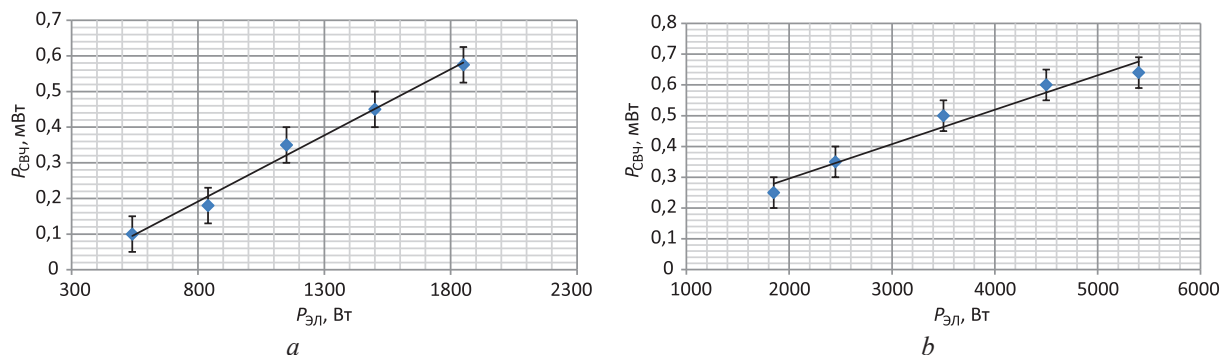


Рис. 7. Зависимость СВЧ-мощности, проникающей в плазменный объем, от мощности, потребляемой СВЧ-магнетроном, при режиме генерации плазмы: *a* – импульсном; *b* – непрерывном
Fig. 7. Dependence of the microwave power penetrating into the plasma volume on the power consumed by the microwave magnetron in the plasma generation mode: *a* – pulsed; *b* – continuous

Распад плазмы между импульсами плазменных формирований происходит не полностью, и значительная часть электронов и других возбужденных частиц может оставаться в разрядном объеме. Непрерывный режим генерации плазмы СВЧ-разряда может характеризоваться нарастающим концентрацией электронов в плазменном объеме. Этому способствуют отсутствие эффекта деионизации плазменного объема в интервалах между плазменными импульсами, характерного для импульсного режима работы СВЧ-магнетрона, и, соответственно, повышение концентрации плазменных частиц. При этом увеличение потребляемой электрической мощности не приводит к значительному росту регистрируемой мощности СВЧ-энергии в плазменном объеме по сравнению с импульсным режимом формирования плазмы. Этот эффект может быть связан с наличием скин-слоя, способствующего переотражению части СВЧ-мощности в резонаторной камере, при этом большая часть СВЧ-энергии может поглощаться в нем. В этом случае электрофизические свойства плазмы в центральной области плазменного разряда будут характеризоваться энергией электронов, которые вырываются из скин-слоя.

Моделирование плазменных систем и процессов

Существующие сегодня модели магнетронных распылительных систем и процессов распыления представлены в виде разрозненных программных продуктов, не совместимых друг с другом и не привязанных непосредственно к устройствам, и чаще всего базируются на математическом описании протекающих физических процессов. Предложена математическая модель расчета разрядной зоны и распределения ионного тока мишени МРС, которая основана на определении относительной скорости ионизации рабочего газа в разрядной зоне магнетрона. В модели действует несколько допущений. Так, основная ионизация рабочего газа происходит в зоне скрещенных $E \times H$ полей, а индукция магнитного поля в этой зоне имеет величину от 0,02 Тл и более. Модель оперирует реальными параметрами процесса и позволяет вычислить время выработки мишени и массу распыленного материала, а также определить условия для повышения коэффициента использования материала мишени [17].

Расчет скорости нанесения осуществляли с использованием метода интегрирования плотности потока распыленного материала с каждой точки зоны распыления. При построении моделей принимали определенные допущения, а именно: распыленные атомы распространяются направленно, при соударении с подложкой распыленный атом конденсируется в точке соударения, рабочее давление находится ниже границы термализации (0,04–1,00 Па), расстояние «мишень – подложка» меньше или равно длине свободного пробега для указанного диапазона давлений. При расчете протяженных МРС зона распыления мишени разделялась на четыре участка: два оконечных закругленных и два прямолинейных. При этом скорость нанесения в точке подложки с координатами x_2, y_2 , расположенной на расстоянии l от точки распыления МРС с протяженной зоной распыления, может быть рассчитана как сумма скоростей нанесения из прямолинейных и закругленных участков зоны распыления:

$$v(x_2, y_2) = v_1(x_2, y_2) + v_2(x_2, y_2) + v_3(x_2, y_2) + v_4(x_2, y_2), \quad (1)$$

где $v_1(x_2, y_2), v_2(x_2, y_2)$ – скорости нанесения с закругленных участков зоны распыления мишени; $v_3(x_2, y_2), v_4(x_2, y_2)$ – скорости нанесения с прямолинейных участков зоны распыления мишени.

Скорость нанесения пленки из участка закругления зоны распыления

$$v_1(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dr_1 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{r_1 v_t(r_1) \cos \varphi(r_1, \theta) F(r_1, \theta)}{l^2(r_1, \theta)} d\theta, \quad (2)$$

где R_{\min}, R_{\max} – минимальный и максимальный радиусы зоны эрозии мишени; r_1 – текущий радиус на мишени; $v_t(r_1)$ – скорость распыления материала мишени на радиусе r_1 ; l – расстояние от точки распыления до точки конденсации; φ – угол конденсации; θ – угол текущей точки распыления относительно длинной оси магнетрона; F – функция пространственного распределения распыленных частиц, использованная для группы материалов, у которых максимум эмиссии при распылении не совпадал с направлением нормали к поверхности:

$$F(\theta) = \frac{\cos \theta}{\alpha^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}; \quad (3)$$

α – коэффициент, от которого зависит форма распределения распыленных частиц, при $\alpha > 1$ функция имеет форму надкосинусного, а при $\alpha < 1$ – подкосинусного распределения.

Для прямолинейных участков зоны распыления формула скорости нанесения имеет вид

$$v_3(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dx_1 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{v_t(x_1) \cos \varphi(x_1, y_1) F(x_1, \theta)}{l^2(x_1, y_1)} dy_1, \quad (4)$$

где L – длина прямолинейного участка зоны распыления мишени; x_1, y_1 – координаты текущей точки распыления; $v_t(x_1)$ – скорость распыления материала мишени для координаты x_1 .

При расчете скорости аксиальных МРС в формуле (4) остаются только скорости нанесения с закругленных участков зоны распыления мишени. Для расчета толщины нанесенной пленки при линейном перемещении подложек учитываются время, скорость перемещения подложки и протяженность зоны нанесения пленки

$$W(x_2) = \int_{-\frac{t_{dep}}{2}}^{\frac{t_{dep}}{2}} v(x_2, t \times v_s) dt, \quad (5)$$

где $v(x_2, t \times v_s)$ – скорость нанесения в точке $t \times v_s$ на расстоянии x_2 от короткой оси магнетрона; v_s – скорость перемещения подложек; t – время нанесения; t_{dep} – время нахождения подложки в зоне нанесения, равное отношению протяженности зоны нанесения пленки к скорости перемещения подложки.

В моделях с вращением подложки при расчете учитываются параметры угла наклона подложки и угловая скорость вращения подложки, в каждый момент времени рассчитывается положение точки распыления и точки конденсации. Новизной предложенных моделей является учет распределения плотности тока в зоне эрозии мишени, ионно-электронной эмиссии материала распыляемой мишени и пространственного распределения потока распыленных частиц. В моделях учтен как осесимметричный, так и протяженный вариант МРС. В отличие от большинства существующих моделей, где рассматривается вариант нанесения пленок на неподвижную подложку, впервые разработаны модели для наиболее часто применяемых в промышленности конфигураций систем (линейное перемещение подложек; нанесение на подложки, расположенные на вращающемся барабанном подложкодержателе для двух конфигураций процесса: магнетрон располагается снаружи вращающегося барабанного подложкодержателя; магнетрон располагается внутри вращающегося барабанного подложкодержателя; вращающаяся подложка, расположенная на расстоянии от оси магнетрона; прогнозирование элементного состава нанесенных пленок при распылении мозаичных мишеней с произвольным расположением вставок), учитывающих технологические и кинематические факторы, влияющие на распределение толщины покрытий. Предложенные модели при рабочем давлении 0,04–1,00 Па обеспечивают определение профилей скорости нанесения, компонентного состава и толщины пленок с погрешностью не более 10 %.

Для решения задачи расчета распределения скорости нанесения покрытия разработан программный комплекс Deposition (рис. 8–10), который позволяет рассчитать скорость нанесения слоев в любой точке подложки для аксиальных и протяженных магнетронных распылительных систем, толщину наносимых слоев для различных форм зон распыления и систем перемещения подложек.

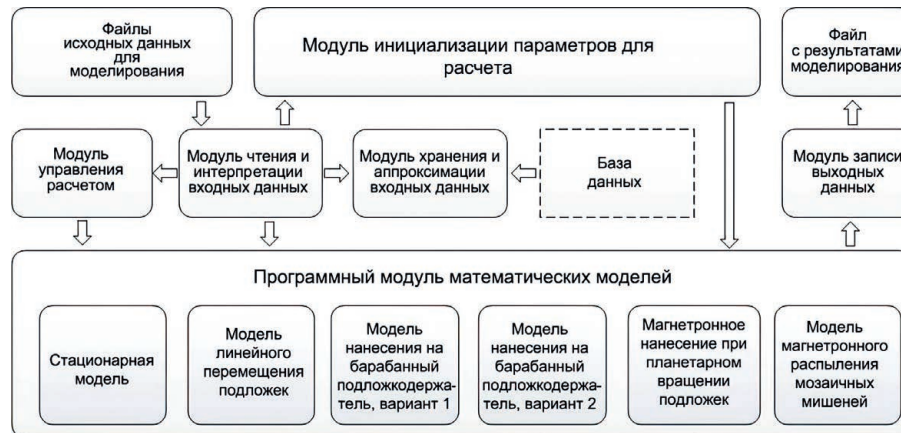


Рис. 8. Структура программного комплекса Deposition для моделирования нанесения тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления
Fig. 8. Structure of the software package Deposition for modeling thin film coating by magnetron sputtering

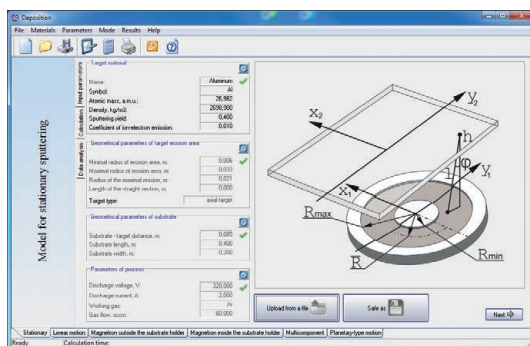


Рис. 9. Диалоговое окно ввода данных программного блока «Стационарный»
Fig. 9. Dialog window for input data program block “Stationary”

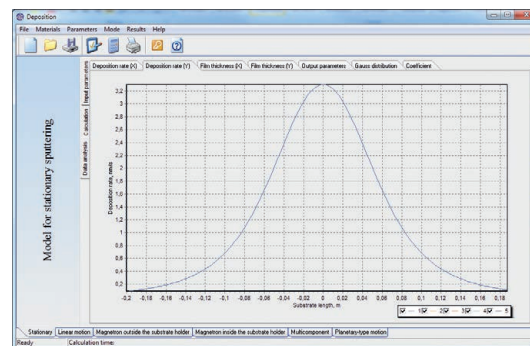


Рис. 10. Результаты расчета распределения скорости нанесения при использовании блока «Стационарный»
Fig. 10. Results of calculation of deposition rate distribution when using program block “Stationary”

Заключение

1. В настоящее время в производстве полупроводниковых интегральных схем актуально применение кластерных систем для нанесения отдельных тонкопленочных слоев и их последовательностей. В БГУИР активно ведутся исследования по разработке модели распыления с применением магнетронных систем с вращающейся магнитной системой, когда обеспечивается высокий коэффициент использования материала мишени, и можно достичь оптимального баланса между объемом вырабатываемого материала мишени и требуемой равномерностью толщины пленки на подложке.

2. Перспективны, но требуют экспериментальной апробации при изготовлении реальных микро- и оптоэлектронных приборов, процессы прямого осаждения *low-k* диэлектриков и элементов оптических волноводов с низким коэффициентом преломления. Для синтеза фторуглеродных покрытий с использованием плазменных разрядов в углерод- и фторсодержащих газах наиболее часто применяются высокочастотные плазмохимическое осаждение, индуктивно-связанная плазма, импульсная плазма высокой плотности, которые требуют сложных блоков питания и согласования высокочастотной мощности. Применение торцевого холловского ускорителя и ускорителя с анодным слоем потенциально может упростить процесс осаждения и повысить его управляемость.

3. Экспериментальные результаты исследований режимов работы сверхвысокочастотного генератора в составе технологической установки плазменной обработки материалов, обеспечивающего непрерывный характер формирования сверхвысокочастотного разряда, указывают на перспективность данных решений применительно к задачам модификации существующих и разработке новых эффективных сверхвысокочастотных вакуумно-плазменных процессов и оборудования для их работы в непрерывном режиме.

Литература

1. Kelly, P. J. Magnetron Sputtering: A Review of Recent Developments and Applications / P. J. Kelly, R. D. Arnell // *Vacuum*. 2000. Vol. 56. P. 159–172.
2. Sproul, W. D. High-Rate Reactive DC Magnetron Sputtering of Oxide and Nitride Superlattice Coatings / W. D. Sproul // *Vacuum*. 1998. Vol. 51, No 4. P. 641–646.
3. Технологические процессы и системы в микроэлектронике / А. П. Достанко [и др.]. Минск: Бестпринт, 2009.
4. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники / А. П. Достанко. Минск: Бестпринт, 2011.
5. Chapman, B. Glow Discharge Processes / B. Chapman. NY: Wiley, 1980.
6. Tachi, Sh. Impact of Plasma Processing on Integrated Circuit Technology Migration: From 1 mm to 100 nm and Beyond / Sh. Tachi // *Journal of Vacuum Science Technology*. 2003. Vol. 21, No 5. P. S131–S138.
7. Dielectric Properties of the Ion Beam Deposited SiO_x Doped DLC Films / Š. Meškiniš [et al.] // *Material Sci.* 2009. Vol. 15, No 1. P. 3–6.
8. Телеш, Е. В. Применение вторичного разряда в ускорителе с анодным слоем для формирования оптических покрытий из диоксида кремния / Е. В. Телеш, А. П. Достанко // *Контенант*. 2014. Т. 13, № 2. С. 31–33.
9. Телеш, Е. В. Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных пучков / Е. В. Телеш, Н. К. Касинский // *Контенант*. 2014. Т. 1, № 2. С. 27–30.
10. Телеш, Е. В. Оптические характеристики тонких пленок диоксида кремния, полученных прямым осаждением из ионных пучков / Е. В. Телеш, А. П. Достанко, А. Ю. Вашуров // *Доклады БГУИР*. 2015. № 8. С. 81–85.
11. Tsikhan, O. I. Study of Pulsed and Continuous Modes of Microwave Discharge Plasma Generation on a Resonator-Type Plasmatron / O. I. Tsikhan, S. I. Madveika, S. V. Bordusau // *High Temperature Material Processes*. 2021. Vol. 25, No 2. P. 65–75.
12. Регулируемый трехфазный источник питания, работающего на плазменную нагрузку СВЧ магнетрона: полез. модель ВУ 13119 / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов. Опубл. 28.02.2023.
13. Тихон, О. И. Исследование влияния электрических параметров импульсного источника питания СВЧ магнетрона на режимы генерации плазмы СВЧ разряда / О. И. Тихон, С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов // *Проблемы физики, математики и техники*. 2022. Т. 52, № 3. С. 42–47.
14. Данилин, Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов / Б. С. Данилин, В. Ю. Киреев. М.: Энергоатомиздат, 1987.
15. Плазменная технология в производстве СБИС, пер. с англ. / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. М.: Мир, 1987.
16. Fonash, S. J. Plasma Processing Damage in Etching and Deposition / S. J. Fonash // *IBM J. Res. Develop.* 1999. Vol. 43, No 12. P. 103–106.
17. Голосов, Д. А. Сквозное моделирование процессов нанесения покрытий при магнетронном распылении / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика*. 2013. № 4. С. 75–82.

References

1. Kelly P. J., Arnell R. D. (2000) Magnetron Sputtering: A Review of Recent Developments and Applications. *Vacuum*. 56, 159–172.
2. Sproul W. D. (1998) High-Rate Reactive DC Magnetron Sputtering of Oxide and Nitride Superlattice Coatings. *Vacuum*. 51 (4), 641–646.
3. Dostanko A. P., Zalessky V. G., Rusetsky A. M., Lanin V. L., Petukhov I. B., Golosov D. A., et al. (2009) *Technological Processes and Systems in Microelectronics: Plasma, Elektron-Ion-Beam, Ultrasonic*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
4. Dostanko A. P., Rusetsky A. M., Bordusov S. V., Lanin V. L., Anufriev L. P., Karpovich S. V. (2011) *Electrophysical Processes and Equipment in Micro- and Nanoelectronics Technology*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
5. Chapman B. (1980) *Glow Discharge Processes*. NY, Wiley Publ.

6. Tachi Sh. (2003) Impact of Plasma Processing on Integrated Circuit Technology Migration: From 1 mm to 100 nm and Beyond. *Journal of Vacuum Science Technology*. 21 (5), S131–S138.
7. Meškiniš Š., Gudaitis R., Tamulevičius S., Kopustinskias V., Andrulevičius M. (2009) Dielectric Properties of the Ion Beam Deposited SiO_x Doped DLC Films. *Material Sci.* 15 (1), 3–6.
8. Telesh E. V., Dostanko A. P. (2014) Application of a Secondary Discharge in an Accelerator with an Anode Layer for the Formation of Optical Coatings from Silicon Dioxide. *Contentant*. 13 (2), 31–33 (in Russian).
9. Telesh E. V., Kasinsky N. K. (2014) Formation of Optical Coatings by Direct Deposition from Ion Beams. *Contentant*. 1 (2), 27–30 (in Russian).
10. Telesh E. V., Dostanko A. P., Vashurov A. Y. (2015) Optical Performances of Silicon Dioxide Thin Films Received by Direct Deposition from Ion Beams. *Doklady BGUIR*. 8 (94), 81–85 (in Russian).
11. Tsikhan O. I., Madveika S. I., Bordusau S. V. (2021) Study of Pulsed and Continuous Modes of Microwave Discharge Plasma Generation on a Resonator-Type Plasmatron. *High Temperature Material Processes*. 25 (2), 65–75.
12. Tsikhan O. I., Madveika S. I., Bordusau S. V. (2023) *Adjustable Three-Phase Power Supply for a Microwave Magnetron Operating on a Plasma Load*. Useful. Model BY. Published 28.02.2023 (in Russian).
13. Tsikhan O. I., Madveika S. I., Bordusau S. V. (2022) The Study of the Microwave Magnetron Pulse Power Supply Electrical Parameters Influence on the Microwave Discharge Plasma Generation Modes. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 52 (3), 42–47 (in Russian).
14. Danilin B. S., Kireev V. Yu. (1987) *Application of Low-Temperature Plasma for Etching and Cleaning of Materials*. Moscow, Energoatomizdat Publ. (in Russian).
15. Einspruck N., Brown D. (ed.) (1987) *Plasma Technology in VLSI Production*. Moscow, Mir Publ. (in Russian).
16. Fonash S. J. (1999) Plasma Processing Damage in Etching and Deposition. *IBM J. Res. Develop.* 43 (12), 103–106.
17. Golosov D. A., Zavadsky S. M., Melnikov S. N. (2013) End-to-End Modeling of Coating Processes Using Magnetron Sputtering. *Vestnik of Polotsk State University. Series S: Fundamental Sciences. Physics*. (4), 75–82 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Достанко А. П., акад. Национальной академии наук Беларуси, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. Центра «Ионно-плазменные системы и технологии» (Центр 2.1) НИЧ, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Мадвейко С. И., канд. техн. наук, доц., зав. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Телеш Е. В., ст. препод. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Мельников С. Н., канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Центра 2.1 НИЧ, БГУИР

Завадский С. М., канд. техн. наук, доц., нач. Центра 2.1 НИЧ, БГУИР

Голосов Д. А., канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр. Центра 2.1 НИЧ, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-80-79
E-mail: szavad@bsuir.by
Завадский Сергей Михайлович

Information about the authors

Dostanko A. P., Academician at the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Principal Researcher at the Center “Ion Plasma Systems and Technologies” (Center 2.1) of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Madveyko S. I., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Telesh E. V., Senior Lecturer at the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Melnikov S. N., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Center 2.1 of R&D Department, BSUIR

Zavadski S. M., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Center 2.1 of R&D Department, BSUIR

Golosov D. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the Center 2.1 of R&D Department, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-80-79
E-mail: szavad@bsuir.by
Zavadski Sergey Mikhaylovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-32-41>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ АНТЕННЫХ СИСТЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

С. В. КОЗЛОВ, Д. А. КОВАЛЕВИЧ, Н. И. ЛИСТОПАД

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 30.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. В статье обобщены наиболее значимые результаты исследований по созданию антенных систем средств подвижной радиосвязи и радиолокации, проведенных на кафедре информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за последнее десятилетие. Рассмотрены новые алгоритмы функционирования антенных согласующих устройств средств подвижной радиосвязи ВЧ-диапазона длин волн, особенности построения субапертурных антенных решеток средств радиолокации с широкополосными зондирующими сигналами и алгоритмы обработки сигналов обнаружителей-измерителей угловых координат воздушных объектов с многоканальной антенной системой. Предложены перспективные направления исследований по указанной тематике.

Ключевые слова: апертура, антенная решетка, многоканальная антенная система, широкополосный сигнал, цифровое диаграммообразование, согласующее устройство, импеданс, временная задержка.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Козлов, С. В. Основные результаты и направления исследований по созданию антенных систем перспективных радиоэлектронных средств / С. В. Козлов, Д. А. Ковалевич, Н. И. Листопад // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 32–41. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-32-41>.

MAIN RESULTS AND DIRECTIONS OF RESEARCH ON THE CREATION OF ANTENNA SYSTEMS FOR ADVANCED RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

SERGEI V. KOZLOV, DMITRY A. KOVALEVICH, NIKOLAI I. LISTOPAD

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 30.01.2024

Abstract. The review article summarizes the most significant results of research on the creation of antenna systems for mobile radio communications and radar, carried out at the Department of Information Radio Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics over the last decade. New algorithms for the functioning of antenna matching devices for mobile radio communications in the VHF wavelength range, features of the construction of sub-aperture antenna arrays for radar equipment with broadband probing signals, and algorithms for processing signals in detectors-measurers of the angular coordinates of air objects with a multi-channel antenna system are considered. Promising areas of research on this topic are proposed.

Keywords: aperture, antenna array, multi-channel antenna system, wideband signal, digital beamforming, matching device, impedance, time delay.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kozlov S. V., Kovalevich D. A., Listopad N. I. (2024) Main Results and Directions of Research on the Creation of Antenna Systems for Advanced Radio-Electronic Equipment. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 32–41. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-32-41> (in Russian).

Введение

Одним из основных путей увеличения информационных возможностей и улучшения технических характеристик радиоэлектронных средств (РЭС) является совершенствование их антенных систем. Наиболее актуальны на настоящем этапе направления, связанные с созданием антенн ВЧ-диапазона для подвижных средств радиосвязи и широкополосных многоканальных антенных систем с цифровым диаграммообразованием (ЦДО) при электронном и механическом сканировании для средств радиолокации и радиомониторинга. Проблемные вопросы при создании указанных средств связаны с обеспечением быстродействующего согласования антенн с выходным каскадом передатчика или входным каскадом приемника средств радиосвязи, работающих в широкой полосе частот. Рассмотрены вопросы реализации алгоритмов ЦДО системы основных приемных каналов с устранением временных задержек широкополосного сигнала по апертуре с одновременной пространственной компенсацией мешающих источников излучения (МИИ) и обоснованием способов совместного обнаружения-измерения угловых координат радиосигналов в многоканальной приемной системе. В статье приведены отдельные результаты, полученные сотрудниками кафедры информационных радиотехнологий БГУИР по указанным направлениям.

Разработка автоматических согласующих устройств

Особое место при проектировании РЭС занимают антенны ВЧ-диапазона, широко применяемые в подвижных средствах радиосвязи. Эти антенны могут работать как в движении, так и в стационарном режиме. Антенны для работы в движении могут устанавливаться непосредственно на подвижных объектах, способных изменять свое географическое местоположение: антенны судовых радиостанций, самолетные антенны, антенны, размещаемые на корпусе бронетехники, и антенны мобильных тактических радиостанций. Антенны для работы в стационарном режиме имеют более высокую эффективность, но, как правило, обладают значительными линейными размерами. Анализ [1–3] позволяет выделить следующие основные виды мобильных антенн, используемых для работы в ВЧ-диапазоне: штыревая, типа «наклонный луч», наклонный симметричный вибратор (диполь), Т-образная, наклонная V-образная, антенна зенитного излучения, бегущей волны, λ -образная. Такое количество антенн обусловлено спецификой применения каждой из них – диаграммой направленности, эффективностью функционирования и размерами [3].

Одним из главных элементов, обеспечивающих эффективное функционирование антенной системы РЭС, является согласующее устройство между самой антенной и основным трактом РЭС. Для эффективной передачи/приема информации согласующие устройства должны быть идеально согласованы как с самой антенной системой, так и с устройствами формирования/приема радиосигналов. При проектировании согласующих устройств важные требования – тип используемых антенн, зависимости их импеданса и коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты. Именно эти требования обуславливают выбор согласующей цепочки и номиналы входящих в состав антенны элементов.

Зависимости импедансных характеристик и КСВ от частоты для штыревой антенны, как наиболее распространенной для радиостанций ВЧ-диапазона, представлены на рис. 1, а на рис. 2 – для антенны типа «наклонный луч». Более подробную информацию о частотных характеристиках других типов антенн можно найти в [4]. В результате анализа основных параметров различных мобильных антенн ВЧ-диапазона можно сделать вывод, что зависимости входного сопротивления (активного и реактивного), а также КСВ от частоты имеют сложный вид. Поэтому использование таких антенн без согласующих устройств (СУ) не представляется возможным. Именно СУ, учитывающие изменения в работе РЭС с учетом условий эксплуатации, наиболее эффективны при функционировании радиосредств ВЧ-диапазона. В рамках исследований сформулирована следующая гипотеза: существует практическая возможность реализации процесса автоматического согласования передатчика (приемника) с антенной в беспойском режиме за счет проведения соответствующих вычислений и наличия априорной информации о параметрах радиотехнических элементов, входящих в состав согласующего устройства [5].

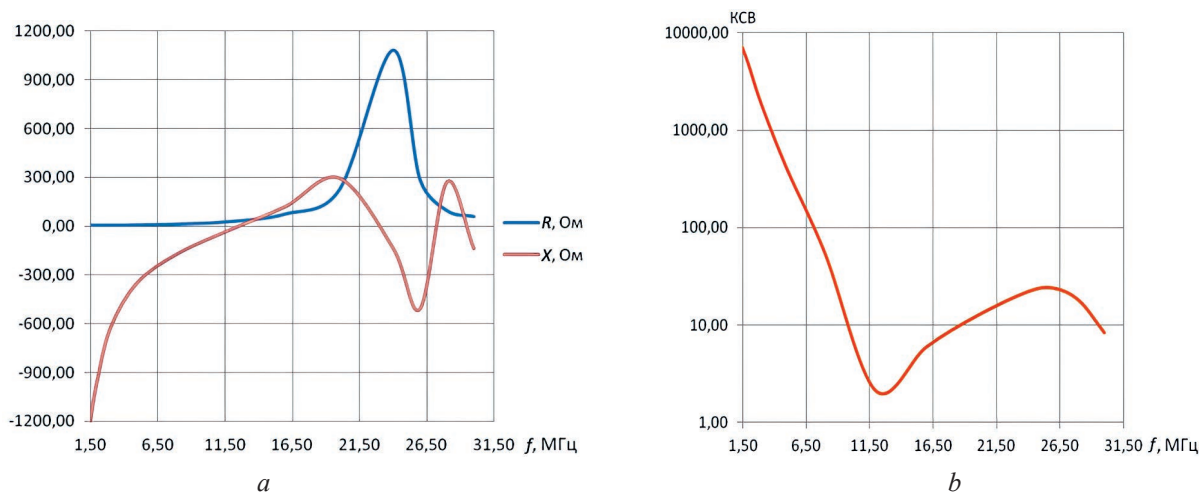


Рис. 1. Зависимость активного и реактивного сопротивлений (a) и коэффициента стоячей волны (b) антенны АШ-4 от частоты
Fig. 1. Dependence of active and reactive resistance (a) and standing wave ratio (b) of the ASh-4 antenna on frequency

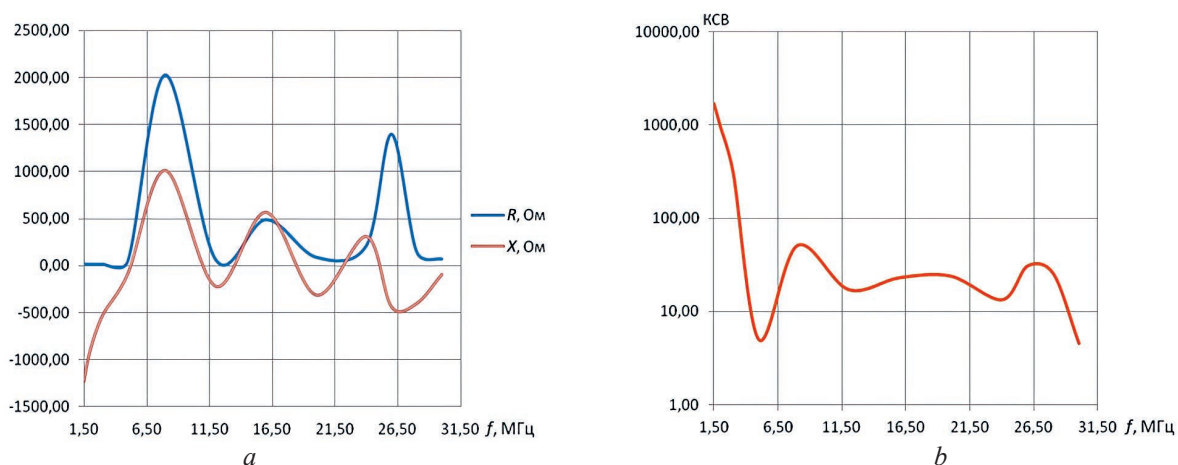


Рис. 2. Зависимость активного и реактивного сопротивлений (a) и коэффициента стоячей волны (b) антенны типа «наклонный луч» от частоты
Fig. 2. Dependence of the active and reactive resistance (a) and standing wave ratio (b) of type “slant beam” from frequency

При проектировании любого СУ стоит задача выбора способа автоматического согласования. Именно он определяет множество эксплуатационных параметров СУ, таких как качество согласования, время настройки, ресурс устройства. Выбор того или иного метода определяет требования к аппаратной части устройства. От него зависят динамический диапазон и погрешность измерителей, сложность и производительность вычислительной части управляющего устройства, необходимый объем априорной информации об элементах согласующей цепи (СЦ).

Наиболее широкое распространение получили способы настройки поискового типа. Обосновать такое распространение можно следующим образом. Во-первых, использование данного подхода не предъявляет высоких требований к измерителям электрических параметров. Во-вторых, вычислительная часть управляющего устройства настолько упрощается, что может быть реализована даже без применения микроконтроллера. Для поискового метода качество согласования достигает предельного возможного значения, определяемого точностью (дискретностью) установки номиналов элементов СЦ.

Однако поисковые способы обладают и недостатками, самым существенным из которых является большая длительность процесса согласования. В случае, если радиостанция поддерживает работу в сетях с автономным установлением связи (АУС) и псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), настройка антенны при развертывании антенного поля подвижного пункта связи поисковым способом становится проблематичной, так как время настройки может превос-

ходить время ведения связи. В этой ситуации применение комбинированного метода (поискового и расчетного) с целью ограничения диапазона изменения номиналов реактивных элементов СЦ позволяет уменьшить время поиска в несколько раз, но все же выигрыш может быть получен не для всех нагрузок и рабочих частот. Например, для электрически коротких антенн в нижней части коротковолнового диапазона нельзя исключить ни старшие разряды элементов СЦ, так как рабочая частота достаточно низкая, ни младшие, поскольку добротность антенны довольно велика [4].

На основании проведенного анализа наибольший интерес представляет расчетный метод согласования. Скорость настройки антенны на текущей рабочей частоте при его использовании ограничена только временем однократной смены состояния дискретного набора, что в случае применения электромагнитных реле численно равно их времени переключения из одного состояния в другое. В случае же осуществления предварительной настройки антенны на наборе частот (для каналов АУС либо ППРЧ) скорость настройки будет определяться только временем, необходимым на перестройку частоты, осуществление измерений и выполнение расчетов.

Основными механизмами, ограничивающими качество согласования при использовании аналитического расчета номиналов элементов СЦ, являются: ошибки измерения параметров антенны, ошибки установки рассчитанных значений номиналов элементов СЦ, наличие неучтенных в расчетах паразитных параметров элементов СЦ. Решить проблему точности установки номиналов можно применением следующего подхода: фактические значения номиналов разрядов дискретных наборов элементов СЦ определяются при помощи встроенных измерителей СУ после сборки устройства и сохраняются в энергонезависимой памяти, а установка номиналов осуществляется с учетом фактических значений емкости и индуктивности разрядов. Основные паразитные параметры элементов, которые снижают результативность расчетного метода согласования, – это активные потери в индуктивных элементах СЦ, емкость между катушками индуктивности и корпусом СУ, индуктивность подключения конденсаторов. Именно наличие паразитных параметров, не учтенных в расчетах номиналов элементов СЦ, не позволяет достичь требуемого качества согласования. Учет их в расчетах потребует решения системы дифференциальных уравнений численными методами, что предъявляет высокие требования к производительности управляющего устройства, входящего в состав СУ. Это обуславливает необходимость поиска новых эффективных подходов и методов автоматического согласования.

Для оценки работоспособности какой-либо сложной системы до момента ее реализации часто используется моделирование, что значительно ускоряет и удешевляет процесс разработки. Такой подход неоднократно применялся при анализе качественных показателей проектируемых СУ [5]. Поскольку качество согласования с применением различных реализаций итерационного поиска достаточно высокое, существует возможность смоделировать такой процесс согласования [4] с применением его результатов для управления состоянием дискретных элементов СЦ – при каждой смене состояния производится оценка результативности СЦ при помощи схемотехнической модели, т. е. предлагается новый подход к согласованию – виртуальный поиск [5]. Он позволяет существенно снизить время настройки (приблизительно в 21 раз для антенны типа АШ-4), при этом незначительно проигрывая в качестве по сравнению с поразрядным поиском.

Для практического применения предложенного подхода необходимо разработать схемотехническую модель аппаратной части СУ, используя схемы замещения элементов СЦ. Необходимость создания подобной модели обусловлена тем, что при конструировании СУ применяются не идеальные, а реальные реактивные элементы. В рамках такой модели можно изменять состояние дискретных наборов катушек индуктивности и конденсаторов, тем самым изменяя эквивалентную схему четырехполюсника, образованную элементами СЦ. На ее основании можно рассчитывать результирующий иммитанс на входе СУ по известному иммитансу антенны [4, 5].

Предлагается решение, использующее трансформирующий элемент при проведении измерений для уменьшения реактивного сопротивления (проводимости) антенны и, как следствие, позволяющее снизить требования к точности измерителей до необходимого уровня. При возникновении ситуации, когда измеренный иммитанс антенны не дает возможности использовать полученное значение в расчетах из-за погрешности измерителя, производятся предварительный расчет номинала трансформирующего элемента и включение необходимого числа старших разрядов дискретного набора в соответствии с выражениями, представленными в [5]. После чего определяется состояние оставшихся младших разрядов, при этом состояние старших уже не изменяется. Рассматриваемый метод учета погрешности измерителей [5] пригоден для любого рас-

четного способа согласования. В случае использования виртуального поиска предлагается интегрировать этот механизм в сам способ согласования. Выполнена экспериментальная проверка различных способов согласования с применением аппаратного макета СУ и эквивалента антенны типа АШ-4 [5], которая подтвердила, что предложенный подход к согласованию в виде виртуального поиска обладает достоинствами поискового и расчетного способов согласования, при этом лишен их недостатков.

Особенности решения задачи цифрового диаграммообразования в широкополосных субапертурных антенных решетках

Одним из важных направлений повышения информационных возможностей радиолокационных средств является повышение разрешающей способности по дальности за счет увеличения ширины спектра зондирующих сигналов (ЗС). Наиболее характерным примером являются радиолокационные станции с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования, ширина Δf_0 спектра ЗС которых в настоящее время может достигать 300 МГц с тенденцией увеличения до 1200 МГц [6]. Использование широкополосного сигнала резко увеличивает вероятность нарушения электромагнитной совместимости с другими радиоэлектронными средствами, играющими роль МИИ. Поскольку доля широкополосных (сотни мегагерц) РЭС в настоящее время невелика, а подавляющая часть РЭС использует относительно узкополосные сигналы с шириной спектра $\Delta f_{\text{МИИ}} = 1\text{--}10$ МГц, то для сигналов таких МИИ условие пространственно-временной узкополосности будет выполняться. Это создает предпосылки для эффективного использования методов компенсации сигналов в пространственной области.

Основные требования к антенным системам современных и перспективных средств радиолокации включают обеспечение высокого коэффициента усиления, реализацию широкоугольного электронного сканирования на передачу и прием при использовании широкополосного зондирующего сигнала и эффективных процедур режекции помех в пространственной и (или) поляризационных областях. Эти требования противоречивы: высокий коэффициент усиления достигается при соответствующих размерах антенны, что затрудняет электронное сканирование как с учетом широкополосности полезных сигналов, так и с учетом известного явления «ослепления» фазированной антенной решеткой, когда реактивная составляющая ее импеданса на определенных углах наблюдения и (или) частотах резко возрастает [7]. Основным вариантом преодоления указанного противоречия является переход к субапертурным (модульным) антенным решеткам (АР). Такие решетки конструктивно выполнены из подрешеток (субапертур, модулей), размеры $L_{\text{пр}}$ которых по соответствующей координате выбираются исходя из выполнения условий пространственно-временной узкополосности $L_{\text{пр}} \sin \theta_{\text{max}} / c \ll 1 / \Delta f_0$, где θ_{max} – максимальный угол наблюдения по отношению к нормали подрешетки, а также исходя из отсутствия явления «ослепления». Для всей АР, состоящей из $N_{\text{пр}}$ подрешеток, условия пространственно-временной узкополосности не выполняются: $N_{\text{пр}} L_{\text{пр}} \sin \theta_{\text{max}} / c \approx 1 / \Delta f_0$. Характерным примером являются крупноапертурные решетки космических РСА, типовая геометрия наблюдения в которых приведена на рис. 3.

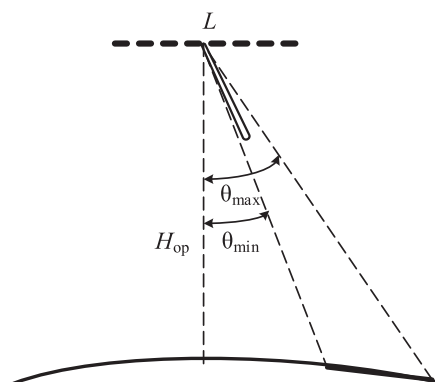


Рис. 3. Геометрия наблюдения в радиолокационных станциях с синтезированием апертуры космического базирования

Fig. 3. Observation geometry in space-based synthetic aperture radar stations

Высота орбиты РСА составляет $H_{ор}$, нормаль AP ориентирована в надир, угол θ отклонения от надира может принимать значения от 20° до 50° справа и слева от линии пути, что обеспечивает двусторонний обзор без поворота корпуса космического аппарата. Длина AP в угломестной плоскости составляет L , что приводит к разности задержек сигнала между крайними точками AP при распространении сигнала в одном направлении на величину $\Delta\tau = L\sin\theta/c$, где c – скорость света. В частности, при $L = 0,7$ м и $\theta = 45^\circ$ получим $\Delta\tau = 1,7$ нс. Для ЗС с шириной спектра 600 МГц ширина главного лепестка функции рассогласования также составит 1,7 нс, т. е. условия пространственно-временной узкополосности не выполняются. Это приводит к «размыванию» огибающей широкополосного сигнала на выходе согласованного фильтра (СФ) и уменьшению амплитуды сигнала. Данная ситуация приведена на рис. 4, где показаны амплитудные огибающие сигнала от точечной цели на выходе СФ при наличии выравнивания временных задержек (сплошная кривая), выравнивания задержек только на передачу (точечная кривая) и при отсутствии выравнивания (пунктирная кривая) при $L = 0,7$ м, числе подрешеток $M = 8$, $H = 500$ км, $\theta = 50^\circ$.

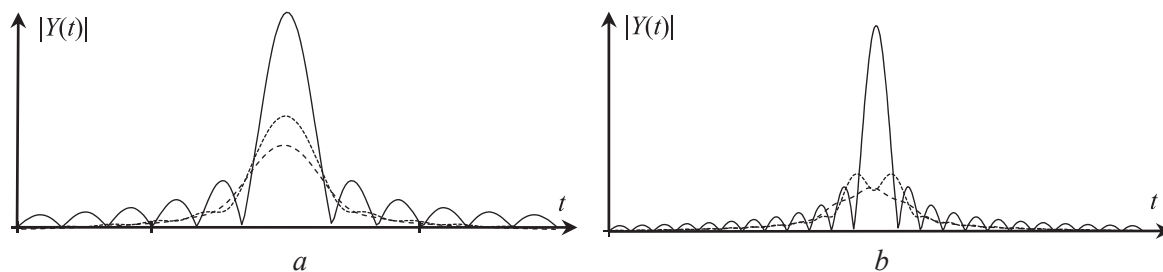


Рис. 4. Амплитудная огибающая сигнала при Δf_0 : а – 600 МГц; б – 1200 МГц
Fig. 4. Amplitude envelope signal at Δf_0 : а – 600 МГц; б – 1200 МГц

Предложенный в [8, 9] способ ЦДО для субапертурных решеток [4] с одновременной компенсацией МИИ на прием основан на использовании реализуемых средствами цифровой обработки сигналов управляемых линий задержки, выравнивающих временные сдвиги выходных сигналов подрешеток для направления прихода полезного сигнала, в сочетании с классическим фазовым методом управления угловым положением луча (рис. 5). Устранение временных задержек по апертуре и последующее ЦДО на прием с компенсацией сигналов МИИ выполняются в спектральной области. Для этого над отсчетами выходных сигналов подрешеток осуществляется операция быстрого преобразования Фурье, для заданного направления наблюдения вычисляются временные сдвиги полезного сигнала по апертуре и выполняется их компенсация на основе теоремы о сдвиге путем умножения спектров сигналов каждой подрешетки на соответствующие фазовые множители. При этом соответствующие временные сдвиги получают и сигналы МИИ на выходах подрешеток, что приводит к некоторому снижению эффективности их последующей пространственной компенсации. Однако, поскольку сигналы МИИ предполагаются относительно узкополосными, т. е. $\tau \ll 1/\Delta f_{МИИ}$, снижение эффективности пространственной компенсации будет незначительным. Оценка векторов весовых коэффициентов (ВВК) для формирования системы основных приемных каналов (суммарного и разностных или интерферометрических с разнесенными фазовыми центрами) может проводиться любым из известных методов с использованием критериев максимума отношения сигнал/шум или линейно-ограниченных алгоритмов адаптации.

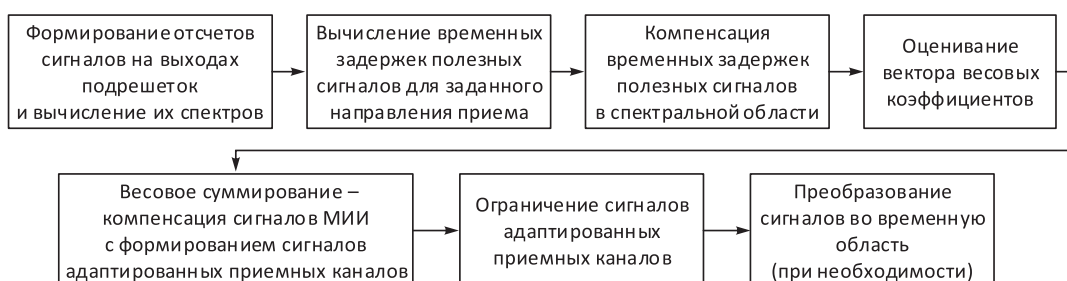


Рис. 5. Блок-схема алгоритма обработки сигналов
в широкополосной субапертурной антенной решетке на прием

Fig. 5. Block diagram of the signal processing algorithm in a broadband sub-aperture antenna array for reception

Ограничение сигналов адаптированных приемных каналов после ЦДО является специфической особенностью широкополосных приемных систем. Его необходимость связана с тем, что длительность фронта сигнала МИИ может быть сравнима с временной задержкой сигнала между подрешетками. В этом случае на выходе ЦДО при большой (на 40–50 дБ выше уровня собственных шумов) мощности МИИ возникнет сильный, но кратковременный нескомпенсированный выброс сигнала МИИ. Включение ограничителя устраняет указанный выброс аналогично схеме ШОУ – «широкополосное усиление – ограничение – узкополосное усиление». Устранение временных задержек в подрешетках на передачу существенно проще и реализуется в процессе прямого цифрового синтеза (DDS) ЗС за счет расчета временных задержек для заданной геометрии наблюдения и коррекции временного представления сигнала в схемах DDS подрешеток.

Приведенный на рис. 5 способ обработки является конкурирующим как минимум с двумя известными способами обработки. В первом из них узкополосный сигнал (или сигналы) МИИ может быть режектирован в частотной области путем оценивания его спектральных параметров (центральной частоты и ширины спектра) и настройки соответствующих режекторных фильтров, что, очевидно, является достаточно трудоемким и не решает проблемы устранения временных задержек полезного сигнала между подрешетками. Во втором, классическом, способе обработки вся полоса частот полезного сигнала разбивается на субполосы исходя из условия пространственно-временной узкополосности с последующим ЦДО в каждой из субполос и объединением результатов, что также весьма трудоемко. Результаты [8, 9] моделирования предложенного способа свидетельствуют о возможности эффективного ЦДО в широкополосной субапертурной антенной решетке с широкоугольным сканированием с одновременной компенсацией мешающих источников излучений.

Квазиоптимальные алгоритмы совместного обнаружения-измерения угловых координат в многоканальной приемной системе с механическим сканированием

В радиолокационных средствах и некоторых средствах радионавигации и радиомониторинга широко используется механическое вращение (сканирование) антенной системы. Для защиты от помех применяются многоканальные антенные системы, состоящие из основной передающей антенны с коэффициентом усиления G_0 и $l = \overline{1, L}$ дополнительных (компенсационных) антенн с коэффициентами $G_l \ll G_0$. Для такой многоканальной приемной системы для сигналов с постоянной амплитудой могут быть использованы оптимальные алгоритмы совместного обнаружения-измерения угловых координат целей, предполагающие перебор с заданной дискретностью всех возможных гипотез об угловой координате α цели, вычисление оптимальных ВВК и решающих статистик с их последующей максимизацией. Такие алгоритмы очень трудоемки, в связи с чем особый интерес представляют квазиоптимальные алгоритмы обработки. Общая идея построения таких алгоритмов основана на «обелении» помех в пространственной области путем адаптивного ЦДО в пределах каждого периода повторения безотносительно к возможному угловому положению цели α , на последующем «обелении» сформированной реализации во временной области и согласованной фильтрации измененного в процессе компенсации помех полезного сигнала [10, 11].

Пусть в пределах $i = \overline{1, I}$ периодов повторения сформированы ВВК приемных каналов ω_i и отсчеты сигналов адаптированного канала для ожидаемого времени задержки отраженного сигнала

$$\dot{Y}_{ai} = \omega_i^+ y_i = \omega_i^+ (y_{сш_i} + y_{п_i}) + \omega_i^+ y_{с_i}, \quad (1)$$

где $y_i = y_{сш_i} + y_{п_i} + y_{с_i}$ – вектор отсчетов сигналов приемных каналов, включающий векторы собственных шумов, помех и полезного сигнала соответственно.

Мощность взвешенных внутренних шумов и нескомпенсированных остатков внешних помех запишется в виде

$$P_{ш+п_i} = \omega_i^+ \left(\sigma_{сш}^2 \mathbf{I} + \Phi_{п_i} \right) \omega_i, \quad (2)$$

где $\sigma_{сш}^2$ – мощность внутренних шумов приемных каналов; $\Phi_{п_i} = \overline{y_{п_i} y_{п_i}^+}$ – корреляционная матрица (КМ) внешних помех.

Мощность $P_{ш+п_i}$ не стационарна из-за сканирования антенны. Взвешенные шумы и нескомпенсированные остатки помех являются некоррелированными от периода к периоду. В соответствии с принципами обработки на фоне «небелого» шума формирование функции правдоподоб-

бия предполагает операции «обеления» суммы мощности взвешенных шумов и некомпенсированных остатков помех во временной области путем деления отсчетов на величину $\sqrt{P_{\text{ш+п}_i}}$ с последующей согласованной обработкой измененного полезного сигнала. В качестве оценки мощности взвешенных шумов и некомпенсированных остатков помех принимается величина

$$\hat{P}_{\text{ш+п}_i} = \mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i, \quad (3)$$

где $\hat{\Phi}_i$ – оценка КМ процессов на выходах приемных каналов.

Для классифицированной выборки формула (3) является оценкой максимального правдоподобия, для неклассифицированной – формула (3) смещена на величину доли мощности полезного сигнала, попадающей в КМ. После операции «обеления» во временной области имеем

$$\dot{Z}_i = \frac{\dot{Y}_{ai}}{\sqrt{\mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i}}. \quad (4)$$

Отсчеты измененного опорного сигнала с произвольной амплитудой U и нулевой начальной фазой, принимаемого с направления α , будут иметь вид

$$\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha) = \frac{U \dot{F}_0^*(\alpha_{ai} - \alpha) \mathbf{\omega}_i^+ \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha)}{\sqrt{\mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i}}, \quad (5)$$

где α_{ai} – угловое положение антенны в i -м периоде повторения.

Согласно (5), цели, находящиеся на различных угловых направлениях α , порождают на выходе системы обработки различные последовательности отсчетов (сигналы) $\mathbf{z}_{\text{оп}}(\alpha) = (\dot{Z}_{\text{оп}_1}(\alpha), \dot{Z}_{\text{оп}_2}(\alpha), \dots, \dot{Z}_{\text{оп}_I}(\alpha))^T$. В этой связи задачу оптимальной оценки азимута цели можно трактовать как задачу различения непрерывного континуума гипотез о наличии в принимаемой реализации сигналов (последовательности отсчетов) со случайной начальной фазой и формой (5). Для упрощения структуры решающего устройства потребуем, чтобы мощности опорных сигналов были фиксированы $\sum_i |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha)|^2 = \text{const}$, откуда для условной оценки амплитуды опорных сигналов получим:

$$U(\alpha) = \left(\sqrt{\sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha)|^2} \right)^{-1}. \quad (6)$$

С использованием классического решения задачи различения произвольного числа сигналов со случайной начальной фазой функция правдоподобия запишется как

$$\Psi(\alpha) = \frac{\left| \sum_{i=0}^I \frac{\dot{F}_0^*(\alpha_{ai} - \alpha) \mathbf{\omega}_i^+ \mathbf{y}_i \mathbf{s}^+(\alpha_{ai} - \alpha) \mathbf{\omega}_i}{\mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i} \right|}{\sqrt{\sum_{i=0}^I \frac{|\dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha)|^2 |\mathbf{\omega}_i^+ \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha)|^2}{\mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i}}} \quad (7)$$

с оценкой угловой координаты

$$\hat{\alpha} = \arg \max_{\alpha} \Psi(\alpha). \quad (8)$$

Иллюстрация процессов при преобразовании сигнала для квазиоптимального алгоритма для одной из реализаций приведена на рис. 6. Зависимости построены при нормированном к ширине главного лепестка основного канала различии угловых положений цели α_c и помехи α_n 0,5, максимальных отношениях сигнал/шум по одному импульсу пачки и помеха/шум 8,4 и 50,0 дБ соответственно. Определение факта наличия и углового положения полезного сигнала по реализациям до и после пространственной компенсации внешних помех невозможно. После операции временного «обеления» наличие полезного сигнала и его ориентировочные угловые координаты достаточно хорошо определяются визуально.

Приведенный подход к квазиоптимальной обработке был развит для случаев сигнала с флуктуирующей по закону Релея амплитудой и двухэтапной обработкой с предварительным оцениванием параметров мешающих отражений и дополнительным учетом изменений их фазовой структуры в процессе ЦДО [10].

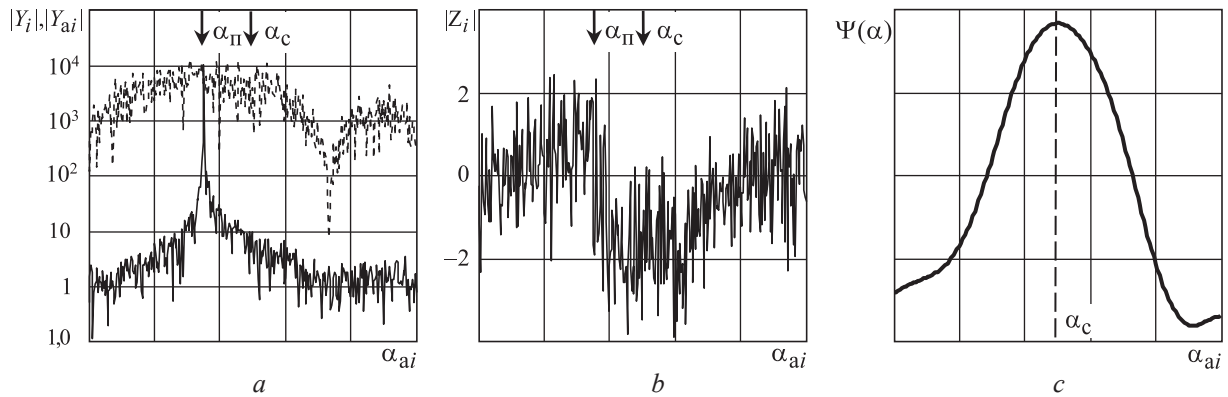


Рис. 6. Иллюстрация квазиоптимального алгоритма: *a* – модули сигналов на выходе основной антенны (пунктир) и после цифрового диаграммообразования (сплошная кривая); *b* – синфазный компонент сигнала на выходе цифрового диаграммообразования после временного «обеления»; *c* – решающая статистика

Fig. 6. Illustration of the quasi-optimal algorithm: *a* – signal modules at the output of the main antenna (dotted line) and after the central distribution center (solid curve); *b* – in-phase component of the signal at the output of the digital dispenser after temporary “whitening”; *c* – decisive statistic

Заключение

1. В результате проведенных исследований систематизированы различные подходы к проектированию согласующих устройств и выявлена их универсальная структура, позволяющая решить задачу согласования для типовых антенных систем ВЧ-диапазона.

2. Разработан новый беспойсковый метод автоматического согласования антенны с выходом передатчика (входом приемника), базирующийся на использовании схемотехнической модели согласующих устройств для осуществления итерационного поиска оптимального состояния элементов согласующей цепи с последующим использованием результатов моделирования для управления аппаратной частью устройства и позволяющий существенно снизить время настройки.

3. Полученные результаты могут быть использованы для построения антенных устройств перспективных радиоэлектронных средств. Планируемые основные направления дальнейших исследований по указанной тематике состоят:

- в обосновании быстродействующих многополосных согласующих устройств для антенн средств радиосвязи ВЧ-диапазона при изменении условий их функционирования с использованием методов адаптивного регулирования и нейронных сетей;
- в разработке методик совместной оптимизации согласующих устройств, способов цифрового диаграммообразования и обработки сигналов в антенных системах широкополосных радиоэлектронных средств;
- в разработке антенных элементов и получении практически реализуемых алгоритмов адаптивного цифрового диаграммообразования и пеленгации источников полезных сигналов в антенных системах с изменяемыми поляризационными характеристиками.

Список литературы

1. Листопад, Н. И. Оптимизация параметров мобильных антенн ВЧ-диапазона / Н. И. Листопад, Д. А. Ковалевич // Доклады БГУИР. 2018. № 6. С. 73–79.
2. Листопад, Н. И. Методика синтеза согласующих устройств для мобильных систем связи КВ-диапазона / Н. И. Листопад, Д. А. Ковалевич // Новости науки и технологий. 2020. № 4. С. 17–25.
3. Ковалевич, Д. А. Способ автоматического согласования антенны и выходных каскадов передатчика / Д. А. Ковалевич // Доклады БГУИР. 2021. № 3. С. 31–39.
4. Ковалевич, Д. А. Синтез требований к измерителю иммитанса для согласующих устройств расчетного типа / Д. А. Ковалевич // Новости науки и технологий. 2021. № 3. С. 29–38.
5. Ковалевич, Д. А. Использование расчетного способа согласования антенны с учетом конечной точности измерителя иммитанса / Д. А. Ковалевич // Известия Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. 2021. № 6. С. 134–140.
6. Алексева, А. М. О построении активных фазированных антенных решеток для космических радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого разрешения / А. М. Алексева, Т. М. Лепехина, В. Г. Поль // Вестник «НПО имени С. А. Лавочкина». 2022. № 1. С. 44–50.

7. Хансен, Р. С. Фазированные антенные решетки / Р. С. Хансен. М.: Техносфера, 2012.
8. Козлов, С. В. Цифровое диаграммообразование с компенсацией мешающих источников излучений в крупно-апертурной антенной решетке и широкополосном зондировании / С. В. Козлов, М. А. Лобан, В. В. Радионович // Новости науки и технологии. 2021. № 3. С. 14–22.
9. Козлов, С. В. Особенности цифрового диаграммообразования в субапертурных антенных решетках высокоинформативных космических радиолокаторов с синтезированием апертуры / С. В. Козлов, В. В. Радионович // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 70–74. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-70-74>.
10. Козлов, С. В. Оценивание угловых координат в обзорных радиолокационных станциях с подсистемами пространственной компенсации помех / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Доклады БГУИР. 2019. № 4. С. 48–56.
11. Козлов, С. В. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 11. С. 1–29. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.11.10.

References

1. Listopad N. I., Kovalevich D. A. (2018) Optimization of Parameters of Mobile Antennas in the HF Range. *Doklady BGUIR*. (6), 73–79 (in Russian).
2. Listopad N. I., Kovalevich D. A. (2020) Methodology for the Synthesis of Matching Devices for HF Mobile Communication Systems. *News of Science and Technology*. (4), 17–25 (in Russian).
3. Kovalevich D. A. (2021) A Method for Automatically Matching the Antenna and Transmitter Output Stages. *Doklady BGUIR*. (3), 31–39 (in Russian).
4. Kovalevich D. A. (2021) Synthesis of Requirements for an Immittance Meter for Calculation-Type Matching Devices. *News of Science and Technology*. (3), 29–38 (in Russian).
5. Kovalevich D. A. (2021) Using a Calculation Method for Matching the Antenna Taking into Account the Final Accuracy of the Immittance Meter. *News of Gomel State University named after Francis Skaryna*. (6), 134–140 (in Russian).
6. Alekseeva A. M., Lepehina T. M., Pol V. G. (2022) On the Construction of Active Phased Array Antennas for High-Resolution Synthetic Aperture Space Radars. *Bulletin "NPO named after S. A. Lavochkin"*. (1), 44–50 (in Russian).
7. Hansen R. S. (2012) *Phased Array Antennas*. Moscow, Tekhnosphere Publ. (in Russian).
8. Kozlov S. V., Loban M. A., Radionovich V. V. (2021) Digital Beamforming with Compensation of Interfering Radiation Sources in Large-Aperture Antenna Arrays and Broadband Sensing. *News Science and Technologies*. (3), 14–22 (in Russian).
9. Kozlov S. V., Radionovich V. V. (2023) Features of Digital Beamforming in Sub-Aperture Antenna Arrays of Highly Informative Space Radars with Synthetic Aperture. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 70–74. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-70-74> (in Russian).
10. Kozlov S. V., Vu Thanh Ha (2019) Estimation of Angular Coordinates in Surveillance Radar Stations with Spatial Interference Compensation Subsystems. *Doklady BGUIR*. (4), 48–56 (in Russian).
11. Kozlov S. V., Vu Thanh Ha (2019) Algorithms for Signal Processing in Radar Angular Coordinate Meters with a Scanning Multichannel Antenna System. *Journal of Radio Electronics*. (11), 1–29. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.11.10 (in Russian).

Сведения об авторах

Козлов С. В., д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Ковалевич Д. А., канд. техн. наук, доц. каф. информационных радиотехнологий, БГУИР

Листопад Н. И., д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных радиотехнологий, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-17
E-mail: listopad@bsuir.by
Листопад Николай Измайлович

Information about the authors

Kozlov S. V., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at Information Radiotechnologies Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Kovalevich D. A., Cand. of Sci., Associate Professor at Information Radiotechnologies Department, BSUIR

Listopad N. I., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of Information Radiotechnologies Department, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-17
E-mail: listopad@bsuir.by
Listopad Nikolai Izmailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-42-54>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.874; 537.624.9; 534.286

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ТЕХНОЛОГИЙ И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

В. А. БОГУШ, Л. М. ЛЫНЬКОВ, Н. В. НАСОНОВА, С. Л. ПРИЩЕПА, Е. С. БЕЛОУСОВА,
О. В. БОЙПРАВ, Г. В. ДАВЫДОВ, В. А. ПОПОВ, А. В. ПОТАПОВИЧ, Г. А. ПУХИР

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 31.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Представлены технологии изготовления электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе порошкообразного угля, фольгированных и композиционных многослойных материалов. Описаны технологические методы их изготовления, экранирующие свойства, рассмотрены основные механизмы, приводящие к усилению экранирующих свойств в зависимости от технологии изготовления, состава и чередования слоев композита. Показано, что значения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов, изготовленных в соответствии с представленными технологиями, достигают (–20) дБ. Разработаны радиопоглотители с характеристикой отражения менее (–10) дБ (до (–52) дБ) в диапазоне частот 8–12 ГГц, определены электрофизические параметры, состав и содержание компонентов композиционных материалов для таких радиопоглотителей. Рассмотрены системы активной защиты речевой информации, использующие наряду с «белым» шумом комбинированные маскирующие сигналы, состоящие из «белого» шума и речеподобных сигналов. Разработаны критерии подхода к отбору дикторов и аудитории при оценке разборчивости речи для решения задач защиты речевой информации и методики экспериментальных исследований разборчивости речи на фоне маскирующих акустических шумов. Представлены технологии формирования нанокompозитов на основе углеродных нанотрубок и наночастиц ферромагнитных материалов для увеличения степени когерентности спиновой текстуры на макроскопических расстояниях, повышения степени устойчивости изделий электронной техники к сильным магнитным полям и помехоустойчивости. Показано, что при определенных концентрациях наночастиц ферромагнетика происходит рост микромагнитных параметров, обеспечивающих высокую работоспособность активных элементов в магнитных полях. Роль углерода при этом оказывается определяющей. Приведенные результаты представляются перспективными при создании безэховых камер, перегородок, отделяющих в помещениях зоны, предназначенные для расположения приборов электронной техники, при изготовлении изделий для защиты человека от воздействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, формирования комбинированных маскирующих сигналов в виде «белого» шума для устройств защиты речевой информации, композитных покрытий для нивелирования воздействия постоянного магнитного поля на изделия электронной техники.

Ключевые слова: экранирование СВЧ-излучения, радиопоглотители, коэффициент отражения, многослойный композит, двумерные магнитные композиты, активная защита речевой информации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Исследования и разработки в области создания материалов, технологий и средств обеспечения безопасности / В. А. Богуш [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 42–54. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-42-54>.

RESEARCH AND DEVELOPMENT IN THE FIELD OF CREATING MATERIALS, TECHNOLOGIES AND SAFETY EQUIPMENT

VADIM A. BOGUSH, LEONID M. LYNKOU, NATALLIA V. NASONOVA,
SERGHEJ L. PRISCHEPA, ELENA S. BELOUSOVA, OLGA V. BOIPRAV,
HENADZI V. DAVYDAU, VASILIA A. PAPOU, ALEKSANDR V. PATAPOVICH,
HALINA A. PUKHIR

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 31.01.2024

Abstract. Technologies for the manufacture of microwave electromagnetic shields based on powdered carbon, foil and composite multilayer materials are presented. Technological methods for their manufacture and shielding properties are described, and the main mechanisms leading to increased shielding properties are considered depending on the manufacturing technology, composition and alternation of composite layers. It is shown that the values of the reflection coefficient of electromagnetic radiation in the frequency range 2–17 GHz for the shields considered reach a value of (–20) dB. Microwave absorbers with a reflection characteristic lower than (–10.0) dB (down to (–52.0) dB) in the frequency band 8.0–12.0 GHz are developed, and the electrophysical parameters, composition and concentration of components of the composite materials for such microwave absorbers are determined. The systems for active protection of speech information that use combined masking signals consisting of “white” noise and speech-like signals as masking signals, along with “white” noise are considered. Criteria have been developed for the approach to selecting speakers and audiences when assessing speech intelligibility to solve problems of protecting speech information and methods for experimental studies of speech intelligibility against a background of masking acoustic noise. Technologies for the formation of nanocomposites based on carbon nanotubes and nanoparticles of ferromagnetic materials are presented to increase the degree of coherence of the spin texture at macroscopic distances, increase the degree of security of electronic products to strong magnetic fields and noise immunity. It has been shown that at certain concentrations of ferromagnetic nanoparticles, micromagnetic parameters increase, ensuring high performance of active elements in magnetic fields. The role of carbon in this case turns out to be decisive. The presented results seem promising for use in the creation of anechoic chambers, partitions for separating indoor zones intended for the location of electronic devices, products for protecting humans from the effects of electromagnetic radiation in the microwave range, and the formation of combined masking signals in the form of “white” noise for devices protection of speech information, composite coatings to level out the effects of a constant magnetic field on electronic products.

Keywords: microwave radiation shielding, radio absorbers, reflection coefficient, multilayer composite, two-dimensional magnetic composites, active protection of speech information.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Bogush V. A., Lynkou L. M., Nasonova N. V., Prischepa S. L., Belousova E. S., Boiprav O. V., Davydau H. V., Papou V. A., Patapovich A. V., Pukhir H. A. (2024) Research and Development in the Field of Creating Materials, Technologies and Safety Equipment. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 42–54. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-42-54> (in Russian).

Введение

Электромагнитные экраны, виброакустические системы защиты речевой информации, системы защиты от постоянных магнитных полей находят применение в областях, связанных с ограничением распространения электромагнитного излучения (ЭМИ), виброакустических сигналов, магнитных полей, с целью защиты персонала и пользователей от воздействия побочных ЭМИ электронных средств, подавления электромагнитных каналов утечки информации, защиты технических объектов от обнаружения радиолокационными средствами, защиты речевой информации комбинированными маскирующими сигналами и изделий электронной техники от внешних магнитных полей и др. Особенности применения экранов и поглотителей устанавливают определенные требования к их техническим и эксплуатационным характеристикам. В частности, к рабочему диапазону частот, требуемой эффективности экранирования, допустимому уровню отражаемой энергии, массогабаритным параметрам, рабочей области температур, величине внешних полей и др. Проанализированы результаты, достигнутые в рамках 5-го направления научных исследований «Многофункциональные материалы, приборы и технологии, информационная безопасность» за последние пять лет, приведены новые данные, связанные с тематикой направления.

Экраны СВЧ-диапазона на основе порошкообразного угля и фольгированных материалов

В рамках проведенных за прошедшие пять лет исследований впервые экспериментально обоснована перспективность применения порошкообразных углей для изготовления электромагнитных экранов СВЧ-диапазона [1]. Разработана технология изготовления гибких двухслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе порошкообразного активированного древесного (березового) или кокосового угля и водного раствора хлорида кальция. Эта технология основана на закреплении частиц угля в матрице, изготовленной из полимерной самоклеящейся пленки [2]. Экспериментально установлено, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц экранов, изготовленных в соответствии с этой технологией и закрепленных на металлических подложках, изменяются в пределах от (–6) до (–20) дБ.

Разработана технология изготовления экранирующих ЭМИ строительных отделочных материалов на основе порошкообразного древесного угля и гипса [3]. Экспериментально установлено, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц указанных материалов толщиной 5 мм, закрепленных на металлических подложках, изменяются в пределах от (–2) до (–15) дБ. Подтверждена возможность изменения класса горючести таких материалов (с класса умеренногорючих до класса слабогорючих) при условии нанесения на их поверхность покрытия толщиной 3 мм из смеси вододисперсионного состава и мелкодисперсного электрокорунда или глинозема (оксида алюминия) [4]. Кроме того, в процессе исследований подтверждена возможность обеспечения для таких материалов высокого значения коэффициента ослабления рентгеновского излучения при условии нанесения на их поверхность покрытия толщиной 3 мм из смеси вододисперсионного состава и мелкодисперсного сульфата бария [5].

Разработана и экспериментально обоснована технология изготовления гибких угленасыщенных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона [6]. Установлено, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов, выполненных по этой технологии, изменяются в пределах от (–2) до (–15) дБ. Предлагается использовать порошкообразный древесный уголь для изготовления двухслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, один из слоев которых характеризуется пространственно-периодической структурой. Данная технология включает в себя следующие операции:

- 1) откраивание от полотна нетканого синтетического материала двух одинаковых фрагментов;
- 2) распределение по поверхности одного из откраенных фрагментов с использованием трафарета частиц порошкообразного древесного угля (рис. 1);

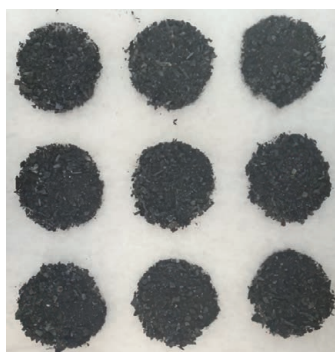


Рис. 1. Внешний вид частиц порошкообразного древесного угля, распределенных с использованием трафарета по поверхности фрагмента нетканого синтетического материала

Fig. 1. Appearance of powdered charcoal particles distributed using a stencil over the surface of non-woven synthetic material fragment

- 3) расположение второго из откраенных фрагментов поверх распределенных частиц порошкообразного древесного угля;
- 4) термопрессование конструкции, полученной в результате реализации операций 1–3;
- 5) откраивание от рулона фольгированной полимерной пленки фрагмента, форма и размер которого эквивалентны форме и размеру откраенных фрагментов полотна нетканого синтетического материала;

б) закрепление отколенного фрагмента фольгированной полимерной пленки на одной из поверхностей материала, полученного в результате реализации операций 1–4.

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2–17 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с представленной технологией, приведены на рис. 2.

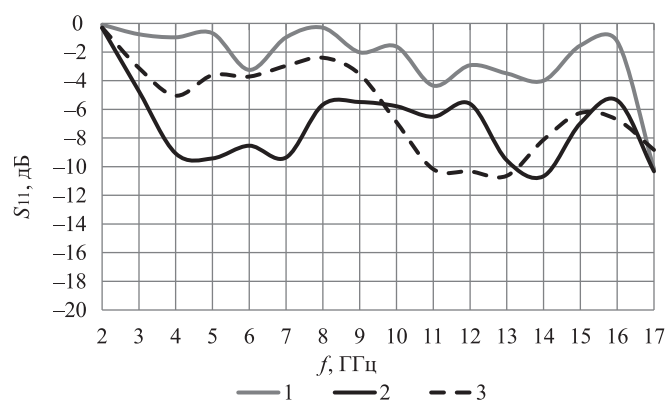


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов на основе: 1 – древесного неактивированного угля; 2, 3 – древесного и кокосового активированных углей соответственно

Fig. 2. Dependences of reflection coefficient of the electromagnetic radiation in the frequency range of 2–17 GHz of screens based on: 1 – non-activated charcoal; 2, 3 – charcoal and coconut activated carbons, respectively

Как видно из рис. 2, значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2–17 ГГц экранов, изготовленных на основе порошкообразного неактивированного древесного угля, изменяются в пределах от (–0,5) до (–4,0) дБ, а экранов, изготовленных на основе порошкообразного активированного древесного (березового) или кокосового угля, – от (–0,5) до (–12,0) дБ. Более низкие значения коэффициента отражения ЭМИ экранов на основе активированных углей по сравнению с экранами на основе неактивированного древесного угля обусловлены тем, что:

- порошкообразные активированные угли характеризуются более высоким значением удельной электропроводности;
- энергия ЭМИ, отражаемого от слоя в виде фольгированной полимерной пленки, входящего в состав рассматриваемых экранов, в большей степени ослабляется в их слое, характеризующемся пространственно-периодической структурой, если этот слой сформирован с использованием порошкообразного активированного древесного (березового) или кокосового угля, а не с порошкообразного неактивированного древесного угля.

Экспериментально подтверждена возможность уменьшения на 2–6 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ в полосе частот 5–8 ГГц двухслойных экранов, изготовленных в соответствии с представленной технологией, в случае использования при формировании их слоя, характеризующегося пространственно-периодической структурой, порошкообразного активированного древесного (березового) угля, пропитанного смесью изопропилового спирта и мелкодисперсного оксида железа (III), т. е., по сути, угля, в поры частиц которого включены частицы порошкообразного оксида железа (III) (рис. 3).

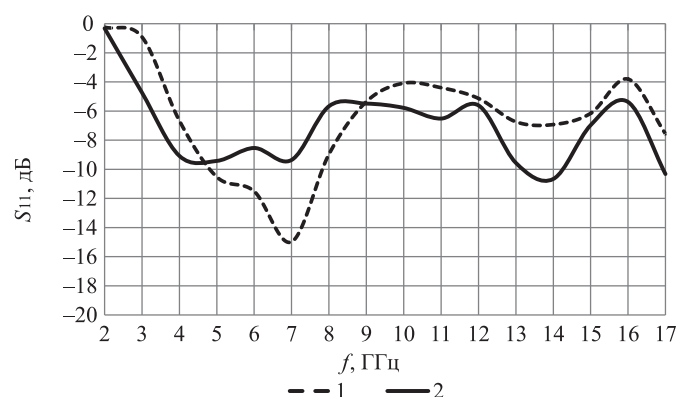


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов на основе: 1 – угля, пропитанного смесью изопропилового спирта и мелкодисперсного оксида железа (III); 2 – угля

Fig. 3. Dependence of reflection coefficient of the electromagnetic radiation in the frequency range of 2–17 GHz of screens based on: 1 – charcoal impregnated with a mixture of isopropyl alcohol and fine iron (III) oxide; 2 – charcoal

Электромагнитные экраны, выполненные в соответствии с представленной технологией, могут использоваться при создании перегородок, отделяющих в помещениях зоны, предназначенные для расположения приборов электронной техники. Разработаны технологии изготовления эластичных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе фрагментов фольгированных материалов [7]. Они характеризуются значениями коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц, изменяющимися соответственно в пределах от (–5) до (–25) дБ и от (–20) до (–40) дБ. Кроме того, экспериментально обоснованы технологии производства двухслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, один из слоев которых характеризуется пространственно-периодической структурой и включает в себя совокупность одинаковых элементов в виде изготовленных из фольгированных материалов кругов или спиралей Архимеда [8]. Если для создания таких экранов используются фольгированные материалы, на поверхности которых сформированы неоднородности микронного размера, значения их коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц меньше в среднем на 5 дБ, чем у экранов, для изготовления которых используются фольгированные материалы, характеризующиеся условно гладкой поверхностью [9]. Экраны, выполненные в соответствии с представленными технологиями на основе фольгированных материалов, представляются перспективными для использования в целях изготовления ширм для экранирования помещений.

Композиционные материалы для радиопоглотителей СВЧ-диапазона

Технологии формирования композиционных материалов предоставляют широкие возможности создания экранов и радиопоглотителей с необходимыми параметрами, поскольку позволяют получать материалы, электрофизические и механические свойства которых можно варьировать в широком диапазоне. Наиболее распространенные компоненты для формирования «традиционных» радиопоглотителей – порошки металлов (например, карбонильного железа (КЖ), никеля (Ni)) или углерода (У) в различных формах) и сложные соединения с магнитными свойствами. Кроме этого, могут применяться и отдельные диэлектрики, обладающие диэлектрическими потерями в требуемом диапазоне частот, такие как электропроводящие полимеры (полианилин – PANI), водные растворы солей металлов. Для задания механических свойств используются полиуретановые, эпоксидные (ЭС) и кремнийорганические (СС) связующие вещества, а также твердотельные матрицы (диэлектрические порошки и гранулы Al_2O_3 , SiO_2 , вязаные и нетканые полотна) [10].

На практике вследствие сложных многопараметрических зависимостей электрофизических параметров реальных композитов от вида и свойств компонентов технологии изготовления в основном используются экспериментальные данные [11]. Установлены величины диэлектрической ϵ' и магнитной μ' проницаемостей и диэлектрических ϵ'' и магнитных μ'' потерь образцов различных композитов и их компонентов в диапазоне частот 8–12 ГГц. Результаты представлены на рис. 4 и в табл. 1. На рис. 4, $a - A$ – порошок КЖ в СС; B – КЖ в ЭС; C – водный раствор $CaCl_2$ в гранулированном SiO_2 ; D – порошок Ni в ЭС; E – порошок Ni в СС; F – водный раствор $CaCl_2$ в вязаном синтетическом полотне, на рис. 4, $b - 1 - Al_2O_3/MoSi_2$; $2 - Al_2O_3/Fe_{80}Cr_{10}Ni_5Al_5$; $3 - Al_2O_3/TiAl$; $4 - Al_2O_3/Fe_{69}Cr_{25}Al_6$; $5 - Al_2O_3/Ti_3SiC_2$.

Таблица 1. Диэлектрическая и магнитная проницаемости различных компонентов и композитов на частоте 8 ГГц

Table 1. Dielectric and magnetic permeability of various components and composites at frequency 8 GHz

Состав образца / Sample composition	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , Fe_3O_4	2,7–4,4	0,08–0,38	–	–
КЖ (50 мас.%) в ЭС	9,4	2,82	1,30	0,22
У (5–30 мас.%) в ЭС	24,6–122,0	8,8–85,0	–	–
$FeGa_2Sb_4$ (мах.%) в ЭС	2,8	0,15	–	–
$FeIn_2S_4$ (мах.%) в ЭС	3,0	0,22	–	–
Водный раствор $CaCl_2$ в порошке SiO_2	7,0	3,06	–	–
PANI в гранулированном SiO_2	7,9	0,85	–	–

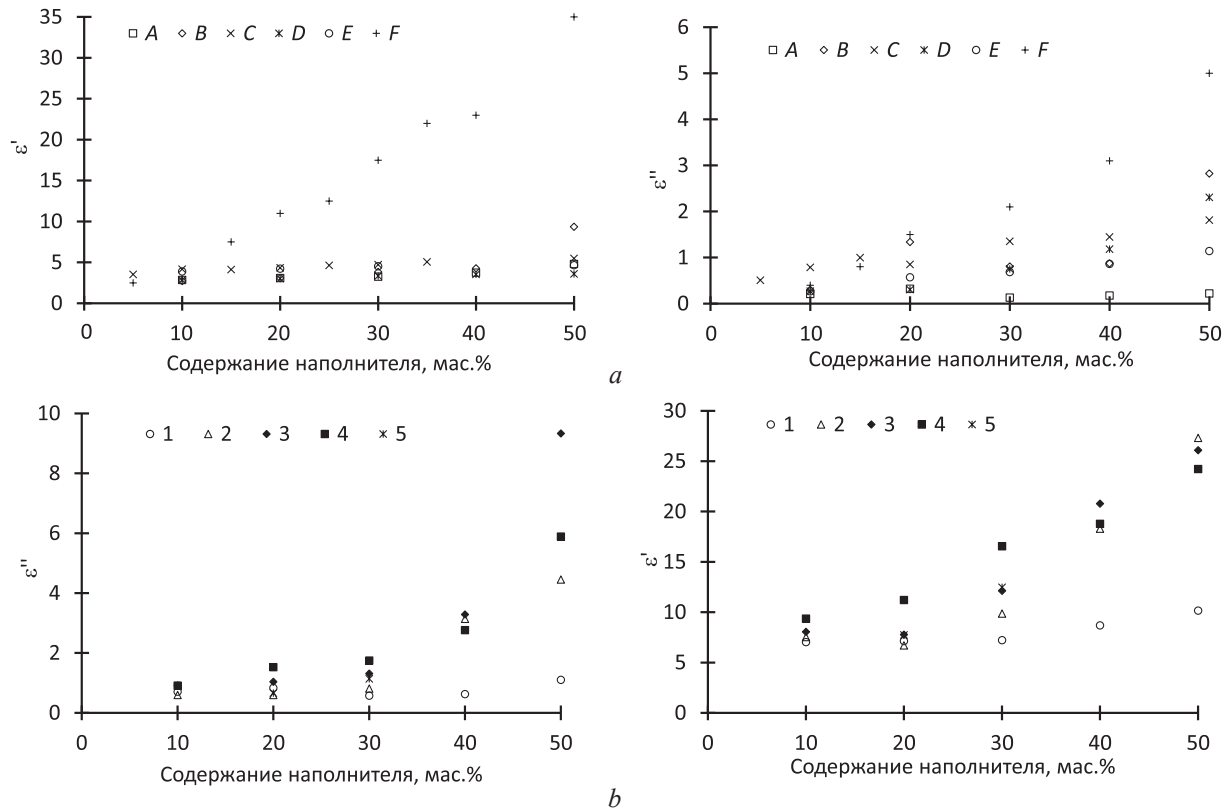


Рис. 4. Зависимости действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости различных композитов от состава (a) и концентрации (b) компонентов (приведено для 8 ГГц)
Fig. 4. Dependences of the real ϵ' and imaginary ϵ'' parts of the permittivity for various composites vs their composition (a) and concentration (b) of components (given for 8 GHz)

Следует отметить, что синтез композиционных материалов позволяет получать широкий диапазон величин электрофизических параметров – от 2,8 до 122,0 для ϵ' , от 0,08 до 85,00 для ϵ'' [12, 13]. Наибольшая величина магнитной проницаемости, полученная для разработанных образцов, составила 1,3 (образец на основе порошка карбонильного железа). Зависимости электрофизических параметров композиционных материалов от концентрации и состава компонентов использованы при анализе электромагнитных характеристик различных конструкций радиопоглотителей в программном пакете CST Microwave Studio. Также определены диапазоны параметров, позволяющие обеспечивать уменьшение значения коэффициента отражения (S_{11}) в определяемых техническим заданием пределах в требуемом диапазоне частот.

В результате исследований предложен трехслойный радиопоглотитель, диэлектрическая проницаемость и толщина слоев d которого определены по результатам оптимизации коэффициента отражения (менее -10 дБ) по критерию широкополосности (в диапазоне частот 8–12 ГГц). В процессе электродинамического моделирования установлены электрофизические и структурные характеристики радиопоглотителя, которые позволяют обеспечить S_{11} менее -10 дБ во всем диапазоне частот исследований (рис. 5, a).

Оптимизация параметров радиопоглотителя по критерию минимальной величины коэффициента отражения позволила предложить трехслойный радиопоглотитель, обеспечивающий коэффициент отражения ЭМИ менее -10 дБ в диапазоне частот 8,5–11,5 ГГц с шириной полосы частот $\Delta f \approx 3$ ГГц. Установленные электрофизические и структурные параметры радиопоглотителя обеспечивают минимальный коэффициент отражения $S_{11} = -52$ дБ вблизи частоты 9,8 ГГц (рис. 5, b). Для разработанных радиопоглотителей определены диапазоны параметров, позволяющие обеспечить заданные требования. Измерения коэффициента отражения S_{11} в диапазоне частот 8–12 ГГц (рис. 6) показали, что частотная характеристика отражения радиопоглотителя близка к результатам моделирования, показанным на рис. 5, a, а величина коэффициента отражения – менее -10 дБ во всем исследованном диапазоне частот.

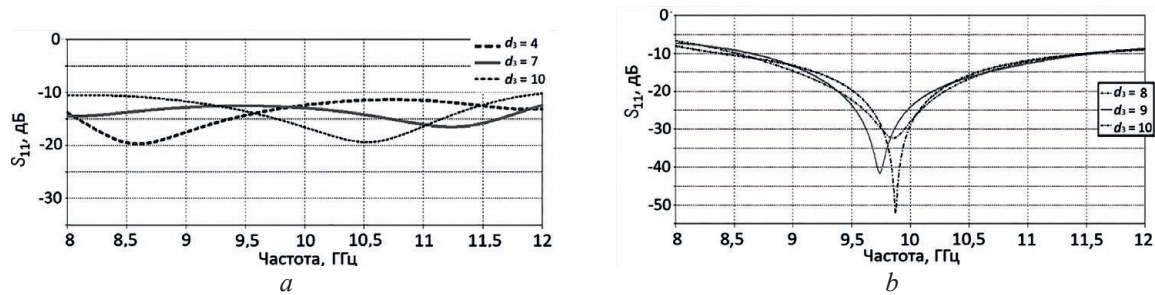


Рис. 5. Результаты моделирования характеристики отражения многослойного радиопоглопителя:

a – вариант 1 – $\varepsilon'_1 = 3$; $\varepsilon'_2 = 8,5$; $\varepsilon'_3 = 30$; $d_1 = 5$ мм; $d_2 = 7$ мм; $d_3 = 4$; 7; 10 мм;

b – вариант 2 – $\varepsilon'_1 = 3$; $\varepsilon'_2 = 8,5$; $\varepsilon'_3 = 30$; $d_1 = 5$ мм; $d_2 = 5$ мм; $d_3 = 8$; 9; 10 мм

Fig. 5. Results of reflection characteristics simulation for a multilayered microwave absorber:

a – variant 1 – $\varepsilon'_1 = 3$; $\varepsilon'_2 = 8.5$; $\varepsilon'_3 = 30$; $d_1 = 5$ mm; $d_2 = 7$ mm; $d_3 = 4$; 7; 10 mm;

b – variant 2 – $\varepsilon'_1 = 3$; $\varepsilon'_2 = 8.5$; $\varepsilon'_3 = 30$; $d_1 = 5$ mm; $d_2 = 5$ mm; $d_3 = 8$; 9; 10 mm

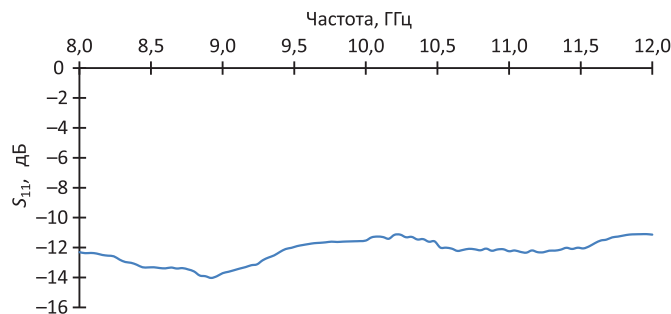


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения трехслойного радиопоглопителя от частоты

Fig. 6. Frequency dependence of the reflection coefficient of a three-layer radio absorber

Защита речевой информации комбинированными маскирующими сигналами

Для оценки защищенности речевой информации по показателям разборчивости речи с использованием расчетных и расчетно-инструментальных методов ориентация на среднюю слуховую чувствительность слушателей не допустима. Предварительные эксперименты показали, что при высоких уровнях маскирующих шумов, когда разборчивость речи менее 10 %, имеется большой разброс показателей разборчивости защищаемой речи в зависимости от слуховой чувствительности слушателей. Поэтому необходимо изменить подход к отбору дикторов и слушателей при оценке разборчивости речи для решения задач защиты речевой информации и дополнить методики экспериментальных исследований разборчивости речи конкретными методическими материалами по отбору и обучению слушателей воспринимать речевые сигналы на фоне маскирующих акустических шумов [14–17].

Для экспериментальных исследований сформировали комбинированные маскирующие сигналы, как описано выше, которые были наложены на фонограммы информационных речевых сигналов в виде связного текста длительностью около 2–3 мин и объемом 198–202 слов. Фонограммы озвучивались отобранными и подготовленными дикторами. При этом соотношения сигнал/комбинированный маскирующий шум были (–14), (–12), (–10), (–9) дБ. Результаты экспериментальных исследований словесной разборчивости подготовленными слушателями путем многократного прослушивания фонограмм различными слушателями представлены на рис. 7. При этом речь маскировалась комбинированными сигналами и «белым» шумом.

Применение комбинированных маскирующих сигналов, состоящих из «белого» шума и речеподобных сигналов с соотношением 6 дБ, позволило снизить интегральный уровень маскирующих сигналов более чем на 10 дБ. Это обеспечивает комфортные условия для работы в защищаемом помещении. Для комбинированных маскирующих сигналов словесная разборчивость речи может быть определена из выражения

$$R = e^{-8,9+17,4SN}, \quad (1)$$

где R – словесная разборчивость, отн. ед. (не в процентах); SN – интегральное отношение сигнал/шум, отн. ед. (не в децибелах), справедливое для диапазона SN от 0 до 0,35.

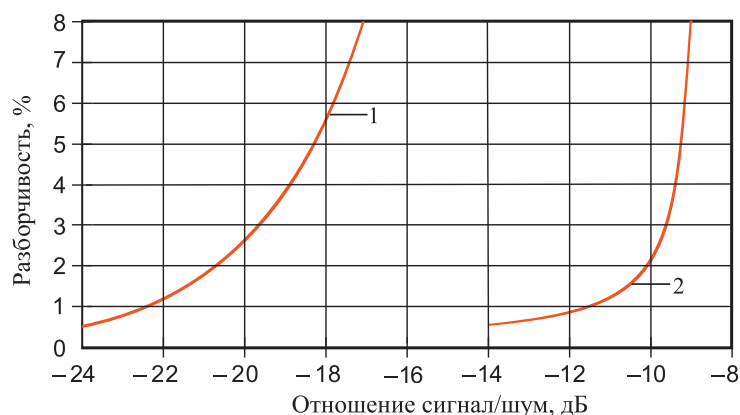


Рис. 7. Зависимость словесной разборчивости речи от отношения сигнал/шум при всем диапазоне частот для: 1 – маскирующего сигнала в виде «белого» шума; 2 – комбинированных маскирующих сигналов

Fig. 7. Dependence of verbal speech intelligibility on the signal-to-noise ratio over the entire frequency range for: 1 – masking signal in the form of “white” noise; 2 – combined masking signals

Для автоматизации вычислений словесной разборчивости речи от интегрального отношения сигнал/шум для маскирующего сигнала в виде «белого» шума выполнили аппроксимацию зависимости (1) выражением

$$R = 6,9SN^2 - 0,2SN. \quad (2)$$

Проведенные экспериментальные исследования разборчивости речи позволили получить ее аппроксимирующую зависимость от соотношения сигнал/шум и не обращать внимания на имеющиеся сомнения в адекватности основных положений формантной теории разборчивости речи. В первую очередь это относится к исключению частотной зависимости коэффициента эффективности восприятия форманта речи. Указанным выше требованиям формирования комбинированных маскирующих сигналов или маскирующих сигналов в виде «белого» шума удовлетворяет устройство защиты речевой информации «Прибой». Кроме того, благодаря ряду конструктивных решений и отсутствию внутри блочных разъемных соединений данное устройство обладает высокой надежностью, что является важнейшим параметром при его эксплуатации.

Двумерные магнитные нанокompозиты для повышения помехоустойчивости изделий магнетoeлектроники

В рамках приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь на 2021–2025 гг. особое внимание уделяется поиску новых композиционных наноматериалов, в том числе на основе массивов углеродных нанотрубок (УНТ), для различных областей радиотехнической, электронной и оптоэлектронной промышленности, исследованию их структуры и свойств, а также наукоемким и экономичным технологиям их создания. Для целого ряда магнитно-электронных приложений необходимо синтезировать магнитные нанокompозиты, состоящие из однодоменных наночастиц с высокой плотностью упаковки (10^{10} частиц/см²) и с отсутствием магнитостатического взаимодействия между частицами. С этой целью предложено использовать УНТ в качестве задающей матрицы.

Разработана оригинальная методика, позволяющая формировать массив вертикально расположенных УНТ, внутри которых находится только одна частица ферромагнитного материала Co [18]. Принцип формирования таких образцов заключается в том, что в качестве катализатора для роста УНТ методом химического парофазного осаждения используется массив наночастиц Co, предварительно сформированный на подложке SiO₂/Si.

При больших концентрациях каталитических наночастиц они локализованы внутри УНТ, внутри и снаружи стенок УНТ. Механизм взаимодействия между ними обусловлен обменным

взаимодействием. Такие наноконпозиты перспективны в качестве экранирующих материалов в широком диапазоне частот, вплоть до терагерц [19, 20]. Однако их применение в магнетoeлектронике мало перспективно в силу слабой контролируемости свойств. Со снижением концентрации катализатора можно реализовать случай, когда наночастицы ферромагнетика локализованы только внутри УНТ. Концентрация их крайне мала, и среднее расстояние между наночастицами внутри УНТ составляет порядка сотен нанометров. Между тем наночастицы, локализованные в одной трубке, не являются магнитно-изолированными. Они связаны косвенным обменным взаимодействием, возникающим из-за большого спин-орбитального эффекта, вызванного кризисной и дефектностью нанотрубок [21].

Таким образом, для формирования УНТ, внутри которых была бы локализована только одна ферромагнитная наночастица, необходимо формировать массив ориентированных УНТ на подложке с предварительно нанесенными наночастицами катализатора. В процессе роста (механизм сверху вниз) форма наночастиц подвержена изменению вследствие температуры процесса, близкой к эвтектической температуре наночастиц ферромагнетика. Возникающие при этом внутренние упругие напряжения приводят к росту вклада магнитной анизотропии, который превосходит дипольное взаимодействие между частицами. При этом возможен кроссовер от коллективного поведения ансамбля наночастиц к индивидуальному. Данные экспериментальных измерений петель гистерезиса в параллельном и перпендикулярном плоскости подложки направлениях магнитного поля вместе с результатами расчета микромагнитных параметров и внутренних напряжений в наночастицах подтверждают справедливость этой гипотезы [18, 22].

Проводили исследования магнитных свойств ансамбля наночастиц Co, нанесенных на проводящую медную подложку. В результате формируется принципиально новый тип композитного двумерного (2D) магнитного материала [23]. Измерение петель гистерезиса в широком диапазоне температур подтвердило ферромагнитный характер обменного взаимодействия в таких 2D-наноконпозитах. Спиновая текстура может быть хорошо контролируема и управляема, что создает предпосылки для конструирования новых приборов спинтроники с повышенной помехоустойчивостью. Кроме того, в отличие от известных 2D-материалов, таких как топологические изоляторы, дихалькогениды переходных металлов, фосфорены, силициды, ZnO и прочих, ферромагнитные свойства в сформированных 2D-наноконпозитах на их основе наблюдаются при комнатной температуре, что расширяет функциональные возможности приборов на их основе, повышает устойчивость к влиянию влаги, окислению и высоким температурам. Кроме того, отсутствует проблема масштабируемости пластин [24].

В результате проведенных исследований установлено, что корреляционная функция осей магнитной анизотропии $C(z)$ (спиновая текстура) при температурах жидкого гелия представляет собой быстро осциллирующую периодическую функцию (рис. 8, *a*). Корреляции распространяются на макроскопически большие расстояния, вплоть до микрометров, а амплитуда осцилляций может усиливаться при определенных значениях обменного поля. Колебания спиновой текстуры вызваны косвенной обменной связью, а их амплитуда, т. е. эффект дальнего действия, определяется другими причинами. Как известно, в наноструктурах ферромагнетик/антиферромагнетик обменное смещение создает однонаправленную анизотропию, препятствующую обращению ферромагнитного момента [24]. Эффект однонаправленной анизотропии превышает анизотропию ядра Co. В наночастицах этот эффект приводит к тому, что намагниченность также должна быть фиксированной, а анизотропия кобальта упорядочивается определенным образом, минимизируя магнитную энергию системы Co/CoO. К причине, подтверждающей дальнедействующие корреляции осей магнитной анизотропии в реальном пространстве, по мнению авторов статьи, относится наличие сильной магнитной анизотропии оболочек CoO и обменного смещения в Co/CoO.

С ростом температуры спиновая текстура меняет свой характер, она становится немонотонной, и корреляции стремятся к нулю при $z \rightarrow 0$ (рис. 8, *b*), что подтверждает гипотезу о некоррелированности осей магнитной анизотропии соседей. Это может быть связано как с разбросом параметров наночастиц, короткодействующим диполь-дипольным взаимодействием, так и с подавлением косвенного обменного взаимодействия тепловой энергией. Тем не менее даже в этом случае корреляции спиновой текстуры сохраняются до дистанций порядка сотен нанометров, что весьма перспективно для спинтронных устройств.

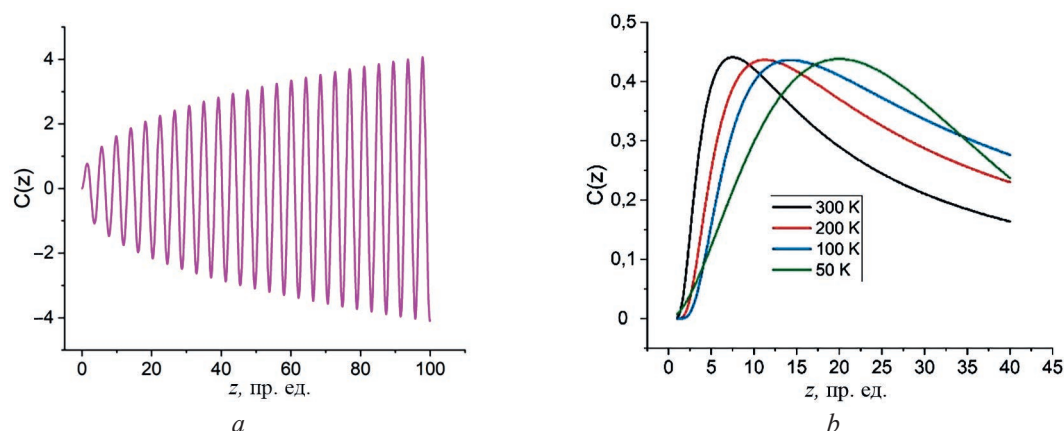


Рис. 8. Корреляционная функция осей магнитной анизотропии при температурах: $a - 4$ К; $b - 50-300$ К
Fig. 8. Correlation function of magnetic anisotropy axes at temperatures: $a - 4$ К; $b - 50-300$ К

Заключение

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования различных композитных многослойных материалов и покрытий для экранирования электромагнитного излучения СВЧ-диапазона показали перспективность их применения для защиты изделий электронной техники и операторов. Разработаны эффективные принципы и методы формирования комбинированных маскирующих сигналов в виде «белого» шума для устройств защиты речевой информации. Показана перспективность применения двумерных магнитных композитов для повышения спиновой устойчивости изделий магнитоэлектроники к внешним магнитным полям в широком диапазоне температур.

Список литературы

1. Ayad, H. Electromagnetic Shields Based on Powdered Coal-Containing Materials / H. Ayad, O. Voiprav, L. Lynkou. Minsk: Bestprint, 2020.
2. Бойправ, О. В. Перспективные слоистые гибкие радиопоглощающие материалы на основе порошкообразного угля / О. В. Бойправ, В. А. Богуш // Перспективные материалы. 2023. № 8. С. 15–26. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-8-15-26.
3. Charcoal-Containing Building Materials for Electromagnetic Radiation Shielding / O. V. Voiprav [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2023. Vol. 117, Iss. 1. DOI: 10.34910/MCE.117.9.
4. Негорючее композиционное покрытие на основе глинозема для изготовления радиопоглощающих конструкций / Д. И. Пеньялоса Овальес [и др.] // Приборы. 2020. Т. 6, № 240. С. 39–43.
5. Voiprav, O. V. Multifunctional Composite Charcoal-Containing Microwave and X-ray Radiation Absorbers / O. V. Voiprav, V. A. Bogush, N. N. Grinchik // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2023. Vol. 8, Iss. 4. P. 294–303. DOI: 10.17277/jamt.2023.04.pp.294-303.
6. Белоусова, Е. С. Экспериментальное обоснование технологии изготовления угленасыщенных поглотителей электромагнитного излучения / Е. С. Белоусова, О. В. Бойправ, С. Э. Саванович // Электромагнитные волны и электронные системы. 2022. № 5. С. 21–27. DOI: 10.18127/j5604128-202205-03.
7. Электромагнитные экраны на основе алюминия, его оксидов и углеродных волокон. Технологии, конструкции и свойства / Х. Д. А. Абдулхади [и др.]. Минск: Бестпринт, 2021.
8. Voiprav, O. V. Improved Technology of Frequency-Selective UHF Electromagnetic Shields Containing Helical Elements / O. V. Voiprav, N. V. Bogush // Modern Electronic Materials. 2022. Vol. 8, Iss. 4. P. 157–164. DOI: 10.3897/j.moem.8.4.100653.
9. Flexible Double-Layered Microwave Absorbers Based on Foiled Materials with Mechanically Treated Surface / O. Voiprav [et al.] // New Materials, Compounds and Applications. 2023. Vol. 7, Iss. 2. P. 100–110.
10. Электрофизические свойства слоев сотовой сэндвич-структуры для радиопоглотителей микроволнового излучения / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. 2023. № 46. С. 134–139.
11. Сотовые сэндвич-структуры для поглощения электромагнитного излучения и радиопоглотители на их основе / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. 2021. № 44. С. 165–172.

12. Новые технологии создания экранов электромагнитного излучения на основе модифицированных порошковых, наноструктурированных и пленочных материалов / Л. М. Лыньков [и др.] // Доклады БГУИР. 2019. № 2. С. 85–99.
13. Использование жаростойкого сплава в качестве поглотителя ЭМИ микроволнового диапазона / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. 2019. № 42. С. 27–35.
14. Seitkulov, Y. N. The Base of Speech Structural Units of Kasakh Language for the Synthesis of Speech-Like Signals / Y. N. Seitkulov, H. V. Davydau, A. V. Patapovich // Proceeding of the IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies. 2018. DOI: 10.1109/ICA-ICT.2018.8747120.
15. Seitkulov, Y. N. Algoritym of Forming Speech Base Units Using the Method of Dynamic Programming / Y. N. Seitkulov, H. V. Davydau, A. V. Patapovich // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2018. Vol. 96, No 23. P. 7928–7941.
16. Speech Information Security Assessing in Case of Combined Masking Signals / Y. N. Seitkulov [et al.] // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2020. Vol. 98, No 16. P. 3270–3281.
17. Method for Speech Intelligibility Assessment with Combined Masking Signals / Y. N. Seitkulov [et al.] // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2020. Vol. 98, No 8. P. 1173–1186.
18. Impact of Aligned Carbon Nanotubes Array on the Magnetostatic Isolation of Closely Packed Ferromagnetic Nanoparticles / A. L. Danilyuk [et al.] // Carbon. 2018. No 139. P. 1104–1116. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.08.024.
19. Microwave Absorption in Nanocomposite Material of Magnetically Functionalized Carbon Nanotubes / V. A. Labunov [et al.] // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 112, No 2. DOI: 10.1063/1.4737119.
20. Atdayev, A. Interaction of Electromagnetic Radiation in the 20–200 GHz Frequency Range with Arrays of Carbon Nanotubes with Ferromagnetic Nanoparticles / A. Atdayev, A. L. Danilyuk, S. L. Prischepa // Beilstein Journal of Nanotechnology. 2015. Vol. 6. P. 1056–1064. DOI: 10.3762/bjnano.6.106.
21. Danilyuk, A. L. Long-Range Exchange Interaction Between Ferromagnetic Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes / A. L. Danilyuk, A. V. Kukharev, S. L. Prischepa // IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58, Iss. 2. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3102403.
22. Anisotropy of Assemblies of Densely Packed Co-Alloy Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes / S. L. Prischepa [et al.] // IEEE Magnetic Letters. 2019. Vol. 10. DOI: 10.1109/LMAG.2019.2933380.
23. CVD Graphene Sheets Electrochemically Decorated with “Core-Shell” Co/CoO Nanoparticles / V. G. Bayev [et al.] // Applied Surface Science. 2018. No 440. P. 1252–1260. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.01.245.
24. Low-Temperature Magnetic Ordering in Co Core/CoO Shell Nanoparticles on the Copper Surface / A. L. Danilyuk [et al.] // Current Applied Physics. 2023. No 56. P. 79–84. DOI: 10.1016/j.cap.2023.10.003.

References

1. Ayad H., Boiprav O., Lynkou L. (2020) *Electromagnetic Shields Based on Powdered Coal-Containing Materials*. Minsk, Bestprint Publ.
2. Boiprav O. V., Bogush V. A. (2023) Advanced Layered Flexible Radio-Absorbing Materials Based on Powdered Charcoal. *Perspektivnye Materialy*. (8), 15–26. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-8-15-26 (in Russian).
3. Boiprav O. V., Belousova E. S., Ahmetdinova E. S., Bogush N. V. (2023) Charcoal-Containing Building Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Magazine of Civil Engineering*. 117 (1). DOI: 10.34910/MCE.117.9.
4. Penalzoa Ovalles D. I., Boiprav O. V., Tumilovich M. V., Gusinsky A. V., Pasrobka G. S., Lynkou L. M. (2020) Non-Combustible Composite Coating Based on Electrocorundum Powder for Electromagnetic Shields. *Devices*. 6 (240), 39–43 (in Russian).
5. Boiprav O. V., Bogush V. A., Grinchik N. N. (2023) Multifunctional Composite Charcoal-Containing Microwave and X-ray Radiation Absorbers. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 8 (4), 294–303.
6. Belousova E. S., Boiprav O. V., Savanovich S. E. (2022) Experimental Substantiation of Manufacturing Technologies of Charcoal-Containing Electromagnetic Absorbers. *Journal Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. (5), 21–27. DOI: 10.17277/jamt.2023.04.pp.294-303 (in Russian).
7. Abdulhadi H. D. A., Al-Mashatt E. A. A., Bogush V. A., Boiprav O. V., Lynkou L. M., Mukhurov N. I., et al. (2021) *Electromagnetic Screens Based on Aluminum, its Oxides and Carbon Fibers. Technologies, Designs and Properties*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
8. Boiprav O. V., Bogush N. V. (2022) Improved Technology of Frequency-Selective UHF Electromagnetic Shields Containing Helical Elements. *Modern Electronic Materials*. 8 (4), 157–164. DOI: 10.3897/j.moem.8.4.100653.

9. Boiprav O., Hasanov M., Bogush V., Lynkou L. (2023) Flexible Double-Layered Microwave Absorbers Based on Foiled Materials with Mechanically Treated Surface. *New Materials, Compounds and Applications*. 7 (2), 100–110.
10. Il'yushchenko A. F., Baraj S. G., Lecko A. I., Reutenok Yu. A., Zhuk E. V., Krumin D. G., et al. (2023) Electrophysical Properties of Layers of a Honeycomb Sandwich Structure for Microwave Absorbers. *Powder Metallurgy*. (46), 134–139 (in Russian).
11. Il'yushchenko A. F., Baraj S. G., Zhuk E. V., Nasonova N. V. (2021) Honeycomb Sandwich Structures for Electromagnetic Radiation Absorption and Microwave Absorbers Based on Them. *Powder Metallurgy*. (44), 165–172 (in Russian).
12. Lynkou L. M., Bogush V. A., Borbot'ko T. V., Nasonova N. V., Belousova E. S., Boiprav O. V. (2019) New Technologies for Creation of Electromagnetic Radiation Shields Based on Modified Powder, Nanostructured and Film Materials. *Doklady BSUIR*. (2), 85–99 (in Russian).
13. Il'yushchenko A. F., Baraj S. G., Zhuk E. V., Nasonova N. V., Puhir G. A. (2019) Using a Heat-Resistant Alloy as a Microwave Absorber. *Powder Metallurgy*. (42), 27–35 (in Russian).
14. Seitkulov Y. N., Davydau H. V., Patapovich A. V. (2018) The Base of Speech Structural Units of Kasakh Language for the Synthesis of Speech-Like Signals. *Proceeding of the IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies*. DOI: 10.1109/ICAICT.2018.8747120.
15. Seitkulov Y. N., Davydau H. V., Patapovich A. V. (2018) Algorithm of Forming Speech Base Units Using the Method of Dynamic Programming. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 96 (23), 7928–7941.
16. Seitkulov Y. N., Boronbayev S. N., Tashatov N. N., Davydau H. V., Patapovich A. V. (2020) Speech Information Security Assessing in Case of Combined Masking Signals. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 98 (16), 3270–3281.
17. Seitkulov Y. N., Boronbayev S. N., Yergaliyeva B. B., Davydau H. V., Patapovich A. V. (2020) Method for Speech Intelligibility Assessment with Combined Masking Signals. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 98 (8), 1173–1186.
18. Danilyuk A. L., Kukharev A. V., Cojocar C. S., Le Normand F., Prischepa S. L. (2018) Impact of Aligned Carbon Nanotubes Array on the Magnetostatic Isolation of Closely Packed Ferromagnetic Nanoparticles. *Carbon*. (139), 1104–1116. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.08.024.
19. Labunov V. A., Danilyuk A. L., Prudnikava A. L., Komissarov I., Shulitski B. G., Speisser C., et al. (2012) Microwave Absorption in Nanocomposite Material of Magnetically Functionalized Carbon Nanotubes. *Journal of Applied Physics*. 112 (2). DOI: 10.1063/1.4737119.
20. Atdayev A., Danilyuk A. L., Prischepa S. L. (2015) Interaction of Electromagnetic Radiation in the 20–200 GHz Frequency Range with Arrays of Carbon Nanotubes with Ferromagnetic Nanoparticles. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 6, 1056–1064. DOI: 10.3762/bjnano.6.106.
21. Danilyuk A. L., Kukharev A. V., Prischepa S. L. (2022) Long-Range Exchange Interaction Between Ferromagnetic Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes. *IEEE Transactions on Magnetics*. 58 (2). DOI: 10.1109/TMAG.2021.3102403.
22. Prischepa S. L., Danilyuk A. L., Kukharev A. V., Cojocar C. S., Kargin N. I., Le Normand F. (2019) Anisotropy of Assemblies of Densely Packed Co-Alloy Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes. *IEEE Magnetic Letters*. 10. DOI: 10.1109/LMAG.2019.2933380.
23. Bayev V. G., Fedotova J. A., Kasiuk J. V., Vorobyova S. A., Sohor A. A., Komissarov I. V., et al. (2018) CVD Graphene Sheets Electrochemically Decorated with “Core-Shell” Co/CoO Nanoparticles. *Applied Surface Science*. (440), 1252–1260. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.01.245.
24. Danilyuk A. L., Nazarenska E. S., Vorobyova S. A., Fedotova J. A., Prischepa S. L. (2023) Low-Temperature Magnetic Ordering in Co Core/CoO Shell Nanoparticles on the Copper Surface. *Current Applied Physics*. (56), 79–84. DOI: 10.1016/j.cap.2023.10.003.

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Богущ В. А., д-р физ.-мат. наук, проф., ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Лыньков Л. М., д-р техн. наук, проф., Почетный проф. БГУИР

Насонова Н. В., д-р техн. наук, доц., вед. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Материалы, технологии и средства обеспечения безопасности» (НИЛ 5.3) НИЧ, БГУИР

Прищепа С. Л., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. защиты информации, БГУИР

Белюсова Е. С., канд. техн. наук, доц., доц. каф. защиты информации, БГУИР

Бойправ О. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. защиты информации, БГУИР

Давыдов Г. В., канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр. НИЛ 5.3 НИЧ, БГУИР

Попов В. А., ст. науч. сотр. НИЛ 5.3 НИЧ, БГУИР

Потапович А. В., зав. НИЛ 5.3 НИЧ, БГУИР

Пухир Г. А., ст. препод. каф. защиты информации, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-23-17
E-mail: prischepa@bsuir.by
Прищепа Сергей Леонидович

Information about the authors

Bogush V. A., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Lynkou L. M., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Honorary Professor of the BSUIR

Nasonova N. V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Leading Scientist at the Research Laboratory "Materials, Technologies and Devices for Security" (Lab. 5.3) of R&D Department, BSUIR

Prischepa S. L., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Professor at Information Security Department, BSUIR

Belousova E. S., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Information Security Department, BSUIR

Boiprav O. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Information Security Department, BSUIR

Davydau H. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Scientist at the Lab. 5.3 of R&D Department, BSUIR

Papou V. A., Senior Researcher at the Lab. 5.3 of R&D Department, BSUIR

Patapovich A. V., Head of the Lab. 5.3 of R&D Department, BSUIR

Pukhir H. A., Senior Lecturer at Information Security Department, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-23-17
E-mail: prischepa@bsuir.by
Prischepa Serghej Leonidovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-55-69>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932+004.258

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ

Д. С. ЛИХАЧЁВ, Ц. МА, Н. А. ПЕТРОВСКИЙ, И. С. АЗАРОВ, В. Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 30.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Представлен анализ перспектив развития технологий обработки изображений и речевых сигналов. Приведены основные результаты по данным направлениям, полученные за последние годы в соответствующих научных школах Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Показано, что использование технологий машинного обучения в сочетании с методами цифровой обработки изображений и речевых сигналов позволяет существенно повысить эффективность систем их распознавания и классификации.

Ключевые слова: классификация изображений, скелетизация изображений, классификация речевых сигналов, оценка огибающей спектра авторегрессионного процесса.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Перспективные результаты исследований и разработки в области обработки изображений и речевых сигналов / Д. С. Лихачёв [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 55–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-55-69>.

PROMISING RESEARCH AND DEVELOPMENT RESULTS IN THE FIELD OF IMAGE AND SPEECH SIGNAL PROCESSING

DENIS S. LIKHACHOV, JUN MA, NICK A. PETROVSKY, ILYA S. AZAROV,
VIKTAR YU. TSVIATKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 30.01.2024

Abstract. An analysis of the prospects for the development of technologies for processing images and speech signals is presented. The main results in these areas obtained in recent years in the relevant scientific schools of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics are presented. It is shown that the use of machine learning technologies in combination with methods of digital processing of images and speech signals can significantly increase the efficiency of systems for their recognition and classification.

Keywords: image classification, image skeletonization, speech signal classification, estimation of the spectrum envelope of an autoregressive process.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Likhachov D. S., J. Ma, Petrovsky N. A., Azarov I. S., Tsviatkou V. Yu. (2024) Promising Research and Development Results in the Field of Image and Speech Signal Processing. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 55–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-55-69> (in Russian).

Введение

Развитие цифровой обработки сигналов привело к выделению нескольких самостоятельных направлений, таких как обработка изображений и обработка голоса и речи. Цифровая обработка изображений (ЦОИ) связана с их преобразованием, улучшением, анализом и интерпретацией с использованием различных алгоритмов, методов и инструментов. Она включает изменение или извлечение информации из цифровых изображений для улучшения их качества, извлечение полезных данных или повышение их пригодности для конкретных приложений.

Достижения в технологиях обработки изображений (камеры с высоким разрешением и улучшенные алгоритмы обработки) способствуют повышению качества изображений и возможностей их обработки. Рынок обработки изображений стремительно расширяется из-за резкого роста видеоаналитики и необходимости извлечения ценной информации из визуальных данных, поддерживая процессы принятия решений в различных отраслях. В здравоохранении ЦОИ является неотъемлемой частью медицинской визуализации, диагностики и исследований, что вносит значительный вклад в повышение рыночного спроса. Аналогичным образом такие отрасли, как развлечения, игры, дополненная и виртуальная реальность, в значительной степени опираются на эти технологии для создания реалистичных визуальных впечатлений. Приложения безопасности развиваются благодаря внедрению технологий обработки изображений, используемых для обнаружения объектов, распознавания лиц и видеомониторинга. Автомобильные системы безопасности, робототехника, дистанционное зондирование применяют ЦОИ для различных приложений. Поскольку эти технологии становятся все более доступными, их внедрение в различных секторах экономики продолжает расти, способствуя расширению рынка.

В цифровой обработке голоса и речи особое место принадлежит распознаванию, которое относится к технологии аутентификации, помогающей получать и интерпретировать человеческий голос и выполнять устные команды. Эта технология переводит голосовые команды в электрические сигналы, преобразует их в командные коды и отправляет на устройство в цифровом формате для исполнения. Она использует машинное обучение и искусственный интеллект (ИИ) для понимания разговорных выражений и направлена на повышение эффективности бизнеса за счет автоматизации таких задач, как расшифровка, ввод данных, планирование производственных процессов и технологических операций, позволяя пользователям сосредоточиться на более сложных задачах и повышая их общую производительность. Распознавание голоса и речи помогает людям с ограниченными возможностями и тем, кто испытывает трудности с набором текста, общаться более легко и эффективно.

Краткий обзор рынка технологий обработки изображений

По результатам исследований GII (Global Information, Inc.), глобальный спрос на рынок ЦОИ достигнет объема 27,26 млрд дол. США к 2030 г. (с 6,28 млрд дол. в 2022-м) со среднегодовым темпом роста 20,14 % в течение 2023–2030 гг. [1]. Ведущие поставщики программного обеспечения по обработке изображений – Nvidia Corporation, Canon Inc., Samsung Electronics Co. Ltd., Panasonic Corporation, Cognex Corporation, Teledyne Technologies, Vegavid Technology, Visionary.ai., IBM, Microsoft. GII отмечает растущую потребность в ЦОИ в секторе здравоохранения, что указывает на обширную тенденцию к технологическому прогрессу для оптимизации оказания медицинской помощи, повышения точности диагностики и улучшения ухода за пациентами. Прогнозируется, что к 2030 г. сегмент здравоохранения будет занимать примерно 25,9 % рынка. Ожидается, что по мере развития технологий дополнительные достижения в области ЦОИ будут иметь все большее значение, влияя на развитие здравоохранения. Некоторые факторы, влияющие на рынок, – это достижения в области ИИ и машинного обучения в ЦОИ, рост уровня использования мобильных устройств и высокая первоначальная стоимость ЦОИ [1, 2].

Достижения в области ИИ и машинного обучения существенно расширили сферу ЦОИ, произведя революцию в анализе, интерпретации и визуализации. Интеграция ИИ и машинного обучения стимулирует спрос на продукты и услуги ЦОИ. Рост качества изображений расширил возможности применения методов их цифровой обработки благодаря высокой детализации визуальных данных. Смартфоны оснащаются все более совершенными камерами, способными снимать изображения с высоким разрешением. На них доступно множество ориентированных на потребителя приложений и программного обеспечения для редактирования изображений. Таким образом, растущий уровень использования мобильных устройств тоже стимулирует рост рынка [1].

Сдерживающим фактором развития рынка ЦОИ, по мнению ГИ, является высокая первоначальная стоимость установки систем ЦОИ, включая установку качественных камер и датчиков, необходимых для захвата и обработки изображений или видео высокого разрешения [1]. По принципу применения ГИ сегментировала рынок ЦОИ на визуальный поиск продуктов, распознавание объектов, зрительную аналитику и др. Наибольшая доля выручки на рынке в 2022 г. зафиксирована в сегменте распознавания объектов, что можно объяснить растущей потребностью в технологиях распознавания объектов в различных секторах и применениях. Например, его можно использовать в розничной торговле для управления запасами, мониторинга полок и анализа поведения покупателей. Распознавание объектов может улучшить контроль качества, обнаружить дефекты и автоматизировать операции сборки на производстве. Распознавание объектов важно для современных систем помощи водителю и беспилотных транспортных средств в автомобилестроении [1].

В зависимости от конечного использования ГИ подразделяет рынок ЦОИ на здравоохранение, автомобили и транспорт, BFSI (банковские, финансовые услуги и страхование), розничную торговлю, электронную коммерцию и т. д. В 2022 г. в сегменте розничной торговли и электронной коммерции зарегистрирована самая высокая доля выручки на рынке. Эти секторы значительно выросли во многом благодаря потребности в улучшенном визуальном контенте, повышению качества обслуживания клиентов и оптимизации операций. Технологии ЦОИ стали ключевыми в онлайн-торговле, увеличивая продажи, улучшая взаимодействие с клиентами и повышая операционную эффективность [1].

Скелетизация изображений

Основу видеоаналитики составляют технологии выделения, параметризации и идентификации объектов. Идентификация использует характеристики распределения яркости (цвета) и формы областей изображения. Для компактного представления формы однородных областей широко применяются скелеты – множество тонких (в пределе однопиксельных) связанных линий, заключенных внутри области и описывающих ее структуру (рис. 1). Скелеты, используемые в распознавании образов, должны быть стабильными при изменении контраста и действии шума: мультипликативного и аддитивного, проявляющегося на границах и внутри скелетизируемой области соответственно.

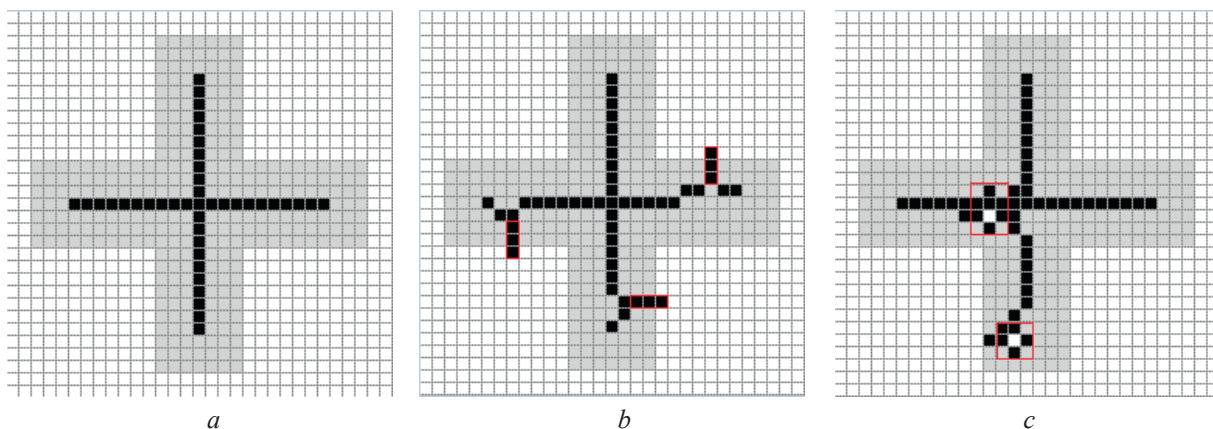


Рис. 1. Скелеты областей бинарных изображений:
a – без шума; *b, c* – с мультипликативным и аддитивным шумами соответственно

Fig. 1. Skeletons of binary image regions:
a – without noise; *b, c* – with multiplicative and additive noise, respectively

Методы формирования скелетов берут начало от [3] и делятся на три основных типа, основанных на: геометрических свойствах симметрии [4], построении непрерывных кривых [5], бинарной эрозии [6]. Скелеты, формируемые методами первых двух типов, характеризуются высокой избыточностью и низкой устойчивостью. Методы третьего типа могут распараллеливаться и подавлять незначительный мультипликативный шум, возникающий из-за деформации границ объектов при изменении условий формирования изображений (освещенность, перемещение камеры) [7]. Однако этим методам, как и методам других типов, свойственна избыточная скелети-

зация (формирование лишних ветвей скелетов). Для повышения устойчивости скелетов к мультипликативному шуму и исключения избыточных ветвей используются методы обрезки, основанные на дискретной эволюционной кривой [8], оценке изгиба [9], оценке значимости ветвей для реконструкции объекта, описываемого скелетом [10], сортировке по значимости элементов скелета [11]. Основным недостатком данных методов является необходимость ручного подбора параметров с учетом статистических особенностей изображения.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты формирования скелетов с помощью метода DCE (Discrete Curve Evolution), основанного на дискретной эволюционной кривой (ДЭК) [12–14]. ДЭК – виртуальная замкнутая ломаная, составленная из ребер k -угольника, вершинами которого (точками излома виртуальной ломаной) являются выступающие пиксели Р-контура скелетизируемой области бинарного изображения. В качестве точек излома ДЭК выбираются k выступающих пикселей, имеющих наибольшие значения параметра $K(r_1, r_2)$, определяемого для смежных ребер r_1 и r_2 ДЭК с помощью выражения:

$$K(r_1, r_2) = \frac{\beta(r_1, r_2)l(r_1)l(r_2)}{l(r_1) + l(r_2)}, \quad (1)$$

где $\beta(S_1, S_2)$ – угол между смежными ребрами r_1 и r_2 ; $l(r_1)$, $l(r_2)$ – длины смежных ребер r_1 и r_2 .

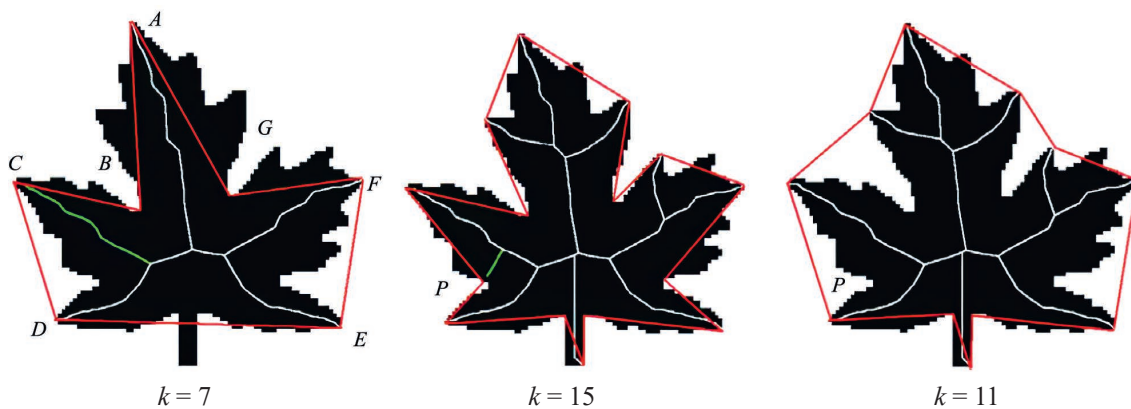


Рис. 2. Скелеты и дискретные эволюционные кривые (красные линии) при различных значениях k

Fig. 2. Skeletons and discrete evolutionary curves (red lines) at different values of k

Согласно методу DCE, в исходном скелете удаляются все ветви, кроме k выбранных. Значение k определяет оператор исходя из результатов визуальной оценки степени обрезки скелета. Из рис. 2 следует, что выбор значения параметра k существенно влияет на количество ветвей скелета и может приводить к недостаточной или избыточной скелетизации. Таким образом, значительные затраты времени при выборе k являются основным недостатком метода DCE.

Для автоматической (без участия оператора) обрезки избыточных ветвей скелетов предлагается метод DCEM (Discrete Curve Evolution Modification), основанный на оценке качества реконструкции изображения по скелету и являющийся модификацией метода DCE. Сущность DCEM состоит в определении формы ДЭК по результатам оценки точности восстановления контура области по скелету. Форма ДЭК определяется количеством и положением точек излома, выбираемых из множества выступающих пикселей P . Для параметризации выступающих пикселей в DCEM используется выражение (1) из метода DCE. Выбор значения k в предлагаемом методе основан на сравнении размеров и форм исходной скелетизируемой области и области, восстановленной по обрзанному скелету, состоящему из k ветвей. Метод DCEM состоит из следующих шагов.

1. Выделяется скелетизируемая область A_B бинарного изображения.
2. Выделяется контур C_B области A_B .
3. На контуре C_B ищутся выступающие пиксели P .
4. Формируется скелет S_B области A_B . Для этого используется метод ОРСА [15].
5. На скелете S_B детектируются конечные точки E ветвей. Фиксируется количество N_E конечных точек E .

6. Устанавливаются связи между выступающими P и конечными E точками (используется минимум расстояния). Несвязанные выступающие точки удаляются.
 7. Для всех выступающих точек P вычисляются значения параметра $K(r_1, r_2)$ с помощью (1).
 8. Инициализация счетчика k циклов обрезки ветвей скелета: $k = 3$.
 9. Начало цикла обрезки ветвей скелета. Среди выступающих точек P выбираются k точек с наибольшими значениями $K(r_1, r_2)$.
 10. Для выбранных k точек излома формируется обрезанный скелет $S_C(k)$, содержащий только k ветвей, соответствующих k конечным точкам E , связанным с выбранными k выступающими точками P .
 11. Из скелета $S_C(k)$ восстанавливается область $A_R(k)$, соответствующая области A_B . Восстановление осуществляется на основе операции бинарной дилатации. Критерием прекращения дилатации является минимум разности $D_A(k)$ площадей исходной A_B и восстановленной $A_R(k)$ областей.
 12. Увеличение значения k : $k = k + 1$.
 13. Проверка условия окончания цикла обрезки ветвей скелета. Если $k < N_E$, – переход на шаг 9.
 14. Определяется значение n , соответствующее минимальному значению разностей $\{D_A(n)\}_{(n=3, N_E)}$ площадей исходной A_B и восстановленной $A_R(k)$ областей.
 15. Формирование результата: обрезанный скелет $S_C(n)$, содержащий n ветвей.
- На рис. 3 приведены результаты скелетизации бинарных изображений с помощью метода ОРСА [15], результаты обрезки с помощью методов DCEM и DCE скелетов, полученных методом, описанным в [16], превосходящим по точности ОРСА.

Скелеты, полученные с помощью метода [15]	Результаты метода обрезки DCEM для скелетов, полученных с помощью метода [16]	Результаты метода обрезки DCE для скелетов, полученных с помощью метода [16]

Рис. 3. Результаты обрезки скелетов с помощью методов DCEM и DCE
Fig. 3. Results of skeleton trimming using DCEM and DCE methods

Из рис. 3 следует, что исходные бинарные изображения имеют значительный мультипликативный шум, приводящий к избыточной скелетизации, связанной с формированием большого количества лишних ветвей скелетов. Предложенный метод DCEM автоматической обрезки скелетов успешно справляется с устранением лишних ветвей, обеспечивая высокую точность формы скелетов, соизмеримую с точностью обрезанных скелетов, сформированных с помощью метода DCE на основе результатов более точного метода скелетизации [16].

Основным недостатком предложенного метода DCEM, как и базового DCE, а также других известных методов обрезки скелетов, является чувствительность к аддитивному шуму, возникающему внутри областей. Аддитивный шум, как и мультипликативный, приводит к избыточной скелетизации. Для формирования качественных скелетов в условиях аддитивного шума используются специально разработанные для таких условий методы скелетизации, например, МОРСА [17], а также методы, основанные на предварительной фильтрации изображений, например, АТФМ [18]. Для различных методов скелетизации бинарных изображений в табл. 1 приведены значения показателя R_{SV} искажений скелета в условиях мультипликативного (рис. 4) и аддитивного (рис. 5) шумов. Показатель R_{SV} вычисляется для скелетов S_N и S_C , сформированных в условиях шума и при его отсутствии соответственно, с помощью выражения:

$$R_{SV} = \frac{f_X(S_N, S_C) + f_X(S_C, S_N)}{2f_S(S_C)}, \quad (2)$$

где $f_X(S_A, S_B)$ – функция пересечения, определяющая количество пикселей изображения, которые принадлежат скелету S_A , но не принадлежат скелету S_B ($A = \{C, N\}$; $B = \{C, N\}$); $f_S(S_C)$ – функция, определяющая количество пикселей в скелете S_C .

Таблица 1. Оценка искажений скелетов в условиях мультипликативного и аддитивного шумов
Table 1. Estimate of skeleton distortions under conditions of multiplicative and additive noise

Метод скелетизации / Skeletonization method	R_{SV}	
	Мультипликативный шум (рис. 4) / Multiplicative noise (Fig. 4)	Аддитивный шум (рис. 5) / Additive noise (Fig. 5)
ОРТА	1,14	3,24
МОРСА	1,08	2,98
ОРТА + DCEM	0,74	2,89
ОРТА + АТФМ	0,85	0,01

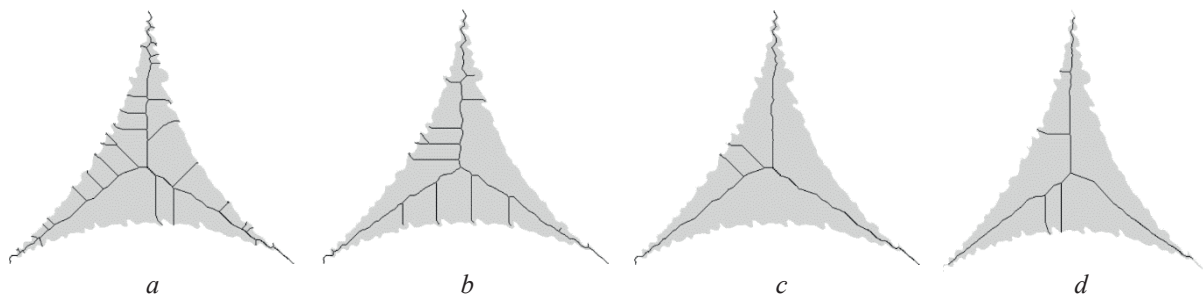


Рис. 4. Результаты скелетизации изображений в условиях мультипликативного шума методами:
 a – ОРТА; b – МОРСА; c – ОРТА + DCEM; d – ОРТА + АТФМ

Fig. 4. Results of image skeletonization in conditions of multiplicative noise at methods:
 a – ORTA; b – MORSA; c – ORTA + DCEM; d – ORTA + ATFM

Из табл. 1 следует, что в условиях мультипликативного шума обрезка скелетов более эффективна по сравнению с другими подходами к скелетизации. Использование метода DCEM в сочетании с наиболее простым и неустойчивым к шуму методом ОРТА [19] позволяет существенно уменьшить значение R_{SV} по сравнению с методами ОРТА, МОРСА и ОРТА в сочетании с АТФМ. Однако в условиях аддитивного шума эффективность сочетания ОРТА и DCEM резко снижается по сравнению с сочетанием ОРТА и АТФМ. Для формирования качественных скелетов в условиях совместного действия аддитивного и мультипликативного шумов необходимо использование сочетания методов DCEM и АТФМ.



Рис. 5. Результаты скелетизации изображений в условиях аддитивного шума методами:
a – OPCA; *b* – MOPCA; *c* – OPCA + DCEM; *d* – OPCA + ATFM

Fig. 5. Results of image skeletonization under additive noise conditions at methods:
a – OPCA; *b* – MOPCA; *c* – OPCA + DCEM; *d* – OPCA + ATFM

Распознавание жестов рук на основе скелетов

Для приведенных на рис. 6 примеров десяти типов изображений жестов рук в табл. 2 представлены результаты статической классификации на основе различных методов скелетизации с использованием разных классификаторов: дерева решений (DT); *k*-ближайших соседей (KNN), простого Байеса (NB), машины опорных векторов (SVM), ансамблевого обучения (EL) и искусственной нейронной сети (ANN) [20].

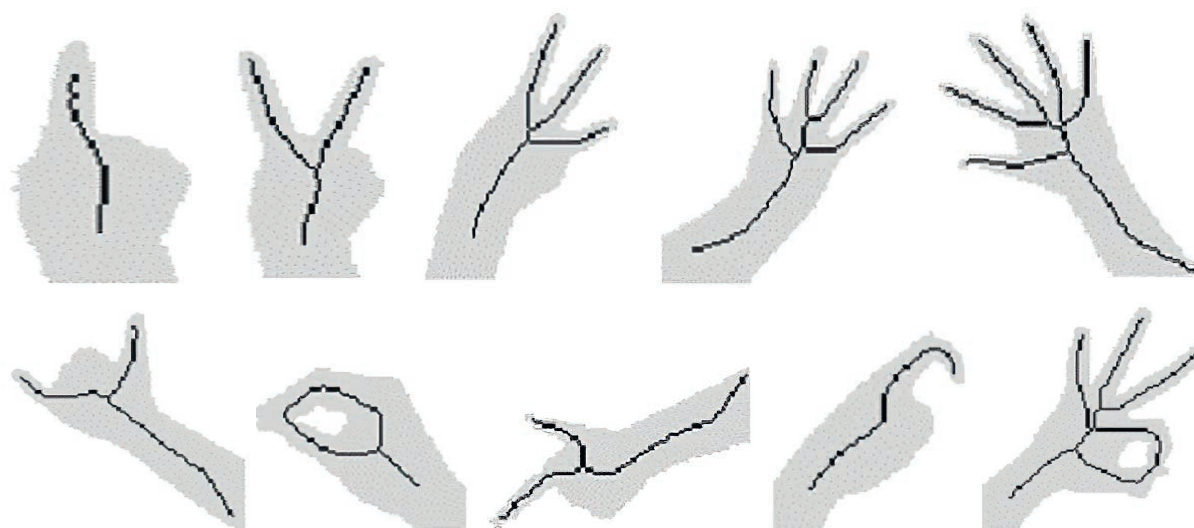


Рис. 6. Примеры скелетов десяти классов жестов рук
Fig. 6. Skeleton examples of ten hand gesture classes

Таблица 2. Оценка точности классификации жестов рук (%) по 10 классам
Table 2. Assessment of hand gesture classification accuracy (%) for 10 classes

Модель классификатора / Classifier model	Обучающий/проверочный наборы / Training/Validation Sets				Тестовый набор / Test set			
	Метод скелетизации / Skeletonization method				Метод скелетизации / Skeletonization method			
	OPCA+ ATFM	OPCA+ ATFM	MOPCA+ ATFM	MOPCA+ ATFM+ DCEM	OPCA+ ATFM	OPCA+ ATFM	MOPCA+ ATFM	MOPCA+ ATFM+ DCEM
DT	70,6	83,3	86,7	91,1	73,8	87,3	86,1	91,1
NB	61,8	76,1	77,4	82,9	62,0	81,4	80,2	77,2
SVM	59,9	77,4	80,4	81,6	62,4	75,5	82,3	81,0
KNN	63,9	75,5	83,8	82,7	63,7	75,9	87,8	84,4
EL	76,7	88,3	90,0	92,9	79,3	91,6	87,8	92,8
ANN	59,1	73,0	82,6	82,3	60,8	76,8	83,1	83,5
Среднее	65,2	78,9	83,4	85,5	67,0	81,4	84,5	85,0

Из табл. 2 следует, что сочетание методов МОРСА, АТФМ, DCEM и ансамблевого обучения обеспечивает более высокую точность классификации на тестовом наборе данных (92,8 %, что на 5–20 % лучше по сравнению с другими сочетаниями методов) за счет лучшей дискриминационной способности векторов признаков и устойчивости к совместному проявлению мультипликативного и аддитивного шумов. Время обучения классификаторов находится в диапазоне от 0,6 до 13,3 с (DT – 0,6 с; KNN – 1,1 с; EL – 4,4 с; NB – 5,2 с; SVM – 1,7 с; ANN – 13,3 с).

Краткий обзор рынка технологий распознавания голоса и речи

По результатам исследований ГИ, рынок технологий распознавания голоса и речи в США составил 3,4 млрд долл. в 2022 г. [1]. Прогнозируется, что Китай, вторая по величине экономика мира, к 2030 г. достигнет прогнозируемого размера рынка в 5,3 млрд долл. По результатам исследований Fortune Business Insights, мировой рынок распознавания речи и голоса вырастет с 12,62 млрд долл. в 2023-м до 59,62 млрд долл. к 2030-му при среднегодовом темпе роста 24,8 % [2]. Ведущими поставщиками программного обеспечения для распознавания речи являются: 3M Co., Alphabet Inc., Amazon.com Inc., Apple Inc., Baidu Inc., Brainasoft, CastleOS Software LLC, Cisco Systems Inc., iFLYTEK Co. Ltd., International Business Machines Corp., LumenVox GmbH, Meta Platforms Inc., Microsoft Corp., Optimal Technology Solutions LLC, Paragon GmbH and Co. KGaA, Raytheon Technologies Corp., Sensory Inc., talk2web, Verint Systems Inc., Advanced Voice Recognition Systems Inc. [1].

Повышение уровня жизни, растущая индустрия средств массовой информации и развлечений стимулируют спрос на распознавание голоса и речи во всем мире. Ведущие компании-разработчики внедряют расширенные функции, такие как проактивные голосовые помощники и распознавание голоса. Возможности усиления системы безопасности за счет голосовой аутентификации способствуют внедрению технологий распознавания голоса и речи в сфере BFSI. Распространение автомобилей с бортовыми информационно-развлекательными системами, в которых голос используется для управления, также способствует росту данного сегмента рынка. Ожидается, что в ближайшие годы распознавание речи составит самый крупный сегмент рынка речевых технологий благодаря растущему количеству онлайн-транзакций и усилению требований к аутентификации для снижения риска кибератак [1].

Параунитарные банки фильтров на основе алгебры кватернионов

Полифазное представление критически децимированного банка фильтров является одной из возможных реализаций дискретного вейвлет-преобразования, особенно актуального для задач обработки цифровых сигналов. Однако существует ограничение на свойства совершенной реконструкции сигнала таким банком фильтров при числе каналов больше двух. Одна из существующих альтернатив параметризации ортогональной матрицы – представление парой единичных кватернионов, которые позволяют сохранить ортогональность искомого преобразования, несмотря на квантование. Решетчатая структура соответствующего банка показана на рис. 7.

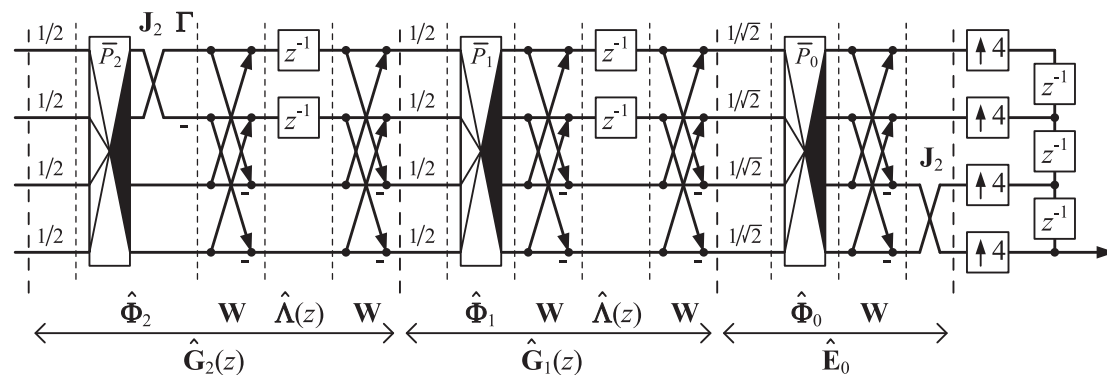


Рис. 7. Полифазная структура одномерного параунитарного банка фильтров
Fig. 7. Polyphase structure of a one-dimensional paraunitary filter bank

В свою очередь, одномерные параунитарные банки фильтров в алгебре кватернионов с линейной фазочастотной характеристикой (Q-ПУБФ) могут быть применены для создания многомерных разделимых систем, где 2D-сигналы отдельно преобразуются в вертикальном и горизонталь-

ном направлениях. Таким образом, Q-PUFB – это системы без потерь, несмотря на квантование коэффициентов, условие регулярности первого рода зафиксировано в значениях коэффициентов решетчатой структуры банка и легко удовлетворяется для арифметики с фиксированной запятой [21]. Однако многомерные сигналы, как правило, имеют неразделимую природу, и 2D-неразделимые банки фильтров более эффективны с точки зрения характеристики эффективности кодирования (Coding Gain) в отличие от разделимых, так как позволяют лучше учитывать пространственные изменения. Принимая во внимание преимущества Q-ПУБФ для задач сжатия и обработки, получена новая техника факторизации двумерных неразделимых кватернионных параунитарных банков фильтров (2D-NS Q-ПУБФ). Цель разработанной техники – обеспечить возможность формализовать описание 2D-неразделимого преобразования, имея полифазную передаточную матрицу синтеза и анализа Q-ПУБФ для одномерного случая.

Исходная факторизация (рис. 7) 4-канального разделимого банка фильтров Q-ПУБФ может быть преобразована в 2D NS (Non-Separable) Q-ПУБФ, в свою очередь, коэффициенты двумерной структуры могут быть синтезированы неразделимым образом. По аналогии есть возможность получить факторизацию 8-канального неразделимого 2D Q-ПУБФ. Разработанные факторизации 2D-неразделимых банков фильтров названы 16in-16out- и 64in-64out-системами, соответственно для 4- и 8-канального Q-ПУБФ прототипов.

Задача синтеза 2D NS Q-ПУБФ сформулирована, как задача поиска условного экстремума: найти коэффициенты 2D-банка фильтра, которые обеспечивают локальный минимум целевой функции $f(x) = \min(-CG_{2D}(x))$ при заданном ограничении ослабления в полосе пропуска каналов банка фильтров. Синтез 2D Q-ПУБФ, строится на основе численных методов. Коэффициент эффективности кодирования CG_{2D} для полученного, например, 4-канального неразделимого банка фильтров 2D NS Q-ПУБФ, и переход на новую итерацию алгоритма синтеза определяются в соответствии со следующей процедурой [22]:

- 1) генерируется матрица белого шума размером $N \times N$;
- 2) формируются входные данные $x_{n,n}$ на основе двумерной модели AR(1);
- 3) проводится обработка $x_{n,n}$ синтезированным 2D NS Q-ПУБФ;
- 4) вычисляется коэффициент эффективности кодирования неразделимого банка фильтров 2D NS Q-ПУБФ:

$$CG_{2D} = 10 \lg \frac{\frac{1}{M^2} \sum_{k=0}^{M^2-1} \sigma_{xk}^2}{\left(\prod_{k=0}^{M^2-1} \sigma_{xk}^2 \right)^{\frac{1}{M^2}}}, \quad (3)$$

где σ_{xk}^2 – дисперсия сигнала в k -м канале банка фильтров.

Получены амплитудно-частотные характеристики восьми диагональных каналов структуры 64in-64out 2D-неразделимого банка фильтров PMI LP Q-ПУБФ: $N = 2$, $CG_{2D} = 17,12$ дБ [23]. Коэффициенты 2D Q-ПУБФ с зеркальной симметрией частотных характеристик приведены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты 2D-неразделимого одномерного параунитарного банка фильтров ($N = 2$, $CG_{2D} = 17,12$ дБ)

Table 3. Coefficients of 2D inseparable one-dimensional paraunitary filter bank ($N = 2$, $CG_{2D} = 17.12$ dB)

P_0	P_1	P_2	Q_0	Q_1	Q_2
-0,2991	-0,9980	+0,3604	-0,0398	-0,0167	-0,5669
-0,8952i	+0,0607i	-0,3153i	+0,2928i	+0,9998i	+0,5818i
-0,2010j	+0,0071j	+0,4282j	-0,0691j	-0,0065j	-0,2653j
-0,2622k	-0,0129k	+0,7663k	+0,9528k	+0,0094k	-0,5404k

Полученная эффективность кодирования для 16in-16out 2D-банка фильтров превышает одномерный случай почти на 2 дБ ($CG = 8,23$ дБ в сравнении с $CG_{MD} = 11,55$ дБ). Таким обра-

зом, неразделимые двумерные структуры банка фильтров в алгебре кватернионов 16in-16out и 64in-64out, полученные в результате новой факторизации полифазных передаточных матриц соответствующих одномерных 4- и 8-канальных банков фильтров, позволяют проводить обработку непосредственно в двумерной области по схеме кодирования без потерь в ограничениях целочисленной арифметики. Сохранение свойств перфективной реконструкции дает возможность реализовать решетчатую структуру в виде сопроцессора для кристалла программируемой логической интегральной схемы для различного формата представления коэффициентов в числах с фиксированной точкой [23].

Генеративный метод спектрального оценивания на базе авторегрессионной модели анализируемого сигнала

В настоящее время большое количество задач обработки речевых сигналов решается с помощью машинного обучения. Обычно в таких системах используются признаки на основе спектральной оценки сигнала. При этом эффективность обработки прямо пропорционально связана со спектральным разрешением и точностью оценки. В большинстве применяемых сегодня методах вычисления признаков для машинного обучения в частотной области используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ), которое подходит для частотно-временного анализа периодических или частично периодических сигналов. Спектральная оценка ДПФ предполагает использование временного окна, что приводит к значительным искажениям полученной спектральной оценки. Однако недостатки ДПФ можно в значительной степени нивелировать путем спектрального оценивания на базе авторегрессионной (АР) модели анализируемого сигнала, используя генеративный подход [24], который предполагает вычисление ДПФ последовательности отчетов, сгенерированной в соответствии с использованием АР-модели входного речевого сигнала. Сгенерированная последовательность учитывает периодичность преобразования, позволяя тем самым повысить точность спектральной оценки ДПФ. Примером успешного использования данного подхода в области машинного обучения является его применение для вычисления малоразмерных спектральных признаков на основе дискретной оценки огибающей спектра авторегрессионного процесса (ОСАП) в системах автоматического выявления патологий голосовой функции человека [25, 26].

Основная идея метода получения дискретной оценки ОСАП состоит в том, чтобы использовать ДПФ без применения оконной функции для обработки входных данных, обеспечив при этом согласованность периода анализируемого сигнала и размера ДПФ. С этой целью в качестве входных данных для ДПФ используется специальным образом сгенерированная последовательность, которая имеет равный с размером ДПФ период и соответствующий анализируемому сигналу спектральный состав. Признаки на основе ОСАП получаются в результате ДПФ сгенерированной последовательности малой длины. Процесс вычисления дискретной оценки ОСАП включает следующие три этапа [24].

1. По входному кадру анализируемого сигнала с использованием автокорреляционного метода определяются параметры АР-модели P -го порядка a_k , $k = \overline{1, P}$.

2. С помощью АР-модели генерируется последовательность с периодом, равным размеру ДПФ. Размер ДПФ зависит от целевой размерности вектора признаков и покрываемого им частотного диапазона. Пусть требуется сгенерировать ненулевую последовательность $x(m)$ длиной M

$$\sum_{m=1}^M |x(m)| \neq 0. \quad (4)$$

Используя параметры АР-модели анализируемого процесса, получаем следующее соотношение:

$$x(m) = -\sum_{k=1}^P a_k x(m-k), \quad m = \overline{1, M+P}. \quad (5)$$

Положив $x(m) = 0$ при $m = \overline{M+1, M+P}$ и $m = \overline{-P+1, 0}$, выражение (5) для $m = \overline{1, M}$ можно записать в виде:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -a_1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -a_2 & a_1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -a_p \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(M) \end{pmatrix} = 0. \quad (6)$$

Для выполнения условия (4) установим $x(M/2) = 1$. Решив систему линейных уравнений (3), найдем искомую последовательность $x(m)$, $m = 1, M$, причем для нее будет характерно затухание к краям кадра, что позволяет добиться того же эффекта, как и в случае применения оконной функции.

3. Вычисляется ДПФ одного периода последовательности, сгенерированной на этапе 2:

$$S_{est}(k) = \left| \sum_{m=0}^{M-1} x(m) e^{-i \frac{2\pi}{M} km} \right|, \quad k = 1, \frac{M}{2}. \quad (7)$$

Полученный дискретный спектр $S_{est}(k)$ используется в качестве вектора признаков для анализа голосового сигнала.

На рис. 8 проиллюстрированы основные этапы вычисления малоразмерных спектральных признаков на основе ОСАП [26]. На рис. 8, *a* показан один фрейм исходного сигнала, на рис. 8, *b* – вычисленные параметры АР-модели сигнала. В данном случае использовался порядок фильтра-предсказателя, равный 280. Модель достаточно точно описывает гармоническую структуру сигнала, что показано на рис. 8, *c*. На рис. 8, *d* представлена последовательность, которая получается в результате решения (3). Видно, что центральный отсчет равен единице, а по краям интервала наблюдения сигнал стремится к нулю, что дает при спектральном оценивании тот же эффект, что и применение оконной функции. На рис. 8, *e* показано вычисление ДПФ от сгенерированной последовательности. Полученные спектральные составляющие являются дискретной оценкой ОСАП и используются в качестве вектора признаков для анализа голоса.

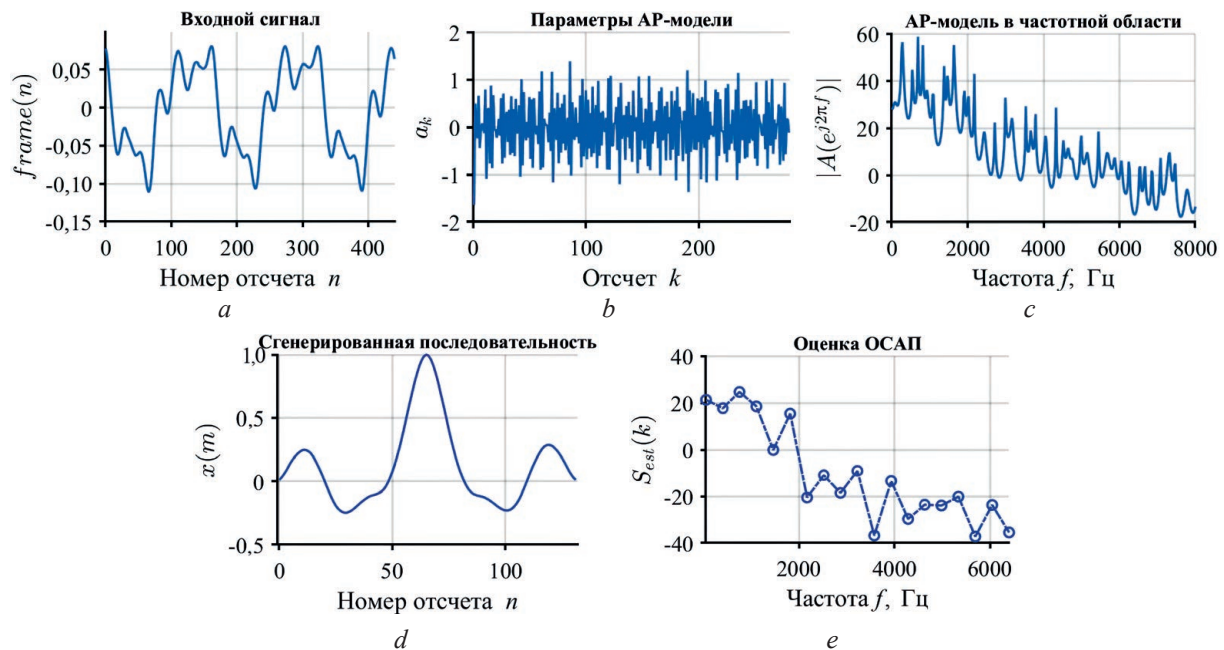


Рис. 8. Этапы получения оценки огибающей спектра авторегрессионного процесса:

a – один фрейм исходного сигнала; *b* – параметры АР-модели сигнала;

c – гармоническая структура сигнала; *d* – результат решения системы (6);

e – дискретное преобразование Фурье сгенерированной последовательности

Fig. 8. Stages of obtaining an estimate of the spectrum envelope of the autoregressive process:

a – one frame of the original signal; *b* – parameters of the AP signal model; *c* – harmonic structure of the signal;

d – the result of solving system (6); *e* – discrete Fourier transform of the generated sequence

В [26] проведен анализ эффективности метода вычисления дискретной оценки ОСАП путем сравнения точности и стабильности представления спектра тестового сигнала с помощью спектральных огибающих, полученных тремя способами на основе: ОСАП, ДПФ без применения окна, ДПФ с применением окна Ханна. Как показали результаты представленных в [26] экспериментов, спектральные огибающие, полученные с помощью метода на основе ОСАП, более точно, по сравнению с остальными методами, представляют спектр тестового сигнала с точки зрения минимальной квадратичной ошибки.

Результаты проведенных экспериментов по использованию признаков на основе ОСАП в системах машинного обучения говорят о том, что данный подход позволяет более эффективно извлекать полезную для классификации информацию из обучающих данных и ощутимо повышать точность классификации. Это особенно актуально в случаях, когда по каким-либо причинам доступен только небольшой объем обучающих данных. Применение сложных моделей классификации в таких случаях, например, на основе глубоких нейросетей, нецелесообразно вследствие явления переобучения. Повышение точности классификации в этих условиях возможно при использовании простых, но более адекватных речевому процессу моделей.

Заключение

В ближайшие годы ожидается стремительный рост объемов рынка технологий обработки изображений и речи. В этой связи актуальными являются научные исследования и разработки, а также подготовка инженеров и магистров по данным направлениям. Особое внимание необходимо уделить интеграции технологий цифровой обработки изображений, речевых сигналов и машинного обучения.

Список литературы

1. GII. Global Information [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.giiresearch.com/>. Дата доступа: 29.01.2024.
2. Fortune Business Insights Information [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fortunebusinessinsights.com/>. Дата доступа: 29.01.2024.
3. Blum, H. A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape / H. Blum. Cambridge: MIT Press, MA, 1967. P. 362–380.
4. Saha, P. K. A Survey on Skeletonization Algorithms and Their Applications / P. K. Saha, G. Borgfors, G. Sanniti di Baja // Pattern Recognition Letter. 2016. Vol. 76. P. 3–12. DOI: 10.1016/j.patrec.2015.04.006.
5. Ogniewicz, R. L. Hierarchic Voronoi Skeletons / R. L. Ogniewicz, O. Kübler // Pattern Recognition. 1995. Vol. 28. P. 343–359.
6. Leymarie, F. Simulating the Grassfire Transform Using an Active Contour Model / F. Leymarie, M. D. Levine // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. Vol. 14. P. 56–75.
7. Saha, P. K. Skeletonization: Theory, Methods, and Applications / P. K. Saha, G. Borgfors, G. Sanniti di Baja // Academic Press. London. 2017.
8. Bai, X. Skeleton Pruning by Contour Partitioning with Discrete Curve Evolution / X. Bai, L. J. Latecki, W. Y. Liu // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2007. Vol. 29, No 3. P. 449–462. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.59.
9. Skeleton Pruning as Trade-Off Between Skeleton Simplicity and Reconstruction Error / S. Wei [et al.] // Sci. China Inf. Sci. 2013. Vol. 56. P. 1–14. DOI: 10.1007/s11432-012-4715-3.
10. A Skeleton Pruning Algorithm Based on Information Fusion / H. Liu [et al.] // Pattern Recognit. Lett. 2013. Vol. 34, No 10. P. 1138–1145. DOI: 10.1016/j.patrec.2013.03.013.
11. A Skeleton Pruning Method Based on Saliency Sorting / G. Siyu [et al.] // 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Changsha, China. 2019. P. 593–599. DOI: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101710.
12. Latecki, L. J. Convexity Rule for Shape Decomposition Based on Discrete Contour Evolution / L. J. Latecki, R. Lakämper // Comput. Vis. Image Underst. 1999. Vol. 73, No 3. P. 441–454. DOI: 10.1006/cviu.1998.0738.
13. Latecki, L. J. Polygon Evolution by Vertex Deletion / L. J. Latecki, R. Lakämper // Lect. Notes Comput. Sci. (Including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics), Springer, Berlin, Heidelberg. 1999. Vol. 1682. P. 398–409. DOI: 10.1007/3-540-48236-9_35.
14. Latecki, L. J. Shape Similarity Measure Based on Correspondence of Visual Parts / L. J. Latecki, R. Lakämper // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2000. Vol. 22, No 10. P. 1185–1190. DOI: 10.1109/34.879802.

15. Ma, J. A Novel Fast Iterative Parallel Thinning Algorithm / J. Ma, X. H. Ren, V. Yu. Tsviatkou // Proceedings of the 2020 4th International Conference on Vision, Image and Signal Processing, New York, NY, USA. 2020. Article 7. P. 1–5. DOI: 10.1145/3448823.3448836.
16. Choi, W. Extraction of the Euclidean Skeleton Based on a Connectivity Criterion / W. Choi, K. Lam, W. Siu // Pattern Recognition. 2003. Vol. 36. P. 721–729. DOI: 10.1016/S0031-3203(02)00098-5.
17. Novel Fully Parallel Skeletonization Algorithm / J. Ma [et al.] // Pattern Analysis and Applications. 2021. P. 1–20. DOI: 10.1007/s10044-021-01039-y.
18. Noise-Against Skeleton Extraction Framework and Application on Hand Gesture Recognition / J. Ma [et al.] // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 9547–9559. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3240313.
19. A One-Pass Thinning Algorithm and Its Parallel Implementation / R. T. Chin [et al.] // Computer Vision, Graphics and Image Processing. Vol. 40. P. 30–40. DOI: 10.1016/0734-189X(87)90054-5.
20. Ma, J. Hand Gesture Recognition Based on Skeletal Image Properties / J. Ma, V. Y. Tsviatkou, A. A. Boriskevich // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems: Collec. of Sci. Pap. Minsk, 2023. Iss. 7. P. 247–256.
21. Петровский, Н. А. Двумерные неразделимые банки фильтров на основе кватернионов / Н. А. Петровский, Е. В. Рыбенков, А. А. Петровский // Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA): тр. Междунар. науч.-техн. конф. Signal Processing, 2018. С. 120–125.
22. Рыбенков, Е. В. 2D неразделимая целочисленная реализация параунитарных банков фильтров на основе блочно-лестничной структуры / Е. В. Рыбенков, Н. А. Петровский // 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO): тр. Междунар. науч.-техн. конф., 2019. С. 1494–1499.
23. Рыбенков, Е. В. Проектирование неразделимых многомерных банков фильтров в алгебре кватернионов / Е. В. Рыбенков, Н. А. Петровский // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2019): тр. 21-й Междунар. конф., 2019., Т. 2. С. 368–373.
24. Малоразмерные спектральные признаки для машинного обучения в задачах анализа и классификации голосового сигнала / Д. С. Лихачёв [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20, № 1. С. 102–112. DOI: 10.37661/1816-0301-2023-20-1-102-112.
25. Генеративный метод получения спектральных огибающих в контексте задачи анализа состояния голосовой функции человека / Д. С. Лихачёв [и др.] // Медэлектроника-2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XI Междунар. науч.-тех. конф., г. Минск, 8–9 декабря 2022 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэл., 2022. С. 281–283.
26. Комбинированный метод отбора информативных признаков для выявления речевых патологий по голосу / Д. С. Лихачёв [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 110–117. DOI: 10.35596/1729-7648-2023-21-4-110-117.

References

1. *GII. Global Information*. Available: <https://www.giiresearch.com/> (Accessed 29 January 2024).
2. *Fortune Business Insights Information*. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/> (Accessed 29 January 2024).
3. Blum H. (1967). *A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape*. Cambridge, MIT Press, MA. 362–380.
4. Saha P. K., Borgefors G., Sanniti di Baja G. (2016) A Survey on Skeletonization Algorithms and Their Applications. *Pattern Recognition Letter*. 76, 3–12. DOI: 10.1016/j.patrec.2015.04.006.
5. Ogniewicz R. L., Kübler O. (1995) Hierarchic Voronoi Skeletons. *Pattern Recognition*. 28, 343–359.
6. Leymarie F., Levine M. D. (1992) Simulating the Grassfire Transform Using an Active Contour Model. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 14, 56–75.
7. Saha P. K., Borgefors G., Sanniti di Baja G. (2017) *Skeletonization: Theory, Methods, and Applications*. Academic Press. London.
8. Bai X., Latecki L. J., Liu W. Y. (2007) Skeleton Pruning by Contour Partitioning with Discrete Curve Evolution. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 29 (3), 449–462. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.59.
9. Wei S., Xiang B. A. I., Xingwei Y., Jan L. L. (2013) Skeleton Pruning as Trade-Off Between Skeleton Simplicity and Reconstruction Error. *Sci. China Inf. Sci.* 56, 1–14. DOI: 10.1007/s11432-012-4715-3.
10. Liu H., Wu Z. H., Zhang X., Hsu D. F. (2013) A Skeleton Pruning Algorithm Based on Information Fusion. *Pattern Recognit. Lett.* 34 (10), 1138–1145. DOI: 10.1016/j.patrec.2013.03.013.
11. Siyu G., Pingping H., Zhigang L., He W., Min L. (2019) A Skeleton Pruning Method Based on Saliency Sorting. *14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. Changsha, China. 593–599. DOI: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101710.
12. Latecki L. J., Lakämper R. (1999) Convexity Rule for Shape Decomposition Based on Discrete Contour Evolution. *Comput. Vis. Image Underst.* 73 (3), 441–454. DOI: 10.1006/cviu.1998.0738.

13. Latecki L. J., Lakämper R. (1999) Polygon Evolution by Vertex Deletion. *Lect. Notes Comput. Sci. (Including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, Springer, Berlin, Heidelberg. 1682, 398–409. DOI: 10.1007/3-540-48236-9_35.
14. Latecki L. J., Lakämper R. (1999) Shape Similarity Measure Based on Correspondence of Visual Parts. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 22 (10), 1185–1190. DOI: 10.1109/34.879802.
15. Ma J., Ren X. H., Tsviatkou V. Yu. (2020) A Novel Fast Iterative Parallel Thinning Algorithm. *Proceedings of the 2020 4th International Conference on Vision, Image and Signal Processing, New York, NY, USA*. Article 7, 1–5. DOI: 10.1145/3448823.3448836.
16. Choi W., Lam K., Siu W. (2003) Extraction of the Euclidean Skeleton Based on a Connectivity Criterion. *Pattern Recognition*. 36, 721–729. DOI: 10.1016/S0031-3203(02)00098-5.
17. Ma J., Ren X., Tsviatkou V. Yu., Kanapelka V. K. (2021) A Novel Fully Parallel Skeletonization Algorithm. *Pattern Analysis and Applications*. 1–20. DOI: 10.1007/s10044-021-01039-y.
18. Ma J., Ren X., Li H., Li W., Tsviatkou V. Y., Boriskevich A. A. (2023) Noise-Against Skeleton Extraction Framework and Application on Hand Gesture Recognition. *IEEE Access*. 11, 9547–9559. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3240313.
19. Chin R. T., Wan H. K., Stover D., Iverson R. (1987) A One-Pass Thinning Algorithm and Its Parallel Implementation. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 40, 30–40. DOI: 10.1016/0734-189X(87)90054-5.
20. Ma J., Tsviatkou V. Y., Boriskevich A. A. (2023) Hand Gesture Recognition Based on Skeletal Image Properties. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems: Collection of Scientific Papers*. (7), 247–256.
21. Petrovsky N. A., Rybenkov E. V., Petrovsky A. A. (2018) Two-Dimensional Non-Separable Quaternionic Paraunitary Filter Banks. *Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*. 120–125.
22. Rybenkov E. V., Petrovsky N. A. (2019) 2D Non-Separable Integer Implementation of Paraunitary Filter Bank Based on the Quaternionic Multiplier Block-Lifting Structure. *27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 1494–1499.
23. Rybenkov E. V., Petrovsky N. A. (2019) Design of Non-Separable Multidimensional Filter Banks in Quaternionic Algebra. *Digital Signal Processing and its Applications: Proc. of 21 International Conference (DSPA'2019)*. 2, 368–373.
24. Likhachov D. S., Vashkevich M. I., Petrovsky N. A., Azarov E. S. (2023) Small-Size Spectral Features for Machine Learning in Voice Signal Analysis and Classification Tasks. *Informatics*. 20 (1), 102–112. DOI: 10.37661/1816-0301-2023-20-1-102-112 (in Russian).
25. Likhachov D. S., Vashkevich M. I., Petrovsky N. A., Azarov I. S. (2022) Generative Method of Obtaining Spectral Envelopes for Speech Signal Analysis and Processing Tasks. *Medeconomics-2022. Means of Medical Electronics and New Medical Technologies: Collection of Scientific Articles XI Intern. Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 8–9*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 281–283 (in Russian).
26. Likhachov D. S., Vashkevich M. I., Petrovsky N. A., Azarov E. S. (2023) Combined Method for Informative Feature Selection for Speech Pathology Detection. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 110–117. DOI: 10.35596/1729-7648-2023-21-4-110-117 (in Russian).

Вклад авторов

Лихачёв Д. С. разработал генеративный метод спектрального оценивания речевых сигналов на базе авторегрессионной модели, провел экспериментальные исследования.

Ма Ц. разработал алгоритм скелетизации изображений, провел экспериментальные исследования по распознаванию жестов рук.

Петровский Н. А. разработал структуру параунитарных банков фильтров на основе алгебры кватернионов, алгоритм их синтеза, провел экспериментальные исследования.

Азаров И. С., Цветков В. Ю. определили направления и цели исследований, осуществили постановку задач и редактирование статьи, выполнили интерпретацию полученных результатов.

Authors' contribution

Likhachov D. S. developed a generative method for spectral estimation of speech signals based on an autoregressive model, conducted experimental studies.

Ma J. developed an image skeletonization algorithm and conducted experimental studies on hand gesture recognition.

Petrovsky N. A. developed the structure of paraunitary filter banks based on quaternion algebra, an algorithm for their synthesis, and conducted experimental studies.

Azarov E. S., Tsviatkou V. Yu. determined the directions and goals of the research, formulated the research problems and edited the article, and interpreted the results obtained.

Сведения об авторах

Лихачёв Д. С., канд. техн. наук, доц., доц. каф. электронных вычислительных средств, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Ма Ц., ассист. каф. инфокоммуникационных технологий, БГУИР

Петровский Н. А., канд. техн. наук, доц., доц. каф. электронных вычислительных средств, БГУИР

Азаров И. С., д-р техн. наук, проф., зав. каф. электронных вычислительных средств, БГУИР

Цветков В. Ю., д-р техн. наук, проф., зав. каф. инфокоммуникационных технологий, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Information about the authors

Likhachov D. S., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Computer Engineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Ma J., Assistant at the Department of Infocommunication Technologies, BSUIR

Petrovsky N. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Computer Engineering Department, BSUIR

Azarov I. S., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of Computer Engineering Department, BSUIR

Tsviatkou V. Yu., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-70-79>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.8

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ И КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИХ РАЗРАБОТКИ, ПРИМЕНЕНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ

В. В. ГОЛЕНКОВ, Н. А. ГУЛЯКИНА, В. П. ИВАШЕНКО, Д. В. ШУНКЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 29.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Рассмотрены тенденции развития технологий искусственного интеллекта в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники за последние пять лет, перечислены основные результаты, полученные за указанный период как в области развития самих технологий искусственного интеллекта, так и в области подготовки кадров по искусственному интеллекту и реализации взаимодействия между коллективами специалистов, работающих в данной области. Обоснована необходимость перехода к интеллектуальным компьютерным системам нового поколения, обладающим высоким уровнем интероперабельности, и создания соответствующей комплексной технологии их разработки, сопровождения и эксплуатации. Изучены проблемы, препятствующие активной разработке и внедрению интеллектуальных компьютерных систем нового поколения, рассмотрено понятие смыслового пространства как основы представления и интеграции знаний в таких системах. Приведены принципы реализации аппаратной платформы интерпретации информационных процессов в смысловом пространстве – ассоциативного семантического компьютера.

Ключевые слова: искусственный интеллект, технология OSTIS, интеллектуальная компьютерная система нового поколения, смысловое пространство, SC-код, онтология, ассоциативный семантический компьютер, интероперабельность, конвергенция, семантическая совместимость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают благодарность коллективу кафедры интеллектуальных информационных технологий БГУИР за помощь в работе и ценные замечания.

Для цитирования. Интеллектуальные компьютерные системы нового поколения и комплексная технология их разработки, применения и модернизации / В. В. Голенков [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 70–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-70-79>.

INTELLIGENT COMPUTER SYSTEMS OF NEW GENERATION AND COMPLEX TECHNOLOGY OF THEIR DEVELOPMENT, APPLICATION AND MODERNIZATION

VLADIMIR V. GOLENKOV, NATALIA A. GULYAKINA,
VALERIAN P. IVASHENKO, DANIIL V. SHUNKEVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 29.01.2024

Abstract. The paper considers the trends in the development of artificial intelligence technologies in BSUIR for the last five years, lists the main results obtained during this period both in the field of development of artificial intelligence technologies themselves, and in the field of education in artificial intelligence and realization of interaction between teams of specialists working in this field. The necessity of transition to new-generation in-

telligent computer systems with a high level of interoperability and creation of an appropriate complex technology for their development, maintenance and operation is substantiated. The problems hindering the active development and implementation of new generation intelligent computer systems are considered. The concept of semantic space as a basis for representation and integration of knowledge in intelligent computer systems of new generation is considered. The principles of implementation of hardware platform for interpretation of information processes in the semantic space – associative semantic computer – are considered.

Keywords: artificial intelligence, OSTIS technology, intelligent computer system of new generation, semantic space, SC-code, ontology, associative semantic computer, interoperability, convergence, semantic compatibility.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors would like to express their gratitude to the collective of the Department of Intelligent Information Technologies of BSUIR for their help in the work and valuable comments.

For citation. Golenkov V. V., Gulyakina N. A., Ivashenko V. P., Shunkevich D. V. (2024) Intelligent Computer Systems of New Generation and Complex Technology of Their Development, Application and Modernization. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 70–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-70-79> (in Russian).

Развитие исследований в области искусственного интеллекта в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники

Спектр исследований в области искусственного интеллекта (ИИ), проводимых в БГУИР, достаточно широк и включает в себя обработку сигналов, изображений и речи, робототехнику, машинное обучение, анализ больших данных, искусственные нейронные сети и др. В настоящее время основное направление в разработке технологий ИИ – повышение уровня интеллекта компьютерных систем, т. е. переход от так называемого слабого ИИ к сильному. В то же время расширение областей применения интеллектуальных компьютерных систем (ИКС) предъявляет к ним принципиально новые требования. Все более актуальным является создание интеллектуальных компьютерных систем нового поколения (ИКСНП), обладающих высоким уровнем интероперабельности. В данном случае под интероперабельностью [1] понимается не просто обеспечение совместимости систем на уровне технической реализации (согласование протоколов взаимодействия, программных интерфейсов и т. д.), а обеспечение их семантической совместимости и способности к коллективному решению сложных задач. Это предполагает существенное развитие и повышение уровня формализации теории ИКС, переосмысление существующих технологий их разработки и сопровождения в контексте обеспечения конвергенции. В свою очередь, для того, чтобы обеспечить широту сфер применения такой технологии и ее жизнеспособность, необходимо учитывать дополнительное требование, предъявляемое уже к самой технологии – ее комплексность в двух разных аспектах:

- комплексность объекта разработки и сопровождения, предполагающая, что технология обеспечивает разработку и сопровождение ИКС любых классов, а также любых компонентов ИКС. Это необходимо для обеспечения совместимости всех компонентов ИКС и систем разных классов, и как следствие – для обеспечения их интероперабельности;

- комплексность с точки зрения поддержки всех этапов жизненного цикла ИКС и их компонентов. Необходимость данного аспекта обусловлена тем, что разработка технологии проектирования ИКСНП без разработки технологий их сопровождения, эволюции и эксплуатации в перспективе будет сильно затруднять трудоемкость внедрения таких систем и эффективность их применения.

С учетом комплексности технологии важной особенностью должен стать ее открытый характер, предполагающий, с одной стороны, возможность участия в ее разработке ученых из различных областей науки независимо от их территориального расположения, с другой стороны – возможность интеграции любых результатов в области ИИ, как уже полученных, так и тех, что будут получены в будущем. В противном случае достичь комплексности технологии в обоих аспектах не представляется возможным.

Важнейшая проблема в области разработки технологий ИИ – необходимость подготовки высококвалифицированных кадров. С 1995 г. в БГУИР ведется подготовка молодых специалистов по специальности «Искусственный интеллект», создана соответствующая кафедра. При содействии БГУИР в течение последних пяти лет открыта подготовка по специальности «Искусственный интеллект» в Гродненском государственном университете имени Янки Купалы и Полоцком

государственном университете имени Евфросинии Полоцкой. Таким образом, подготовка по указанной специальности уже ведется в четырех вузах республики (с учетом Брестского государственного технического университета (БрГТУ)), при этом БГУИР является головной организацией по данной специальности. Основная идея организации учебного процесса по специальности «Искусственный интеллект» заключается в реализации концепции тесной интеграции бизнеса, образования и науки при подготовке специалистов первой и второй ступеней высшего образования. Данная идея предполагает привлечение студентов и магистрантов к разработке реальных ИКС различного назначения, а также постоянную адаптацию учебного материала к современному уровню развития технологий в сфере ИИ.

При непосредственном участии БГУИР в рамках Национального детского технопарка открыта подготовка по программе «Искусственный интеллект» по направлению «Информационные и компьютерные технологии». Реализация данной программы позволяет школьникам не только приобрести навыки применения современных технологий разработки ИКС, но и получить представление о современных проблемах в этой области, о подходах к их решению, что важно при их дальнейшем обучении и развитии профессиональных качеств. В 2023 г. состоялся первый выпуск учащихся по данной программе, полученные результаты позволили выпускникам принять участие в конкурсе «100 идей для Беларуси» и подготовить материалы для научных публикаций.

Развитие открытых комплексных технологий требует консолидации усилий научных и производственных коллективов в соответствующей области как в республике, так и за рубежом. При непосредственном участии БГУИР в 2018 г. воссоздано Белорусское общественное объединение специалистов в области искусственного интеллекта (БОИИ), объединившее в себе специалистов из всех регионов Беларуси, а также России, Украины, Латвии и других стран.

В 2021 г. начата и успешно реализуется программа подготовки студентов из Узбекистана в рамках совместной образовательной программы БГУИР–ТУИТ (ТУИТ – Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми). В 2023-м состоялся первый выпуск по этой программе, по итогам которого часть иностранных студентов приняла решение продолжить обучение в БГУИР в магистратуре и участвовать в разработке и применении технологий ИИ. Параллельно с обучением студентов велась активная работа по взаимодействию с научными коллективами Узбекистана, в результате которого была проведена совместная конференция «Цифровые технологии: проблемы и решения практической реализации в отрасли» и подана заявка на совместный проект БРФФИ–МИРРУ (БРФФИ – Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований; МИРРУ – Министерство инновационного развития Республики Узбекистан).

В 2020 г. на базе БГУИР создано Учебно-научное объединение по направлению «Искусственный интеллект» (УНО-ИИ), в состав которого вошли кафедры и лаборатории вуза, подразделения других учреждений образования, общественные организации и коммерческие структуры. Цель УНО-ИИ – объединение и согласование на республиканском уровне усилий представителей различных сфер по разработке общей теории и технологии проектирования ИКСНП. Основные сферы применения результатов научной работы в рамках УНО-ИИ в настоящее время включают:

- разработку комплекса интеллектуальных обучающих систем по дисциплинам среднего и высшего образования (умные учебники (Smart Books));
- разработку систем автоматизации производства в контексте направлений Industry 4.0 и Internet of Things, в частности, разработку интеллектуальных робототехнических систем (совместно с представителями БрГТУ и передовыми белорусскими предприятиями, такими как ОАО «Савушкин продукт»);
- интеллектуализацию сферы услуг – интеллектуальные гиды по достопримечательностям, интеллектуальные рекомендательные системы различного назначения;
- разработку интеллектуальных диалоговых систем различного назначения, в том числе с речевым интерфейсом;
- разработку компьютеров нового поколения – семантических ассоциативных компьютеров.

Для обсуждения проблем создания открытой комплексной технологии компонентного проектирования семантически совместимых интероперабельных гибридных интеллектуальных систем, обеспечивающей совместимость и интеграцию частных технологий ИИ, на базе БГУИР совместно с другими образовательными и научными учреждениями с 2010 г. проводится ежегодная Международная научно-техническая конференция Open Semantic Technology for Intelligent Systems (OSTIS). Ее формат – обсуждение различных вопросов создания указанной технологии

и выставочные презентации докладов. За последние пять лет в конференциях OSTIS приняли участие представители Беларуси, России, Украины, Казахстана, Узбекистана, Таджикистана, Китая, США, Латвии. По итогам OSTIS издается сборник научных трудов, в 2021 г. включенный в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований. Кроме того, некоторые материалы конференции включаются в сборник избранных трудов, публикуемый издательством Springer и индексируемый в Scopus [2]. В 2021-м издана первая версия стандарта открытой семантической технологии проектирования ИКСНП [3], а в 2023-м – коллективная монография [4], отражающая текущее состояние данной технологии, в числе авторов которой – более 30 представителей организаций, входящих в состав УНО-ИИ, являющихся членами БОИИ и представляющих разные регионы Беларуси (Минск, Гомель, Брест, Полоцк, Гродно).

Современное состояние исследований в области ИИ в БГУИР и, в частности, появление первой версии комплексной технологии проектирования ИКСНП делают перспективной идею развития комплексной информатизации Беларуси на основе ИКСНП и соответствующей технологии. Реализация этой идеи предполагает решение таких задач, как:

- расширение научных исследований по развитию теории ИКСНП;
- разработка следующей версии комплексной технологии проектирования и модернизации ИКСНП, включающей:
 - технологию коллективного проектирования и модернизации баз знаний ИКСНП;
 - технологию проектирования и модернизации решателей задач ИКСНП;
 - технологию проектирования и модернизации интерфейсов ИКСНП;
 - программную платформу ИКСНП, обеспечивающую реализацию базовой модели представления и обработки знаний в ИКСНП;
 - компьютер нового поколения, ориентированный на реализацию (аппаратную поддержку) ИКСНП;
 - комплексную библиотеку многократно используемых компонентов ИКСНП;
- разработка архитектуры глобальной экосистемы ИКСНП, обеспечивающей комплексную автоматизацию всех видов человеческой деятельности;
 - организация подготовки кадров для разработки и внедрения ИКСНП;
 - разработка и внедрение ИКСНП (в рамках глобальной экосистемы) в различных отраслях – образовании, здравоохранении, научно-исследовательской и проектной деятельности, стандартизации, юриспруденции, налогообложении, энергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве, транспорте, промышленном производстве, умном городе нового поколения и др.

Проблемы современного состояния работ в области искусственного интеллекта и предлагаемый подход к их решению

К основным проблемам современного состояния работ в области ИИ относятся следующие [4, 5].

- Как отмечено в [6], в современных обсуждениях об ИИ научные споры часто смещаются в сторону завышенных ожиданий от скорого его внедрения, появления «сильного» ИИ и значительного сужения самой его темы, сводя ее к машинному обучению на основе искусственных нейронных сетей. В результате на второй план отходят такие важные направления, как онтология, база знаний, методы рассуждений и принятия решений, методы синтеза и анализа сложных структур, киберфизические системы, цифровые двойники, автономные системы, системы интеллектуального анализа данных и др. В то же время расширение областей применения ИКС требует перехода к ИКСНП, обладающим высоким уровнем интероперабельности. Это, в свою очередь, предполагает обеспечение конвергенции и интеграции различных технологий ИИ, чего в настоящий момент не происходит.

- Современные технологии ИИ, как правило, ориентированы на локальную автоматизацию отдельных процессов, а не на комплексную автоматизацию разных видов человеческой деятельности, предполагающую совместное использование различных знаний и моделей решения задач. Как следствие, несмотря на локальные успехи в отдельных областях ИИ, существенного повышения уровня автоматизации человеческой деятельности не происходит – мы все еще далеки от появления действительно «умных» домов, больниц, школ, производственных предприятий, городов.

• Современные технологии ИИ не обладают свойством комплексности; они ориентированы на проектирование отдельных компонентов ИКС или отдельных их классов. При этом не рассматриваются вопросы обеспечения совместимости различных компонентов систем в единой системе и системах разных классов в рамках коллективов таких систем, способных согласованно решать сложные задачи. Кроме того, современные технологии ИИ, как правило, не ориентированы на поддержку всех этапов жизненного цикла ИКС. Следствием этого является высокий уровень трудоемкости разработки, модернизации и эксплуатации ИКС, что, в свою очередь, снижает степень их распространенности и доступности.

Решению перечисленных проблем препятствует основная методологическая проблема в области ИИ – отсутствие общей формальной теории и технологии для разработки, производства и модернизации совместимых ИКС, что, в свою очередь, связано с отсутствием стандартизации и унификации таких систем и их компонентов. Кроме того, в настоящее время не хватает квалифицированных специалистов, необходимых для создания общей теории ИКС и разработки комплексных технологий их проектирования, производства и модернизации. Существующие специалисты в этой области сами часто не обладают достаточным уровнем интероперабельности и мотивации для объединения и интеграции различных направлений ИИ.

В качестве подхода к решению перечисленных проблем предложена концепция и разработана стартовая версия комплексной технологии разработки и модернизации ИКСНП, названная технологией OSTIS. Результаты в области разработки этой технологии и детальное обоснование ее создания отражены в [3, 4, 7, 8]. ИКСНП, разрабатываемые по OSTIS, названы *ostis-системами*. Сама технология OSTIS реализуется в форме специальной *ostis-системы* – метасистемы OSTIS, база знаний которой содержит формальную теорию *ostis-систем*, стандарт *ostis-систем* и технологии OSTIS (стандарт OSTIS), ядро библиотеки многократно используемых компонентов *ostis-систем* (библиотеки OSTIS), а также методики и инструментальные средства поддержки жизненного цикла *ostis-систем* и их компонентов. В основе технологии OSTIS лежит универсальный способ смыслового представления (кодирования) информации в памяти ИКС, названный SC-кодом. Тексты SC-кода (*sc-тексты*, *sc-конструкции*) – это унифицированные семантические сети с базовой теоретико-множественной интерпретацией. Актуальный этап развития технологии OSTIS – переход от индивидуальных *ostis-систем* к сообществу интероперабельных *ostis-систем* – глобальной экосистеме OSTIS. Экосистема OSTIS – социотехническая экосистема, представляющая собой коллектив взаимодействующих семантических компьютерных систем и осуществляющая перманентную поддержку эволюции и семантической совместимости всех входящих в нее систем на протяжении всего их жизненного цикла [4, 9].

Смысловое пространство как основа представления и интеграции знаний в интеллектуальных компьютерных системах нового поколения

К основным признакам знаний в ИКС относят [10]: связность, наличие сложной структуры, интерпретируемость, активность, наличие семантической метрики, шкалируемость. Представление знаний как область ИИ имеет продолжительную историю [11]. Для представления используются различные формализмы и структуры [3, 11]. Одна из приоритетных задач – задача смыслового представления знаний [12], или задача формализации смысла. Ее решение предполагает формирование соответствующих информационных конструкций, описание их свойств и различных видов, исследование возможности их взаимосвязи в смысловом пространстве [12–14]. Изучение метрических и топологических свойств позволяет выявлять подобие или семантическую близость информационных конструкций, избавляться от избыточности представления знаний и оптимизировать их поиск, в том числе в целях повторного использования компонентов баз знаний [13, 15], сокращая трудозатраты на разработку и обеспечение качества баз знаний и соответствующих ИКСНП [4].

Вопрос смыслового представления – это вопрос соотношения синтаксиса и семантики, так как тексты конечны, а смысловое пространство потенциально бесконечное. Среди элементов информационных конструкций смыслового пространства, хранящихся в базах знаний, выделяются обозначения связей, классов и структур [4]. Каждому классу принадлежат только такие элементы, которые обладают уникальным для этого класса признаком. Подобными классами являются классы: конечных множеств, конечных ориентированных множеств, наследственно конечных ориентированных множеств [13, 16], наследственно конечных множеств [17], структур из наследственно конечных множеств, натуральных чисел. Между структурами, подобными классами

и их элементами могут быть установлены отношения подкласса, сходства и семантической близости, с помощью которых могут быть исследованы метрические или топологические свойства элементов этих классов.

Примеры классов более сложных информационных конструкций – классы конечных рефлексивных и взаимно рефлексивных (нефундированных [18]) множеств, которые за конечное количество шагов достижимы по связкам отношения принадлежности из самих себя (своих обозначений). Такие множества являются и множеством, и элементом в структуре, образованной из всех достижимых по связкам принадлежности элементов данного множества. Другие классы соответствуют обобщенным формальным языкам [13, 16], конечным классическим и неклассическим ориентированным, неориентированным и смешанным графовым, псевдографовым, гиперграфовым (включая (абстрактные) симплициальные комплексы [19]), мультиграфовым, метаграфовым, метапсевдографовым, метагиперграфовым и т. п. структурам. Все эти классы являются счетными.

Что касается интеграции знаний (информационных конструкций) в ИКСНП, выделены четыре вида интеграции в соответствии с направлениями [15]: вертикальная (реализуется через компиляцию и интерпретацию), горизонтально-фронтальная (через коммуникацию), горизонтально-профильная (через унификацию) и непрерывная (через обучение). Вертикальная – это интеграция информационных конструкций различных моделей представления или обработки информации, одна из которых реализуется на другой. Горизонтально-фронтальная – интеграция конструкций различных моделей представления или обработки информации, одна из которых параллельно взаимодействует (сообщается) с другой. Горизонтально-профильная – это интеграция конструкций в рамках одной модели унифицированного представления или обработки информации. Непрерывная – интеграция конструкций (знаний) в рамках одной модели представления или обработки информации на протяжении длительного периода времени. Полноценная ИКСНП предполагает движение по каждому из направлений.

Подходы к изучению топологических и метрических свойств смыслового подпространства рассмотрены в [4, 13, 14, 20]. На основе полученных результатов предложены средства представления пространственно-временных сущностей, событий и явлений, включая процессы обработки знаний и отношений между ними [21]. Для интеграции и представления знаний в логических моделях обработки информации [22], описывающих динамические сущности [23], предложены средства [13], являющиеся семантической основой для модели унифицированного семантического представления знаний [13, 16] и языков представления знаний технологии OSTIS [3, 4].

Платформы интерпретации информационных процессов в смысловом пространстве

Один из ключевых принципов технологии OSTIS – обеспечение платформенной независимости ostis-систем, т. е. строгое разделение логико-семантической модели системы и платформы интерпретации таких sc-моделей (ostis-платформы) [4]. В любом варианте реализации ostis-платформы всегда присутствуют как программная, так и аппаратная части. Так, любой программный вариант ostis-платформы [24] предполагает его последующую интерпретацию на какой-либо аппаратной основе, например, на персональном компьютере с традиционной архитектурой. В то же время актуальной является разработка ostis-платформы в виде специализированного ассоциативного семантического компьютера [4], ориентированного на аппаратную реализацию sc-памяти.

Возможны разные варианты реализации ассоциативного семантического компьютера, подробно рассмотренные в [4], где отмечено, что наиболее перспективный – вариант реализации с мелкозернистой архитектурой, в котором процессор-память ассоциативного семантического компьютера состоит из однотипных модулей – процессорных элементов. Каждый процессорный элемент соответствует одному sc-элементу (хранит один sc-элемент или в текущий момент времени не хранит ничего). Процессорные элементы связаны между собой двумя типами каналов связи – физическими, число которых ограничено, и логическими, соответствующих связям инцидентности между sc-элементами, их число потенциально не ограничено. Конфигурация физических каналов связи фиксируется и в общем случае не зависит от конфигурации логических каналов связи. Каждый процессорный элемент может отправлять сообщения (микропрограммы) другим и принимать сообщения от иных процессорных элементов по логическим каналам связи. В свою очередь, на физическом уровне передача сообщений осуществляется по физическим каналам связи.

Язык описания микропрограмм интерпретации команд ассоциативного семантического компьютера не может быть построен как традиционные языки программирования, поскольку они предполагают возможность непосредственного адресного или ассоциативного доступа к произвольным элементам памяти, что невозможно в рамках рассматриваемой архитектуры. В качестве основы для разработки такого языка и средств описания соответствующих информационных процессов предлагается взять волновые языки программирования и технологии пространственного захвата, развиваемые школой П. С. Сапатога [25], а также работы по инсерционному программированию и моделированию А. А. Летичевского [26]. Рассмотрим два основных подхода к организации обработки информации в рамках такой процессоро-памяти.

Первый вариант предполагает, что sc-конструкция уложена в процессоро-память произвольным образом. В этом случае инцидентные друг другу sc-элементы соединены логическим каналом связи, но при этом соответствующие им процессорные элементы могут находиться на произвольном расстоянии друг от друга в плане физического расположения в процессоро-памяти. Для обработки информации при таком варианте хранения sc-конструкций предлагается использовать следующие принципы:

- сообщения, содержащие программы обработки информации, передаются в виде глобальных волн по всем физическим каналам связи, начиная от процессорного элемента, инициирующего процесс обработки. Каждое сообщение содержит информацию о том, какие именно sc-элементы должны быть обработаны. Таким образом, решение о необходимости выполнения соответствующих команд принимает каждый процессорный элемент самостоятельно, при этом передаваемые сообщения могут быть сложными;

- независимо от того, были ли выполнены соответствующие команды в рамках конкретного процессорного элемента, каждый процессорный элемент передает сообщение дальше по физическим каналам связи. Каждое сообщение имеет уникальный идентификатор волны, который дублируется при передаче данного сообщения дальше. Это дает возможность, с одной стороны, связывать сообщения между собой, а с другой – позволяет процессорным элементам понимать, какие волны уже были ими обработаны. При этом каждый процессорный элемент хранит информацию о том, какое сообщение было получено по какому из каналов связи для того, чтобы не отправлять то же самое сообщение повторно к его источнику;

- в результате выполнения содержащейся в сообщении программы в процессорном элементе формируется ответное сообщение, содержание которого в общем случае определяется семантикой указанной программы;

- процессорный элемент, получивший некоторое сообщение и выполнивший соответствующую программу, может инициировать новую волну сообщений и таким образом продолжить обработку информации уже независимо от процессорного элемента, отправившего исходную волну.

Такой подход обладает рядом существенных недостатков, связанных со значительной нагрузкой на физические каналы связи и с зависимостью скорости работы системы от пропускной способности физических каналов связи и скорости передачи сообщений по этим каналам.

Второй вариант обработки призван устранить часть недостатков первого за счет организации укладки sc-конструкций в процессоро-память таким образом, чтобы конфигурация логических каналов связи соответствовала конфигурации физических каналов связи. Ключевые особенности такого подхода заключаются в следующем:

- предлагается часть процессорных элементов при необходимости использовать в качестве коммутаторов (коммутационный элемент). Коммутатор не хранит никакой sc-элемент, а является «виртуальной копией» соответствующего процессорного элемента, с которым связан одним из физических каналов связи (факт такой связи явно фиксируется). Остальные физические каналы данного коммутатора считаются физическими каналами указанного процессорного элемента. При необходимости может формироваться цепочка коммутаторов, соответствующих одному и тому же процессорному элементу;

- при укладке sc-конструкции в процессоро-память sc-элементы помещаются в процессорные элементы так, чтобы инцидентные sc-элементы находились в процессорных элементах, связанных физическим каналом связи, при необходимости вводятся коммутаторы. Аналогичным образом осуществляется добавление нового фрагмента к уже уложенной sc-конструкции;

- передача сообщений между процессорными элементами и интерпретация записанных в сообщениях программ осуществляются не глобальными волнами по физическим каналам связи, а по целенаправленно логическим каналам связи.

Таким образом, ключевым достоинством второго варианта является снижение нагрузки на каналы связи и зависимости от их пропускной способности. В то же время укладка sc-конструкции в процессоро-память в соответствии с изложенными принципами может занять длительное время, а при добавлении нового фрагмента к уже уложенной sc-конструкции может потребоваться повторная укладка значительной части этой sc-конструкции. Кроме того, существует ограничение, связанное с принципиальной возможностью такой укладки (граф инцидентий, соответствующий sc-конструкции, должен быть планарным).

С учетом достоинств и недостатков рассмотренных подходов к организации обработки информации в ассоциативном семантическом компьютере с мелкозернистой архитектурой можно сказать, что на практике целесообразным будет комбинирование обоих вариантов.

Заключение

1. Рассмотрены тенденции развития технологий искусственного интеллекта в БГУИР за последние пять лет, перечислены основные результаты, полученные как в области развития самих технологий искусственного интеллекта, так и подготовки кадров по искусственному интеллекту и реализации взаимодействия между коллективами специалистов, работающих в данной области.

2. Обоснована необходимость перехода к интеллектуальным компьютерным системам нового поколения, обладающим высоким уровнем интероперабельности. Рассмотрены проблемы, препятствующие активной разработке и внедрению таких систем, представлена первая версия соответствующей технологии.

3. Уделено внимание понятию смыслового пространства как основы представления и интеграции знаний в интеллектуальных компьютерных системах нового поколения. Рассмотрены принципы реализации аппаратной платформы интерпретации информационных процессов в смысловом пространстве – ассоциативного семантического компьютера, сформулированы актуальные задачи и проблемы в области развития теории смыслового пространства и разработки ассоциативных семантических компьютеров.

Список литературы

1. Михневич, С. Ю. Эволюция понятия интероперабельности открытых информационных систем / С. Ю. Михневич, А. А. Тежар // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 2. С. 60–66. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-2-60-66>.
2. International Conference on Open Semantic Technologies for Intelligent Systems [Electronic Resource] // SpringerLink. Mode of access: <https://link.springer.com/conference/ostis>. Date of access: 28.01.2024.
3. Голенков, В. В. Открытая технология онтологического проектирования, производства и эксплуатации семантически совместимых гибридных интеллектуальных компьютерных систем / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина, Д. В. Шункевич. Минск: Бестпринт, 2021.
4. Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения / Под общ. ред. В. В. Голенкова. Минск: Бестпринт, 2023.
5. Палагин, А. В. Проблемы трансдисциплинарности и роль информатики / А. В. Палагин // Кибернетика и системный анализ. 2013. № 5. С. 3–13.
6. Формирование стратегии развития Комитета по искусственному интеллекту в Научно-образовательном центре «Инженерия будущего» / И. И. Барин, [и др.] // Онтология проектирования. 2021. Т. 11, № 3. С. 260–293. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-260-293.
7. Голенков, В. В. Графодинамические ассоциативные модели и средства параллельной обработки информации в системах искусственного интеллекта / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина // Доклады БГУИР. 2004. № 1. С. 92–101.
8. Семантические технологии проектирования интеллектуальных систем и семантические ассоциативные компьютеры / В. В. Голенков [и др.] // Доклады БГУИР. 2019. № 3. С. 42–50.
9. Zagorskiy, A. Principles for Implementing the Ecosystem of Next-Generation Intelligent Computer Systems / A. Zagorskiy // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022): Collection of Scientific Papers. 2022. Iss. 6. P. 347–356. Minsk: Bestprint, 2022.
10. Искусственный интеллект. Справочник. В 3-х кн. / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. Кн. 2. Модели и методы.
11. Sowa, J. F. Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations. / J. F. Sowa. New York: Brooks/Cole, 2000.
12. Мартынов, В. В. В центре сознания человека / В. В. Мартынов. Минск: Белор. гос. ун-т, 2009.
13. Ivashenko, V. General-Purpose Semantic Representation Language and Semantic Space / V. Ivashenko // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022): Collection of Scientific Papers. 2022. Iss. 6. P. 41–64.

14. Ivashenko, V. Semantic Space Integration of Logical Knowledge Representation and Knowledge Processing Models / V. Ivashenko // *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS): Collection of Scientific Papers*. 2023. Iss. 7. P. 95–11.
15. Иващенко, В. П. Семантические средства разработки программных компонентов на базе интеграционной платформы / В. П. Иващенко // *Информационные технологии и системы – 2022 (ИТС-2022): матер. Междунар. науч. конф., г. Минск, 23 ноября 2022 г.* Минск: Белор. гос. ун-т инфор. и радиоэлек., 2022. С. 57–58.
16. Иващенко, В. П. Модели решения задач в интеллектуальных системах. В 2 ч. / В. П. Иващенко. Минск: Белор. гос. ун-т инфор. и радиоэлек., 2020. Ч. 1. Формальные модели обработки информации и параллельные модели решения задач.
17. Ackermann, W. Die Widerspruchsfreiheit der Allgemeinen Mengenlehre / W. Ackermann // *Mathematische Annalen*. 1937. No 114. P. 305–315.
18. Kanamori, A. Bernays and Set Theory / A. Kanamori // *Bulletin of Symbolic Logic*. 2009. No 15. P. 43–69.
19. Hatcher, A. *Algebraic Topology* / A. Hatcher. Great Britain: Cambridge University Press, 2002.
20. Ivashenko, V. Structures and Measures in Knowledge Processing Models / V. Ivashenko // *Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023): Proceedings of the 16th International Conference, Minsk, October 17–19, 2023*. Minsk: United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, 2023. P. 16–21.
21. Иващенко, В. П. Онтологическая модель пространственно-временных отношений событий и явлений в процессах обработки знаний / В. П. Иващенко // *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2017. Т. 107, № 5. С. 13–17.
22. Драгалин, А. Г. Конструктивная теория доказательств и нестандартный анализ / А. Г. Драгалин. М.: УРСС, 2003.
23. Conway, J. H. *On Numbers and Games*, 2 ed. / J. H. Conway. US: CRC Press, 2000.
24. Zotov, N. Design Principles, Structure, and Development Prospects of the Software Platform of Ostis-Systems / N. Zotov // *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems: Collection of Scientific Papers*. 2023. Iss. 7. P. 67–76.
25. Sapaty, P. S. *The Spatial Grasp Model* / P. S. Sapaty. Great Britain: Emerald Publishing Limited, 2023. DOI: 10.1108/9781804555743.
26. Letichevsky, A. A. Insertion Modeling System / A. A. Letichevsky, O. A. Letychevskiy, V. S. Peschanenko // *Perspectives of Systems Informatics (PSI-2011). Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Heidelberg, 2012. Vol. 7162. DOI: 10.1007/978-3-642-29709-0_23.

References

1. Mikhnevich S. Yu., Tsezhar A. A. (2023) Evolution of the Concept of Interoperability of Open Information Systems. *Digital Transformation*. 29 (2), 60–66. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-2-60-66> (in Russian).
2. International Conference on Open Semantic Technologies for Intelligent Systems. SpringerLink. Available: <https://link.springer.com/conference/ostis> (Accessed 28 January 2024).
3. Golenkov V. V., Gulyakina N. A., Shunkevich D. V. (2021) *Open Technology of Ontological Design, Production and Operation of Semantically Compatible Hybrid Intelligent Computer Systems*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
4. Golenkov V. V. (ed.) (2023) *Technology of Complex Life Cycle Support of Semantically Compatible Intelligent Computer Systems of New Generation*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
5. Palagin A. V. (2013) Problems of Transdisciplinarity and the Role of Informatics. *Cybernetics and System Analysis*. (5), 3–13 (in Russian).
6. Barinov I. I., Borgest N. M., Borovik S. Y., Granichin O. N., Grachev S. P., Gromyko Y. V., et al. (2021) Development Strategy Formation of the Committee on Artificial Intelligence in the Scientific and Educational Center “Engineering of the Future”. *Ontology of Designing*. 11 (3), 260–293. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-260-293 (in Russian).
7. Golenkov V. V., Gulyakina N. A. (2004) Graphodynamic Associative Models and Means of Parallel Information Processing in Artificial Intelligence Systems. *Doklady BGUIR*. (1), 92–101 (in Russian).
8. Golenkov V. V., Gulyakina N. A., Davydenko I. T., Shunkevich D. V. (2019) Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems and Semantic Associative Computers. *Doklady BGUIR*. (3), 42–50 (in Russian).
9. Zagorskiy A. (2022) Principles for Implementing the Ecosystem of Next-Generation Intelligent Computer Systems. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022): Collection of Scientific Papers*. (6), 347–356. Minsk, Bestprint Publ.
10. Pospelov D. A. (ed.) (1990) *Artificial Intelligence. Reference Book. In 3 Books. Book 2: Models and Methods*. Moscow, Radio and Sviaz Publ. (in Russian).
11. Sowa J. F. (2000) *Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations*. New York, Brooks/Cole.

12. Martynov V. V. (2009) *In the Center of Human Consciousness*. Minsk, Belarusian State University (in Russian).
13. Ivashenko V. (2022) General-Purpose Semantic Representation Language and Semantic Space. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022): Collection of Scientific Papers*. (6), 41–64. Minsk, Bestprint Publ.
14. Ivashenko V. (2023) Semantic Space Integration of Logical Knowledge Representation and Knowledge Processing. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS): Collection of Scientific Papers*. (7), 95–114. Minsk, Bestprint Publ.
15. Ivashenko V. P. (2017) Ontological Modeling of Event-Based Causal Relationships. *Information Technologies and Systems – 2017 (ITS-2017), Proceedings of the International Scientific Conference, Minsk, Oct. 25, 2017*. 138–139. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
16. Ivashenko V. P. (2020) *Models of Problem Solving in Intellectual Systems. In 2 Parts. Part 1: Formal Models of Information Processing and Parallel Models of Problem Solving*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
17. Ackermann W. (1937) Die Widerspruchsfreiheit der Mengenlehre. *Mathematische Annalen*. (114), 305–315.
18. Kanamori A. (2009) Bernays and Set Theory. *Bulletin of Symbolic Logic*. (15), 43–69.
19. Hatcher A. (2002) *Algebraic Topology*. Great Britain, Cambridge University Press Publ.
20. Ivashenko V. (2023) Structures and Measures in Knowledge Processing Models. *Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023): Proceedings of the 16th International Conference, Minsk, Oct. 17–19, 2023*. 16–21. Minsk, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
21. Ivashenko V. P. (2017) Ontological Model of Space-Time Relations for Events and Phenomena in the Processing of Knowledge. *Bulletin of Brest State Technical University*. 107 (5), 13–17 (in Russian).
22. Dragalin A. G. (2003) *Constructive Theory of Evidence and Non-Standard Analysis*. Moscow, URSS Publ.
23. Conway J. H. (2000) *On Numbers and Games, 2 ed.* US, CRC Press Publ.
24. Zotov N. (2023) Design Principles, Structure, and Development Prospects of the Software Platform of Osis-Systems. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems: Collection of Scientific Papers*. (7), 67–76. Minsk, Bestprint Publ.
25. Sapaty P. S. (2023) *The Spatial Grasp Model*. Great Britain, Emerald Publishing Limited Publ. DOI: 10.1108/9781804555743.
26. Letichevsky A. A., Letychevskiy O. A., Peschanenko V. S. (2012) Insertion Modeling System. *Perspectives of Systems Informatics (PSI-2011). Lecture Notes in Computer Science*. 7162. Berlin, Heidelberg Publ. DOI: 10.1007/978-3-642-29709-0_23.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Голенков В. В., д-р техн. наук, проф., проф. каф. интеллектуальных информационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Гулякина Н. А., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. интеллектуальных информационных технологий, БГУИР

Ивашенко В. П., канд. техн. наук, доц., доц. каф. интеллектуальных информационных технологий, БГУИР

Шункевич Д. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. интеллектуальных информационных технологий, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-80-92
E-mail: golen@bsuir.by
Голенков Владимир Васильевич

Information about the authors

Golenkov V. V., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Intelligent Information Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Gulyakina N. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Intelligent Information Technologies, BSUIR

Ivashenko V. P., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Intelligent Information Technologies, BSUIR

Shunkevich D. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Intelligent Information Technologies, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-80-92
E-mail: golen@bsuir.by
Golenkov Vladimir Vasilievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 4G/5G

В. И. МОРДАЧЕВ, А. С. СВИСТУНОВ, Е. В. СИНЬКЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 05.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Выполнен анализ электромагнитной безопасности оборудования систем мобильной связи 4G/5G для населения и технических объектов критической инфраструктуры: оборудования сигнализации и телекоммуникации инфраструктуры железнодорожного транспорта, медицинского беспроводного оборудования малого радиуса действия, медицинского электрического оборудования и электрического оборудования для измерения, управления и лабораторного применения. Установлено, что излучения оборудования 4G/5G являются потенциально опасными для функционирования оборудования критической инфраструктуры и для населения. Приведены рекомендации, направленные на снижение опасности систем мобильной связи для объектов критической инфраструктуры и для населения.

Ключевые слова: системы мобильной связи, 4G, 5G, объекты критической инфраструктуры, население, электромагнитная безопасность, электромагнитная совместимость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Электромагнитная безопасность систем мобильной связи 4G/5G / В. И. Мордачев, А. С. Свистунов, Е. В. Синькевич // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 80–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91>.

ELECTROMAGNETIC SAFETY OF 4G/5G MOBILE COMMUNICATIONS

VLADIMIR I. MORDACHEV, ALIAKSANDR S. SVISTUNOU, EUGENE V. SINKEVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 05.02.2024

Abstract. An analysis is performed for electromagnetic safety of equipment of 4G/5G mobile communications for population and technical facilities of critical infrastructure: railway signaling and telecommunications equipment, medical short-range equipment, medical electrical equipment, and electrical equipment for measurement, control and laboratory use. It was established that radiations of 4G/5G systems are potentially dangerous for functioning of critical infrastructure equipment and the population. Recommendations aimed at reducing the danger of mobile communications for critical infrastructure objects and for population are given.

Keywords: mobile communications, 4G, 5G, equipment of critical infrastructure, population, electromagnetic safety, electromagnetic compatibility.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2024) Electromagnetic Safety of 4G/5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 80–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-80-91> (in Russian).

Введение

Интенсивное (наблюдаемое и планируемое) проникновение беспроводных технологий и систем мобильной связи (МС) 4G/5G во все сферы человеческой деятельности и декларируемое насыщение среды обитания источниками излучений этих систем до 10^5 (4G), 10^6 (5G) и в перспективе до 10^7 (6G) единиц/км² сопровождается как ужесточением проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) этих систем в традиционной постановке – межсистемной ЭМС (с радиосистемами других радиослужб) и внутрисистемной ЭМС (взаимные помехи оборудованию системы), так и существенным обострением проблемы ЭМС этих систем с многочисленным электрическим и электронным оборудованием различного назначения, восприимчивым к радиочастотным электромагнитным полям (ЭМП) базовых станций (БС) и абонентских устройств (АУ) МС, а также ЭМС этих систем с населением в связи с опасностью сопутствующих изменений характеристик среды обитания для здоровья. Особую тревогу вызывает обострение проблемы электромагнитной безопасности (ЭМБ) систем МС для оборудования объектов критической инфраструктуры, в частности, для оборудования сигнализации и телекоммуникации инфраструктуры железнодорожного транспорта [1] и медицинского оборудования различного назначения [2, 3]. Поскольку диапазоны значений предельно допустимых уровней (ПДУ) радиочастотных ЭМП, установленные для электрического и электронного оборудования подобных объектов и для населения, практически совпадают, анализ и решение проблемы ЭМС систем МС 4G/5G с этим оборудованием и с населением могут выполняться на единой организационной и методической основе анализа и реализации мер по обеспечению ЭМБ населения и ЭМБ функционирования электрического и электронного оборудования разного назначения в электромагнитной обстановке (ЭМО), создаваемой системами МС 4G/5G в различных условиях.

Цель исследований – анализ ЭМБ систем мобильной связи 4G/5G для электрического и электронного оборудования ряда объектов критической инфраструктуры и для населения.

Методика анализа

I. Оценки ЭМС не предназначенных для радиоприема объектов различного назначения и вида – технических, биологических и прочих, являющихся рецепторами воздействий радиочастотных ЭМП, с оборудованием МС 4G/5G выполнены с использованием ПДУ ЭМП, регламентированных действующими стандартами [4–9], и данных о типовых характеристиках электромагнитных излучений (ЭМИ) БС и АУ 4G/5G, содержащихся в [10–17].

Анализ условий ЭМС указанных объектов с радиооборудованием МС выполнен путем расчета необходимого пространственного разнеса между ними при распространении радиоволн (РРВ) в свободном пространстве – минимальной удаленности d , при которой уровень воздействующего ЭМП оборудования систем МС равен ПДУ:

$$d = \sqrt{30P_{EIRP} / E_{MPL}^2}, \quad (1)$$

где P_{EIRP} – эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) оборудования систем МС, Вт; E_{MPL} – ПДУ ЭМП, В/м.

II. При анализе ЭМС оборудования МС 4G/5G и медицинского радиооборудования малого радиуса действия (МРД), используемого в помещениях медицинских учреждений, применялось компьютерное моделирование распределения уровней ЭМП от АУ и БС на входе рецепторов (беспроводных медицинских устройств) при размещении эмиттеров (БС и АУ) в 3D-модели городской застройки и/или помещения и рецепторов внутри каждого здания на различной высоте над земной поверхностью; использовались трехмерная многолучевая модель РРВ и интегральный критерий превышения восприимчивости рецептора воздействующим ЭМП. Методика включала следующие этапы.

1. Выбор частот f_A для анализа воздействия основными и нежелательными ЭМИ источников помех на внеполосные и побочные каналы приема рецепторов помех, а также нежелательными ЭМИ на основные каналы радиоприема.

2. Расчет мощности излучения источника помехи на частотах f_A интегрированием стандартизованной огибающей спектральной плотности мощности излучения по ширине Δf_i полосы частот воздействия [2].

3. Определение восприимчивости S (Вт) радиоприемников (РП) к помехам на частоте f_A .
4. Расчет амплитудно-частотной характеристики пассивных антенн БС вне рабочего диапазона частот с использованием математической модели SLMP (System-Level Minimum Phase) [18] и определение модели диаграммы направленности (изотропная, эталонная [19]) этих антенн в зависимости от частот f_A .
5. Оценка мощности помехи P_I (Вт) на входе приемника на частотах f_A , создаваемой БС на входе РП устройств МРД.
6. Расчет интегрального превышения восприимчивости приемника – критерия ЭМС (Integrated Interference Margin, ИИМ) [20], учитывающего воздействие на приемник всех видов излучений эмиттера на всех анализируемых частотах f_A :

$$ИИМ = \sum_{n=1}^N ИМ(f_{An}), \quad ИМ(f_{An}) = P_I(f_{An}) / S(f_{An}), \quad (2)$$

где $ИМ(f_{An})$ – превышение восприимчивости приемника на частоте f_{An} , Вт; N – количество анализируемых частот f_A .

Помеха считается допустимой при $ИМ(f_{An}) < 1$, при $ИМ(f_{An}) \geq 1$ – недопустимой.

III. Интегральные оценки опасности ЭМО, создаваемой в местах функционирования объектов критической инфраструктуры и в местах с высокой плотностью населения излучениями оборудования систем МС, выполнены по методикам [21, 22], обеспечивающим возможность расчета средней интенсивности электромагнитного фона (ЭМФ), образуемого множеством ЭМИ БС МС у земной поверхности, на основе определения средней электромагнитной нагрузки на территорию, создаваемой излучениями расположенных на этой территории БС и АУ [23]. Поскольку в сетях 4G/5G преобладает режим передачи данных при существенной асимметрии трафика по нисходящей и восходящей линиям связи, вклад ЭМИ множества АУ в суммарную интенсивность ЭМФ, создаваемого системами МС 4G/5G, оказывается незначительным, что позволяет ограничиться рассмотрением составляющей ЭМФ у земной поверхности, создаваемой излучениями БС.

Предельно допустимые уровни электромагнитных полей

В табл. 1 приведены требования к помехоустойчивости оборудования объектов критической инфраструктуры к радиочастотным ЭМП, проникающим в это оборудование через порт корпуса.

Таблица 1. Предельно допустимые уровни электромагнитных полей (ПДУ ЭМП) для оборудования критической инфраструктуры

Table 1. Maximum permissible levels of electromagnetic fields (EMF MPL) for the equipment of critical infrastructure

Оборудование / Equipment	Диапазон частот / Frequency range	ПДУ ЭМП, В/м / EMF MPL, V/m
Медицинское электрическое оборудование и системы [4]	80 МГц–2,7 ГГц	
	В медицинских учреждениях В домашних условиях	3 10
Медицинское беспроводное оборудование МРД [5]	80 МГц–6 ГГц, кроме исключенной полосы частот – ширина полосы частот канала РП, увеличенная на значение A относительно ее границ; $A = \max\{15 \text{ МГц}; 5\% \text{ от несущей частоты}\}$ в полосе частот 30 МГц–1 ГГц, $A = 100 \text{ МГц}$ в полосе частот 1–6 ГГц	3
Оборудование сигнализации и телекоммуникации инфраструктуры железнодорожного транспорта [6–8]	80–800 МГц [6, 7]	10
	0,8–1,0 ГГц [6, 7]	20
	1,4–2,0 ГГц [6, 7]	10
	2,0–2,7 ГГц [6, 7]	5
	5,1–6,0 ГГц [6, 7]	3
	2,7–6,0 ГГц [8]	3

Окончание табл. 1
Ending of Tab. 1

Оборудование / Equipment	Диапазон частот / Frequency range	ПДУ ЭМП, В/м / EMF MPL, V/m
Электрическое оборудование для измерения, управления и лабораторного применения (ЭОИ) [9]	В базовой ЭМО:	
	80 МГц–1 ГГц;	3
	2,0–2,7 ГГц	1
	В промышленной ЭМО:	
	80 МГц–1 ГГц	10
	1,4–2,0 ГГц	3
2,0–2,7 ГГц	1	
В управляемой ЭМО: 80 МГц–1 ГГц; 1,4–2,7 ГГц	1	

ПДУ ЭМП в диапазонах частот MC 4G/5G, принятые для населения в разных странах с учетом нетепловых эффектов в организме человека, равны 2,5–90,0 мкВт/см² (3,0–18,4 В/м) [24]. Помехоустойчивость РП беспроводных медицинских устройств определяется характеристиками их восприимчивости к помехам по основному и побочным каналам [25–29]. Следует обратить внимание, что диапазоны значений ПДУ ЭМП для технических средств (1–20 В/м) и населения (3,0–18,4 В/м) практически совпадают.

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчета необходимого пространственного разнеса (НПР) между оборудованием систем MC 4G/5G и оборудованием критической инфраструктуры при условиях РРВ в свободном пространстве. Используются следующие данные о характеристиках БС и АУ систем MC 4G/5G, определяющих их ЭИИМ в направлении на рецептор ЭМИ.

1. Регулируемая выходная мощность передатчика внешней БС может достигать 43–53 дБм [10, 11] при коэффициенте усиления антенны БС 12–40 дБ [12–15]. Таким образом, интерес представляет анализ в диапазоне значений ЭИИМ в главном лепестке (ГЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА) БС от 0,1 до 100,0 кВт.

2. Максимальная выходная мощность передатчика АУ LTE (4G) в режиме частотного разделения каналов (FDD) составляет 25 дБм, для АУ LTE в режиме временного разделения каналов (TDD) – 28 дБм, для АУ 5G – 29 дБм с учетом требований к допускам; коэффициент усиления антенны АУ принят равным 0 дБ [16, 17].

Таблица 2. Необходимый пространственный разнос между базовой станцией и оборудованием критической инфраструктуры

Table 2. Required spatial separation between the base station and critical infrastructure equipment

Эквивалентная изотропно излучаемая мощность, кВт / Equivalent isotropic radiated power, kW	ПДУ ЭМП, В/м / EMF MPL, V/m				
	1	3	5	10	20
	Необходимый пространственный разнос, м / Required separation, m				
0,1	54,8	18,3	11,0	5,5	2,7
0,5	123,0	40,8	24,5	12,3	6,1
1,0	173,0	57,7	34,6	17,3	8,7
5,0	387,0	129,0	77,5	38,7	19,4
10,0	548,0	183,0	110,0	54,8	27,4
20,0	775,0	258,0	155,0	77,5	38,7
40,0	1095,0	365,0	219,0	110,0	54,8
60,0	1342,0	447,0	268,0	134,0	67,1
80,0	1549,0	516,0	310,0	155,0	77,5
100,0	1732,0	577,0	346,0	173,0	86,6

Таблица 3. Необходимый пространственный разнос между абонентским устройством и оборудованием критической инфраструктуры
Table 3. Required spatial separation between the subscriber device and critical infrastructure equipment

Эквивалентная изотропно излучаемая мощность, кВт / Equivalent isotropic radiated power, kW	ПДУ ЭМП, В/м / EMF MPL, V/m				
	1	3	5	10	20
	Необходимый пространственный разнос, м / Required separation, m				
25	3,1	1,03	0,62	0,31	0,15
28	4,4	1,45	0,87	0,44	0,22
29	4,9	1,63	0,98	0,49	0,24

Анализ расчетных значений НПР в табл. 2, 3 свидетельствует о следующем.

1. В полосах частот МС диапазона 0,8–1,0 ГГц, используемых большей частью для узкополосных низкоскоростных сервисов МС на большие расстояния, значения ЭИИМ в ГЛ ДНА БС, как правило, не превышают нескольких киловатт, и НПР с оборудованием критической инфраструктуры может достигать нескольких сотен метров.

2. В полосах частот МС диапазона 1,4–2,7 ГГц ЭИИМ БС достигает 10–20 кВт, НПР БС с оборудованием инфраструктуры железнодорожного транспорта составляет 100–150 м, с медицинским оборудованием [4, 5] и оборудованием ЭОИ [9] – до 250–770 м, однако требования по обеспечению НПР отсутствуют.

3. БС систем МС 5G диапазона 2,7–6,0 ГГц интенсивно используют активные фазированные антенные решетки (АФАР), в режиме Beamforming способные обеспечить ЭИИМ до 50–100 кВт [12, 15]. В этих случаях НПР БС с оборудованием железнодорожного транспорта может достигать 570 м, однако требования по обеспечению НПР отсутствуют.

4. При ПДУ ЭМП 20 В/м НПР оборудования инфраструктуры железнодорожного транспорта с АУ МС даже при максимальной ЭИИМ не превышает 15–24 см, и опасность помех наземному оборудованию железнодорожного транспорта от АУ диапазона 0,8–1,0 ГГц практически отсутствует. При ПДУ ЭМП 1–10 В/м в диапазоне до 2,7 ГГц НПР АУ с оборудованием ЭОИ [9] увеличивается до 4,9 м, в диапазоне до 6 ГГц НПР медицинского оборудования [4, 5] и оборудования железнодорожного транспорта с АУ – до 1,6 м, что требует введения специальных ограничений на использование АУ вблизи данного оборудования объектов критической инфраструктуры.

На рис. 1, 2 приведены расчетные зависимости средней интенсивности Z_{Σ} ЭМФ как скалярной суммы плотностей потока мощности ЭМП БС от территориальной плотности беспроводного трафика (Area Traffic Capacity, ATC) S_{TR} для типичных параметров АУ: коэффициента шума приемника $K_N = 5$, температуры окружающей среды $T_0 = 290$ К. Поскольку в радиоканалах МС технология ММО фактически лишь компенсирует несовершенство процессов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования [30], расчеты с использованием [21, 22] выполнены для потенциальной пропускной способности радиоканалов МС. В расчетах также учтены необходимость запаса в уровне полезного сигнала АУ для реализации хэндовера (параметр K_S) и компенсации потерь при РРВ в условиях городской застройки и при проникновении внутрь зданий (параметр L_p), а также типовые значения отношения уровней внутрисетевой помехи и собственного шума РП АУ (параметр K_{CC}), отношения сигнал/(шум + помеха) (параметр $SNIR$) и коэффициента направленного действия антенн БС (параметр G_0).

Ограничимся анализом трех базовых сценариев 5G, рекомендуемых [31], создающих наибольший уровень ЭМФ. На рис. 1, 2 пятью нижними пунктирными горизонтальными линиями обозначены значения ПДУ ЭМП для оборудования критической инфраструктуры (1, 3, 5, 10 и 20 В/м), соответствующие нормативам [4–9], верхней красной прерывистой линией обозначен уровень 1000 мкВт/см², рекомендуемый [32] в качестве ПДУ с учетом теплового поражения биотканей при воздействии радиочастотных ЭМП.

Рис. 1, а соответствует сценарию 5G Dense Urban eMBB, межсайтовое расстояние в котором составляет 200 м (радиус сайта $R_{max} = 100$ м), зависимости $Z_{\Sigma}(S_{TR})$ средней интенсивности ЭМФ от уровня ATC получены для различных частот диапазона FR1 5G (0,410–7,125 ГГц). Их анализ позволяет сделать вывод о том, что уже при $ATC = 10^5$ бит/с/м², соответствующей уровню 4G, эта интенсивность трафика на частотах более 1 ГГц делает создаваемую при этом ЭМО потенциально опасной для оборудования критической инфраструктуры и населения.

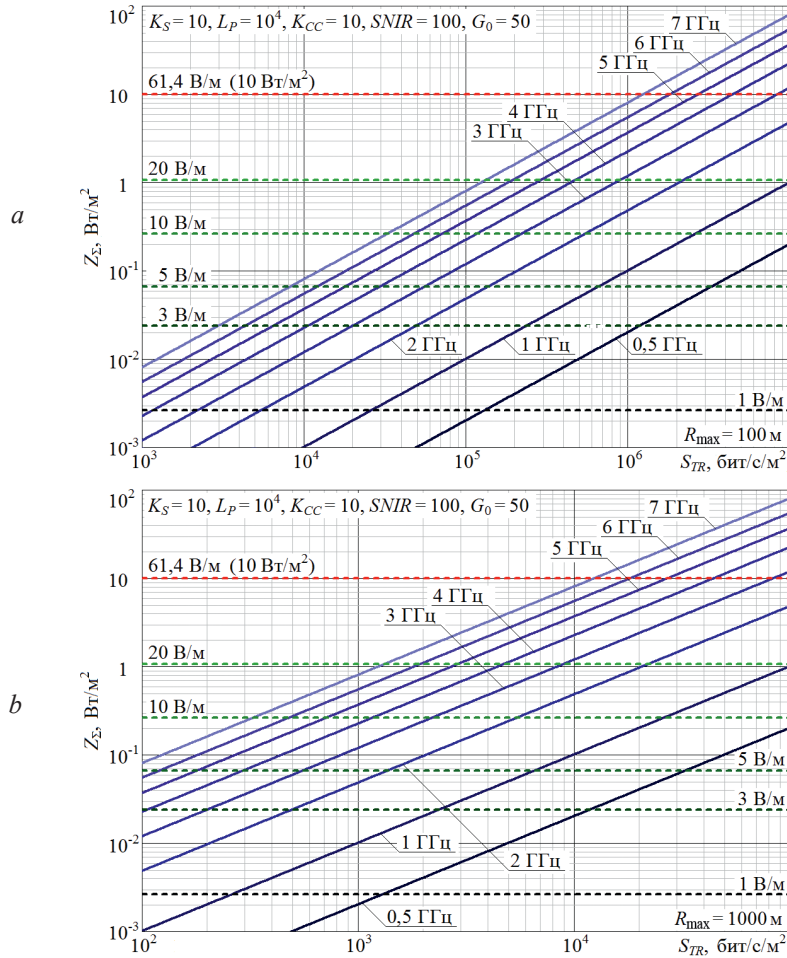


Рис. 1. Зависимости средней интенсивности электромагнитного фона от уровня АТС на частотах диапазона FR1 при реализации сценария: а – 5G Dense Urban eMBB; б – 5G Rural eMBB

Fig. 1. Dependence of the average intensity of the electromagnetic background on the ATC level at frequencies in the FR1 range during the implementation of the scenario in: а – 5G Dense Urban eMBB; б – 5G Rural eMBB

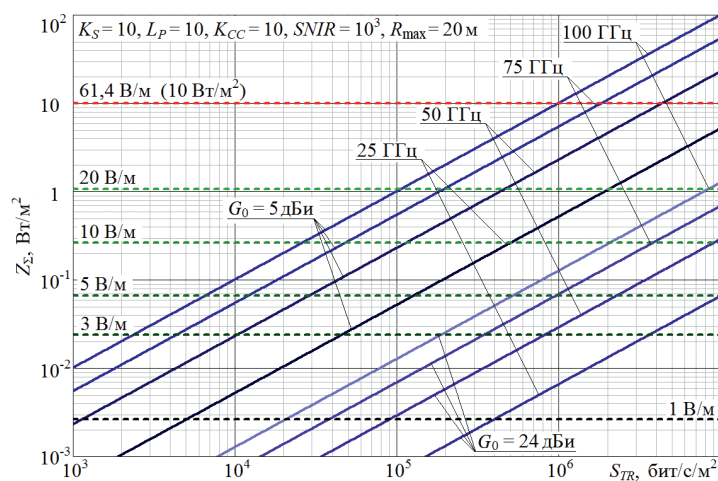


Рис. 2. Зависимости средней интенсивности электромагнитного фона, создаваемого при реализации сценария 5G Indoor/Outdoor Hotspot eMBB, от АТС диапазона FR2 и различной направленности электромагнитного излучения базовой станции

Fig. 2. Dependences of the average intensity of the electromagnetic background created during the implementation of the 5G Indoor/Outdoor Hotspot eMBB scenario on the ATC of the FR2 range and different directions of the electromagnetic radiation of the base station

Приближение ATC к уровням 10^6 – 10^7 бит/с/м², декларируемым для мобильной связи 5G, увеличивает интенсивность создаваемого ЭМФ на один-два порядка до уровней, на два-три порядка превышающих ПДУ ЭМП для электрического оборудования критической инфраструктуры и населения.

Рис. 1, b – это сценарий 5G Rural eMBB, соответствующий реализации услуг eMBB в сельской местности (радиус сайта $R_{\max} = 1000$ м) с территориальной плотностью пользователей, на два порядка меньшей по сравнению с предыдущим сценарием; зависимости $Z_{\Sigma}(S_{TR})$ получены для тех же частот диапазона FR1 5G. Их анализ показывает, что уже при $ATC = 10^3$ бит/с/м², что на два порядка меньше предельного уровня, декларируемого для систем 4G, создаваемые системами МС уровни ЭМФ оказываются сопоставимыми с ПДУ, а при увеличении ATC до уровней 10^4 – 10^5 бит/с/м², ожидаемых при полномасштабной реализации сервисов eMBB в сельской местности, условная средняя интенсивность создаваемого ЭМФ также способна на два-три порядка превысить ПДУ ЭМП для оборудования объектов критической инфраструктуры и населения.

Рис. 2 соответствует сценарию 5G Hotspot eMBB с использованием частот диапазона FR2 5G (24,25–52,6 ГГц с расширением до 70–100 ГГц) как в базовой бюджетной версии [31] с применением БС (точек доступа) со слабонаправленным излучением (четыре верхних графика), так и в перспективной версии с многоэлементными АФАР с направленным излучением в режиме Beamforming (четыре нижних графика). Этот сценарий ориентирован на реализацию в местах интенсивного использования беспроводных услуг мобильной связи как в помещениях (Indoor Hotspot), так и в местах локального сосредоточения АУ вне помещений (Outdoor Hotspot). Их анализ позволяет сделать вывод о том, что при использовании в этом сценарии слабонаправленных антенн уже при $ATC = 10^5$ бит/с/м², соответствующей уровню 4G, расположение оборудования критической инфраструктуры на расстояниях до 10–20 м от БС может представлять опасность, но поскольку ПДУ ЭМП для диапазона FR2 не определены, вопрос требует дополнительного изучения. Использование АФАР с направленным излучением позволяет практически на два порядка снизить среднюю интенсивность создаваемого ЭМФ, делая его потенциально опасным только при средней территориальной плотности трафика, приближающейся к верхнему пределу для 5G 10^7 бит/с/м². Однако следует учитывать, что применение АФАР в качестве антенных систем БС сопровождается увеличением на один-два порядка их ЭИИМ в ГЛ ДНА БС, что значительно увеличивает требования НПР между АФАР и оборудованием критической инфраструктуры, попадающим в ГЛ ЭМИ АФАР.

Средние уровни ЭМФ могут существенно снижаться принятием мер системного характера (уменьшение вплоть до полного исключения влияния внутрисетевых помех за счет применения режима TDD и АФАР в режиме Beamforming с большими коэффициентами усиления в узких лучах, а также за счет значительного увеличения объема радиочастотного ресурса, используемого системами мобильной связи; отказ от сотовой структуры сети в пользу адаптивной сетевой структуры с пространственным распределением точек доступа, применением реконфигурируемых и поглощающих интеллектуальных поверхностей и т. п.) с соответствующим снижением как опасности помех для электрического оборудования критической инфраструктуры, так и соответствующих вынужденных рисков для здоровья населения. Однако эти меры относительно мало влияют на ЭИИМ БС и АУ и на необходимый пространственный разнос излучающего оборудования мобильной связи и электрического оборудования критической инфраструктуры (расчетные значения которого приведены в табл. 2, 3), а в некоторых случаях даже увеличивают его (в частности, при значительном увеличении ЭИИМ в ГЛ АФАР в режиме Beamforming).

Вышеуказанные гигиенические нормативы (ПДУ ЭМП для населения) представляют собой предельные средние значения уровней воздействующих ЭМП, а сбой электронного оборудования во многих случаях определяются их пиковыми значениями (амплитудами импульсов). В таких случаях при импульсных режимах работы оборудования МС (режим TDD) и при флуктуациях сигналов в радиоканалах МС именно эти выбросы, на один-два порядка превышающие средние уровни ЭМП, как и в целом существенное усложнение спектрально-временной структуры сигналов МС новых поколений, могут представлять особую опасность.

В табл. 4 приведены значения интегрального превышения восприимчивости рецептора ПМ для наихудших случаев. Анализ выполнен для следующего беспроводного медицинского оборудования МРД: оборудования капсульной эндоскопии, функционирующего в полосе частот 430–440 МГц (радиоэлектронное средство 1 – РЭС 1) [25]; оборудования беспроводных медицинских

телесных сетей (Medical Body Area Network System, MBANS), функционирующего в полосе частот 2483,5–2500,0 МГц (РЭС 2) [26]; оборудования систем с активными имплантатами, функционирующего в полосах частот 2483,5–2500,0 МГц (РЭС 3) [27], 402–405 МГц (РЭС 4) [28], 401–402 МГц и 405–406 МГц (РЭС 5) [29].

Таблица 4. Значения *ИИМ* (дБ) для наихудшего случая при воздействии электромагнитного излучения базовой станции 4G/5G на радиоприемники медицинского оборудования малого радиуса действия

Table 4. Worst case *ИИМ* (dB) values for 4G/5G base station electromagnetic radiation exposure to short range medical equipment radios

Эмиттер / Emitter	Рецептор / Receptor				
	РЭС 1	РЭС 2	РЭС 3	РЭС 4	РЭС 5
БС LTE (FDD); ЭИИМ: 71,5 дБм	41,7	31,5	33,3	38,3	38,2
БС LTE (TDD); ЭИИМ: 70,5 дБм	40,9	30,2	32,2	36,4	36,6
БС 5G (тип 1-О – с активной антенной системой); ЭИИМ: 72,5 дБм	24,4	24,2	24,2	31,7	31,7

На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости значений *ИИМ* от наклонного расстояния между радиопередатчиками БС и медицинскими устройствами МРД РЭС 1 для различных значений радиуса *R* сайта БС. Линиями показана зависимость *ИИМ* от наклонного расстояния, рассчитанная с использованием модели свободного РРВ. Совокупностью точек (диаграмма рассеяния) показаны значения *ИИМ*, рассчитанные с использованием трехмерной модели РРВ в каждой точке наблюдения.

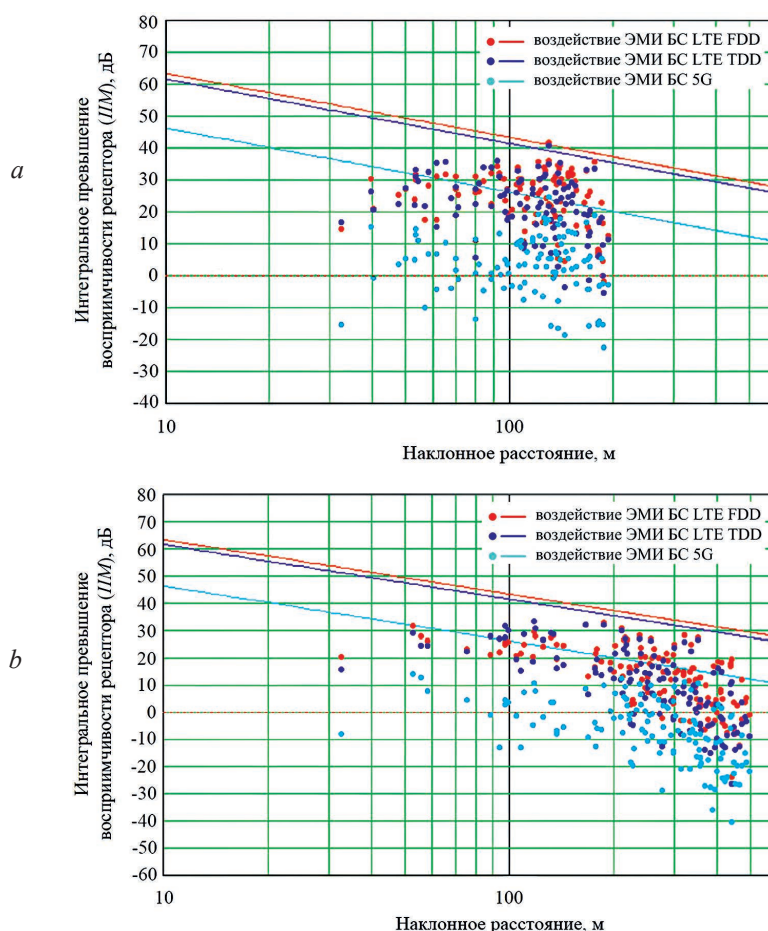


Рис. 3. Зависимость *ИИМ* от наклонного расстояния между радиопередатчиками базовой станции и радиоприемниками РЭС 1, размещенными внутри зданий на высоте 3 м над земной поверхностью: $a - R = 200$ м; $b - R = 500$ м

Fig. 3. Dependence of *ИИМ* on the inclined distance between the base station radio transmitters and RES 1 radio receivers located inside buildings at a height of 3 m above the ground surface: $a - R = 200$ m; $b - R = 500$ m

Данные табл. 4 свидетельствуют о том, что ЭМИ БС 4G/5G могут быть источником помех для рассмотренных медицинских РЭС МРД при нахождении рецепторов внутри зданий, поскольку при $ПМ > 0$ дБ ЭМИ каждого рассмотренного эмиттера является потенциально опасным для каждого рассмотренного рецептора. ЭМИ БС МС 4G/5G могут создавать помехи функционированию РЭС МРД по основному и побочному каналам одновременно (90 % случаев из рассмотренных 60 ситуаций). Помеха по основному каналу радиоприема является преобладающей в 34 % рассмотренных случаев.

Возможный ущерб для медицинского оборудования МРД от помех – ошибки в данных (информация о здоровье человека), получаемых от радиопередатчиков медицинских систем МРД. Наиболее опасным ущербом является нарушение работы жизненно важных имплантируемых устройств. ЭМИ АУ также может быть источником помех для функционирования беспроводных медицинских устройств МРД, работающих в помещениях лечебных учреждений, при нахождении эмиттеров и рецепторов в одном помещении [2]. Интегральное превышение восприимчивости РП $ПМ$ достигает 38,3–65,0 дБ на расстояниях 1,33–2,63 м между эмиттерами и рецепторами в зависимости от их типа. Для снижения опасности систем мобильной связи 4G/5G для беспроводных медицинских систем МРД, функционирующих в медицинских учреждениях, могут быть рекомендованы следующие меры:

- 1) ориентация антенн БС в направлении, исключающем облучение ГЛ их диаграмм направленности зданий медицинских учреждений;
- 2) использование дополнительных фильтров в оборудовании БС для снижения уровней побочных излучений в частотных диапазонах, в которых функционируют медицинские системы МРД;
- 3) размещение медицинских систем МРД на нижних этажах зданий медицинских учреждений, вдали от окон помещений, в которых они функционируют;
- 4) нормирование минимально допустимого пространственного разнеса между АУ и системами МРД внутри помещений;
- 5) экранирование помещений, в которых функционируют жизненно важные беспроводные медицинские устройства;
- 6) ограничение использования АУ сетей 4G/5G в помещениях медучреждений в местах и во время функционирования медицинских устройств критической важности;
- 7) экспериментальная проверка наличия и опасности нарушений работы беспроводного медицинского оборудования МРД при воздействии ЭМП оборудования МС 4G/5G с целью уточнения необходимых ограничений на характеристики ЭМО в медицинских учреждениях;
- 8) необходимое ужесточение требований к характеристикам восприимчивости беспроводного медицинского оборудования МРД к помехам от ЭМИ радиооборудования систем МС 4G/5G по результатам экспериментальной проверки по п. 7;
- 9) необходимое ужесточение требований к побочным излучениям ЭМИ радиооборудования систем МС 4G/5G в частотных диапазонах, в которых функционируют медицинские системы МРД, по результатам экспериментальной проверки по п. 7.

Заключение

1. Приведенные результаты исследований свидетельствуют о серьезной потенциальной опасности сложной электромагнитной обстановки, создаваемой множеством электромагнитных излучений оборудования мобильной связи 4G/5G, для оборудования объектов критической инфраструктуры, в частности, для оборудования сигнализации и телекоммуникации железнодорожного транспорта, медицинского оборудования и промышленного электрического оборудования для измерения, управления и лабораторного применения, а также для населения при полномасштабном развитии и внедрении систем и услуг 4G/5G с увеличением на несколько порядков пространственной плотности источников электромагнитных излучений, территориальной плотности мобильного трафика и скоростей передачи данных по радиоканалам мобильной связи.

2. Быстрая эволюция мобильной связи 4G→5G→6G, сопровождающаяся существенным усложнением электромагнитной обстановки, нарушает сложившееся ранее равновесие между степенью сложности электромагнитной обстановки и степенью электромагнитной защиты всех элементов инфраструктуры современного общества. В этой связи следует признать актуальными следующие вопросы:

а) выполнение системного анализа электромагнитной совместимости инфраструктуры мобильной связи и других видов общественной инфраструктуры – экономики, обороны, инженерной, рыночной, а также других элементов социальной и транспортной инфраструктур (в частности, принимая во внимание перспективы развития беспилотного транспорта всех видов), позволяющего конкретизировать проблемы электромагнитной безопасности для каждого из видов инфраструктуры;

б) обоснование и принятие адекватных требований стандартов к характеристикам восприимчивости и электромагнитной совместимости оборудования различных видов и назначений во всех полосах частот мобильной связи диапазонов УВЧ, СВЧ и КВЧ, а также эффективных технических, системных и организационных мер по обеспечению электромагнитной совместимости этого оборудования с оборудованием мобильной связи для его надежного функционирования в технических системах всех видов и элементов общественной инфраструктуры при полномасштабной реализации систем и услуг мобильной связи 4G/5G/6G;

в) до завершения работ по пунктам (а) и (б) принятие, при необходимости, временных ограничений на условия совместной эксплуатации оборудования мобильной связи 4G/5G информационной инфраструктуры и критического оборудования иных инфраструктур (транспорта, экономики и др.), обеспечивающих защиту оборудования и систем этих инфраструктур от воздействия электромагнитных излучений мобильной связи (в частности, по аналогии с ограничениями, принятыми для защиты населения от электромагнитных полей мобильной связи, принимая во внимание фактическое совпадение значений предельно допустимых уровней электромагнитных полей для технического оборудования и населения).

3. Выполнение требований стандартов [4–10, 11, 16, 17, 25–29] не гарантирует отсутствия помех оборудованию объектов критической инфраструктуры от оборудования мобильной связи 4G/5G. В силу неизбежности дальнейшего интенсивного развития систем и услуг мобильной связи 4G/5G/6G очевидна необходимость объединения отдельных ведомственных систем радиомониторинга, электромагнитной защиты и управления использованием радиочастотного спектра в единую структуру с широкими полномочиями, обеспечивающими необходимый контроль и управление процессами развития мобильной связи 4G/5G/6G в целях надежного обеспечения электромагнитной безопасности населения и объектов общественной инфраструктуры при планировании и реализации этих процессов.

4. Отмеченное выше совпадение диапазонов значений предельно допустимых уровней радиочастотных электромагнитных полей для технических средств и населения лишает смысла предложения, подобные [32, 33], о повышении на один-два порядка предельно допустимых уровней электромагнитных полей для населения, поскольку оно не только представляет очевидную опасность для населения в силу наличия многочисленных нетепловых эффектов воздействия электромагнитных полей на человеческий организм, но и чревато катастрофическими последствиями массовых нарушений в работе оборудования объектов критической инфраструктуры.

Список литературы / References

1. Svistunou A., Mordachev V., Sinkevich E. (2023) Problem of Electromagnetic Compatibility Between 4G/5G Mobile Communications and Railway Signaling/Telecommunication Equipment. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2023"*, Krakow, Poland, Sept. 4–8. 6.
2. Baltrukovich P. I., Ming Ye, Mordachev V. I., Svistunou A. S., Sinkevich E. V. (2022) Electromagnetic Compatibility Wireless Medical Small Radius Equipment Action and Equipment Mobile 4G/5G Communications. *Vesnik Suviazii*. 2 (172), 44–49 (in Russian).
3. Svistunou A., Mordachev V., Sinkevich E., Ming Ye, Dubovik A., Shakinka I. (2022) Impact of Electromagnetic Radiation of 4G/5G Base Stations on Medical Short-Range Devices in Urban Area. *Proc. of the Int. Symp. "EMC Europe 2022"*, Gothenburg, Sweden, Sept. 5–8. 537–542.
4. *Collateral Standard: Electromagnetic Disturbances – Requirements and Tests. Medical Electrical Equipment. Part 1–2: General Requirements for Basic Safety and Essential Performance*. Edition 4.0 2014-02. IEC 60601-1-2.
5. *ElectroMagnetic Compatibility (EMC) Standard for Radio Equipment and Services; Part 3: Specific Conditions for Short Range Devices (SRD) Operating on Frequencies Between 9 kHz and 246 GHz; Harmonised Standard for ElectroMagnetic Compatibility*. ETSI EN 301 489-3 V2.3.2 (2023-01).
6. *Railway Applications – Electromagnetic Compatibility. Part 4: Emission and Immunity of the Signalling and Telecommunications Apparatus*. IEC 62236-4:2018.

7. *Railway Applications. Electro-Magnetic Compatibility. Part 4: Issuance and Immunity of Signaling and Telecommunication Devices.* UNE EN50121-4.
8. *Brodersen RTU32. Test Report. No 20194-1-R00, 2020.* Available: <https://cdn.brodersen.com/wp-content/uploads/EN-50121-4-2016-A1-2019.pdf>.
9. *Electrical Equipment for Measurement, Control and Laboratory Use – EMC Requirements. Part 1: General Requirements.* GOST R IEC 61326-1–2014 (in Russian).
10. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (3GPP TS 36.104, Vers. 15.8.0 Rel. 15).* ETSI TS 136 104 V15.8.0 (2019-10).
11. *IMT Cellular Networks; Harmonized Standard for Access to Radio Spectrum; Part 24: New Radio (NR) Base Stations (BS); Rel. 15.* ETSI EN 301908-24.
12. Von Butovitsch P., Aspund H., Astely D., Chapman T., Frenne M., Ghasemzadeh F., et al. (2020) Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments. *Bridging the Gap Between Theory and Practice. Academic Press.* 713.
13. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) System Scenarios.* ETSI TR 136 942 V17.0.0 (2022-04).
14. *AAU5613 Product Description.* Huawei Technologies Co., Ltd. 2018. 18.
15. *Nokia Solutions and Networks AirScale MAA 64T64R 128AE B41 120W AAHF AAHF-01.* Available: <https://fccid.io/VBNAAHF-01>.
16. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (3GPP TS 36.101, Vers. 15.10.0 Rel. 15).* ETSI TS 136 101 V15.10.0 (2020-04).
17. *IMT Cellular Networks; Harmonised Standard for Access to Radio Spectrum; Part 25: New Radio (NR) User Equipment (UE).* ETSI EN 301 908-25.
18. Sinkevich E., Tsyankenka D., Yurtsev O. (2016) System-Level Model for Analysis of Dipole Antenna Response to Electromagnetic Pulse. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMCEUROPE, Wroclaw, Poland.* 614–619.
19. *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study of Radio Frequency (RF) and Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements for Active Antenna Array System (AAS) Base Station.* 3GPP TR 37.840 V12.1.0 (2013-12).
20. Pearlman R. A. (1978) Physical Interpretation of the IEMCAP Integrated EMI Margin. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility.* 310–315.
21. Mordachev V. (2019) Estimation of Electromagnetic Background Intensity Created by Wireless Systems in Terms of the Prediction of Area Traffic Capacity. *Proc. of the Int. Symp. “EMC Europe 2019”, Barcelona, Spain, Sept. 2–6.* 82–87.
22. Mordachev V. (2021) Electromagnetic Background Generated by Mobile (Cellular) Communications. *Proc. of the Asia Pacific Int. Symp. on EMC (Hybrid Conf.) APEMC 2021, Bali-Indonesia, Sept. 27–30.* 37–40.
23. *IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond.* Rec. ITU-R M.2083.
24. Mordachev V. (2022) Refined Analysis of the Correlation Between the Accepted Maximum Permissible Levels of Radio Frequency Electromagnetic Fields for the Population and the Lethality Rate of COVID-19. *Doklady BGUIR.* 20 (1), 55–64. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-55-64>.
25. *Short Range Devices (SRD); Ultra Low Power (ULP) Wireless Medical Capsule Endoscopy Devices Operating in the Band 430 MHz to 440 MHz.* ETSI EN 303 520 V1.2.1 (2019-06).
26. *Short Range Devices (SRD); Medical Body Area Network Systems (MBANSs) Operating in the 2483,5 MHz to 2500 MHz Range.* ETSI EN 303 203 V2.1.1 (2015-11).
27. *Short Range Devices (SRD); Low Power Active Medical Implants (LP-AMI) and Associated Peripherals (LP-AMI-P) Operating in the Frequency Range 2483,5 MHz to 2500 MHz.* ETSI EN 301 559 V2.1.1 (2016-10).
28. *Ultra Low Power Active Medical Implants (ULP-AMI) and Associated Peripherals (ULP-AMI-P) Operating in the Frequency Range 402 MHz to 405 MHz.* ETSI EN 301 839 V2.1.1 (2016-04).
29. *Ultra Low Power Medical Data Service (MEDS) Systems Operating in the Frequency Range 401 MHz to 402 MHz and 405 MHz to 406 MHz.* ETSI EN 302 537 V2.1.1 (2016-10).
30. Tikhvinskiy V., Terentiev S., Visochin V. (2014) *LTE/LTE Advanced Mobile Networks: 4G Technologies, Applications Architecture.* Moscow, Media Publ. 384 (in Russian).
31. *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020.* Report ITU-R M.2412.
32. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2020) Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics.* 118 (5), 483–524.
33. Spodobaev U. M. (2020) Electromagnetic Safety of Modern Technologies: ICNIRP Documents. *Electrosvyaz Magazine.* (4), 21–24 (in Russian).

Вклад авторов

Мордачев В. И. выполнил постановку задачи, разработал методику оценки электромагнитного фона, создаваемого системами мобильной связи, на основе анализа территориальной плотности беспроводного трафика, участвовал в обсуждении результатов исследований и подготовке рукописи статьи.

Свистунов А. С. разработал методику анализа электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности медицинского оборудования, выполнил анализ электромагнитной безопасности систем мобильной связи 4G/5G для населения и оборудования объектов критической инфраструктуры, систематизацию и обобщение результатов исследований, участвовал в подготовке рукописи статьи.

Синькевич Е. В. обосновал критерий электромагнитной совместимости *ИМ* систем мобильной связи 4G/5G с оборудованием объектов критической инфраструктуры, участвовал в обсуждении результатов исследований.

Authors' contribution

Mordachev V. I. stated the research problem, developed a technique for evaluating the electromagnetic background created by systems of mobile communications, based on the analysis of area traffic capacity, participated in discussion of research results and in preparation of the manuscript.

Svistunou A. S. developed a technique for analyzing the electromagnetic compatibility and safety of medical equipment, performed an analysis of safety of 4G/5G MC systems for population and for the equipment of critical infrastructure, systematization and generalization of research results; participated in preparation of the manuscript.

Sinkevich E. V. substantiated the electromagnetic compatibility criterion *ИМ* for 4G/5G mobile communications systems and equipment of critical infrastructure, participated in the discussion of research results.

Сведения об авторах

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ 1.7) НИЧ, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Свистунов А. С., науч. сотр. НИЛ 1.7 НИЧ, БГУИР

Синькевич Е. В., зам. зав. НИЛ 1.7 НИЧ, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Information about the authors

Mordachev V. I., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Research Laboratory "Electromagnetic Compatibility of Radio-Electronic Equipment" (Lab. 1.7) of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Svistunou A. S., Researcher at the Lab. 1.7 of R&D Department, BSUIR

Sinkevich E. V., Deputy Head of the Lab. 1.7 of R&D, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-92-104>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 534.6

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ, ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В. С. ГАВРИЛЮК, Н. В. ДЕЖКУНОВ, А. В. КОТУХОВ, В. А. КОЛТОВИЧ,
В. С. МИНЧУК, М. П. ФЕДОРИНЧИК, Е. А. КУРЛЮК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 14.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Приведены наиболее значимые результаты исследований в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, направленных на создание методов и приборов для мониторинга кавитации и управления ее активностью. Уточнены механизмы и закономерности новых и малоизученных явлений: ультразвукового капиллярного эффекта, звуколюминесценции, кавитационного шума и его спектральных компонент, оценены возможности их использования для аппаратурной реализации в качестве индикаторов кавитации. Обнаружены новые кавитационные явления: генерирование постоянной ЭДС под действием переменного давления ультразвуковой частоты, акустическое просветление кавитационной области при импульсном модулировании ультразвукового поля, эффект долговременной памяти кавитационных свойств жидкости. Установлены неизвестные ранее закономерности: показано, что кавитационная область проходит четыре стадии развития при увеличении интенсивности ультразвука; сформулирована теорема о максимуме активности кавитации; установлены спектральные характеристики кавитационного шума, коррелирующие с интенсивностью звуколюминесценции; показано, что импульсное модулирование ультразвукового поля позволяет управлять активностью кавитации. На основании полученных данных разработаны новые методы и приборы для исследования кавитации и управления ее активностью. По ряду параметров это оборудование превосходит лучшие мировые образцы, что подтверждается поставками в Россию, страны Евросоюза, Китай, США и Южную Корею.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, датчик, кавитометр, спектральный анализ, звуколюминесценция, кавитационный шум, активность кавитации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Исследование акустической кавитации: результаты, практическая реализация и перспективы развития / В. С. Гаврилук [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 92–104. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-92-104>.

RESEARCH OF ACOUSTIC CAVITATION: RESULTS, PRACTICAL IMPLEMENTATION AND DEVELOPMENT PROSPECTS

VITALIY S. GAVRILUK, NIKOLAI V. DEZHKUNOV, ALEKSEI V. KOTUKHOV,
VALERIY A. KOLTOVICH, VIACHESLAV S. MINCHUK,
MIKHAIL P. FEDORINCHIK, EVGENIY A. KURLIUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 14.02.2024

Abstract. The most significant results of research performed in the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, aimed at creating methods and instruments for monitoring cavitation and controlling its activity, are presented. To achieve this goal, it was necessary to clarify the mechanisms and patterns of new and little-studied phenomena: ultrasonic capillary effect, sonoluminescence, cavitation noise and its spectral components and evaluate the possibilities of their use for hardware implementation as cavitation indicators. New cavitation phenomena have been discovered: reverse ultrasonic capillary effect, generation of constant EMF under the influence of alternating pressure of ultrasonic frequency; acoustic clearing of the cavitation area with pulsed modulation of the ultrasonic field, the effect of long-term memory of the cavitation properties of the liquid. Previously unknown patterns have been established: it is shown that the cavitation region goes through four stages of development with increasing ultrasound intensity; a theorem on the maximum cavitation activity was formulated; the spectral characteristics of cavitation noise were established, correlating with the intensity of sonoluminescence. It has been shown that pulsed modulation of the ultrasonic field makes it possible to control the dynamics of the development of the cavitation region and the activity of cavitation. Based on the data obtained, new methods and instruments have been developed to study cavitation and control its activity. In a number of parameters, the created equipment surpasses the best world samples, what is confirmed by deliveries to the Russia, EU countries, China, USA and South Korea.

Keywords: ultrasound, cavitation, sensor, cavitometer, spectral analysis, sonoluminescence, cavitation noise, cavitation activity.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Gavriluk V. S., Dezhkunov N. V., Kotukhov A. V., Koltovich V. A., Minchuk V. S., Fedorinchik M. P., Kurliuk E. A. (2024) Research of Acoustic Cavitation: Results, Practical Implementation and Development Prospects. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 92–104. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-92-104> (in Russian).

Введение

Ультразвуковые колебания широко используются для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях. Общеизвестно, что ключевой фактор при этом – кавитация – явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа под действием переменного давления ультразвуковой частоты [1]. При захлопывании нестационарных пузырьков генерируются ударные волны в жидкости и пузырьке, высокие температуры и давления в парогазовой смеси внутри пузырьков, микроструи жидкости. Температура в пузырьке может достигать 2000–6000 К и выше [2], что приводит к возникновению свечения в видимой области спектра – звуколюминесценции (ЗЛ). При пульсациях и захлопывании полостей в кавитационной области генерируется сложный акустический сигнал – кавитационный шум (КШ). Согласно [1–4], КШ содержит информацию о состоянии кавитационной области и динамическом поведении пузырьков. Поэтому спектральный анализ КШ может служить эффективным методом исследования кавитации [3]. Предлагались и другие методы детектирования кавитации и оценки ее активности, например, по интенсивности ЗЛ или ультразвуковому капиллярному эффекту [5].

Многочисленными исследованиями показано, что активность кавитации не определяется однозначно интенсивностью ультразвука, сильно зависит от свойств жидкости, ее газосодержания, температуры, наличия зародышей кавитации и других параметров. Многие из параметров, влияющих на активность кавитации, могут неконтролируемо меняться во времени при воздействии ультразвуком на жидкости, например, за счет дегазации [1, 2, 6] или в результате химических реакций [7]. Все это в совокупности с неполнотой знаний о закономерностях генерирования кавитации является причиной недостаточно высокой воспроизводимости ультразвуковых технологических процессов.

В последние годы интенсивно исследуются возможности применения мощного ультразвука (УЗ) в кавитационном режиме в медицине и биологии в связи с обнаружением новых многообещающих эффектов. Это, например, подавление роста раковых клеток [8, 9] и повышение проницаемости клеточных мембран [10, 11]. Отмечено, что кавитация возникает при относительно невысоких интенсивностях УЗ [11, 12], используемых в терапии. Проблема контроля активности кавитации и управления кавитационными режимами ультразвукового воздействия становится особенно актуальной при проведении медико-биологических исследований и в связи с перспективой внедрения кавитационных технологий в медицинскую практику. В статье представлены результаты исследований, выполненных в БГУИР и направленных на создание методов и приборов для мониторинга кавитации и управления ее активностью.

Методики исследований и оборудование

Исследования выполнены в низкочастотных (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) ультразвуковых полях. Использовались два основных типа излучателей: погружные с волноводами и встроенные в днище рабочей емкости. Детальное описание вариантов экспериментальных установок представлено в [5, 13–15]. Основные исследования в ВЧ-полях выполнены с использованием рабочей емкости в виде цилиндра из нержавеющей стали диаметром 100 мм и высотой 160 мм. В днище емкости вмонтирован фокусирующий излучатель ультразвуковых колебаний. Датчик акустического сигнала (гидрофон) установлен таким образом, что его приемный элемент находится на расстоянии 25 мм от фокального пятна. На уровне фокального пятна ВЧ-излучателя в боковой стенке емкости вмонтирован световод, по которому оптическое излучение из кавитационной области попадает в фотоумножитель. На рис. 1 представлен общий вид установки для исследования кавитации с использованием НЧ ультразвуковой ванны.

Технические характеристики установки позволяют регулировать скорость развития кавитационной области путем варьирования длительности и периода следования импульсов УЗ. Сигнал с гидрофона H подавался на широкополосный усилитель. На осциллографе записывались интегральный акустический сигнал H и сигнал фотоумножителя L , с помощью которого измерялась интенсивность ЗЛ. Момент возникновения нелинейно пульсирующих пузырьков фиксировался по появлению ЗЛ.



Рис. 1. Пример комплектации установки для исследования кавитации в низкочастотной ультразвуковой ванне

Fig. 1. An example of a setup for studying cavitation in a low-frequency ultrasonic bath

Результаты исследований

Стадии развития кавитационной области

Разработка приборов для исследования кавитации и измерения ее активности с использованием кавитационного шума является одним из наиболее перспективных направлений в данной области [15]. Обусловлено это тем, что КШ легко преобразуется в электрический сигнал и может регистрироваться относительно простыми методами, в том числе в оптически непрозрачных жидкостях, суспензиях, эмульсиях и биологических тканях. Поэтому поиск спектральных характеристик КШ, коррелирующих с активностью кавитации, представляет значительный интерес с двух точек зрения: для уточнения представлений о механизме генерирования соответствующих

спектральных составляющих КШ и для оценки возможности использования параметров спектра, коррелирующих с интенсивностью ЗЛ.

В результате проведенных исследований [3, 15–19] получены данные, позволившие уточнить представления о закономерностях генерирования кавитации. На рис. 2 показаны результаты синхронной регистрации выходных сигналов фотоумножителя L (рис. 2, *a*) и гидрофона H (рис. 2, *b*) в фокусированном импульсном ультразвуковом поле при плавном увеличении напряжения на излучателе. Рабочая жидкость – дистиллированная вода при $q = (22 \pm 1,5)^\circ\text{C}$, длительность импульсов ультразвукового поля $\tau = 3$ мс, период следования $T = 100$ мс, скорость увеличения напряжения на излучателе $7,5$ В/с, $f_0 = 720$ кГц при плавном увеличении напряжения U на излучателе. Генератор включался на 5-й секунде после начала эксперимента. На первом этапе, как видно из рис. 2, *b*, выходной сигнал гидрофона увеличивается линейно со временем. Отклонение зависимости $H(t)$ от первоначальной прямой в сторону уменьшения (примерно на 13-й секунде) вызвано, очевидно, увеличением поглощения ультразвука вследствие возникновения пузырьков в фокальной области излучателя.

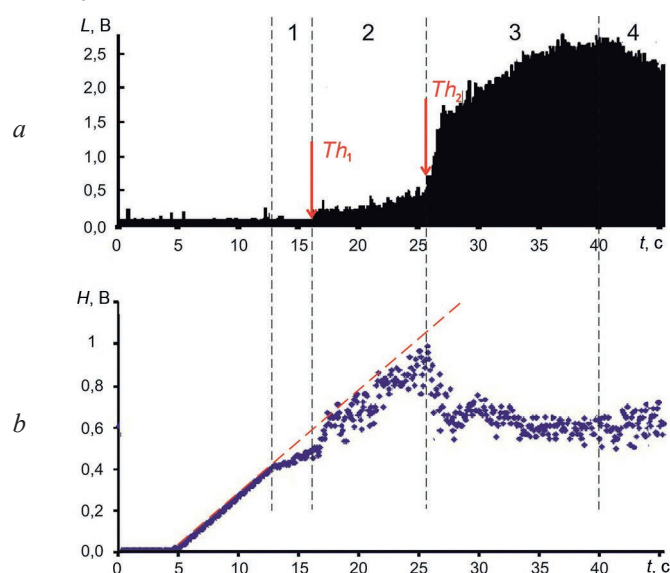


Рис. 2. Эволюция характеристик кавитационной области при увеличении напряжения на излучателе
Fig. 2. Evolution of the characteristics of the cavitation region with increasing voltage on the emitter

Свечение с интенсивностью выше уровня фоновых помех возникает примерно на 17-й секунде после начала эксперимента. Этот момент отмечен на рис. 2, *a* стрелкой Th_1 – первый порог ЗЛ. Одновременно с возникновением ЗЛ меняется характер кривой $H(t)$, а именно – появляется значительный разброс сигнала H . При некотором критическом значении напряжения U наклон зависимости $L(t)$ изменяется скачком, т. е. скорость роста интенсивности ЗЛ резко увеличивается. Этот момент отмечен на рис. 2, *a* стрелкой Th_2 – второй порог ЗЛ. Быстрый рост интенсивности ЗЛ сопровождается соответствующим быстрым падением выходного сигнала гидрофона H . Анализ представленных данных позволяет выделить четыре стадии эволюции кавитации [3, 15, 19]:

- 1 – возникновения и пульсации пузырьков при отсутствии ЗЛ;
- 2 – возникновения ЗЛ и последующего роста ее интенсивности при незначительном увеличении поглощения УЗ;
- 3 – быстрого роста ЗЛ при таком же увеличении поглощения УЗ;
- 4 – пересыщения кавитационной области пузырьками, когда активность кавитации, оцениваемая по интенсивности ЗЛ, уменьшается, несмотря на увеличение напряжения U .

На рис. 2 стадии отделены штриховыми линиями. Переход от одной стадии развития кавитационной области к другой сопровождается изменением состава регистрируемых спектров (рис. 3). Маркером на рис. 3 отмечена основная частота $f_0 = 720$ кГц, штриховой линией показан уровень широкополосного шума WBN (Wide Band Noise), т. е. непрерывной составляющей КШ. Таким образом, спектральный анализ кавитационного шума позволяет идентифицировать стадии развития кавитационной области.

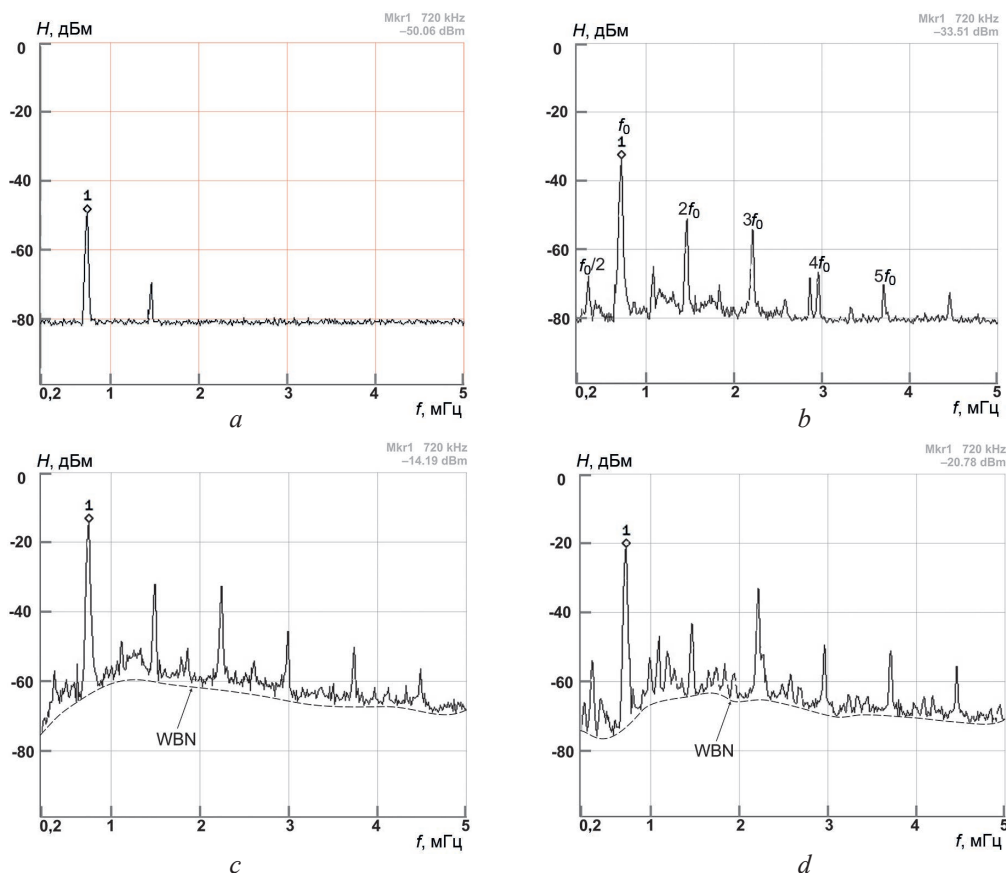


Рис. 3. Спектры акустического сигнала для стадий развития кавитационной области: *a, b, c, d* – первой, второй, третьей и четвертой соответственно; $f_0 = 720$ кГц; $\tau = 3$ мс; $T = 30$ мс; $q = (21 \pm 2)^\circ\text{C}$

Fig. 3. Spectra of the acoustic signal for different stages of development of the cavitation region: *a, b, c, d* – first, second, third and fourth, respectively; $f_0 = 720$ kHz; $\tau = 3$ ms; $T = 30$ ms; $q = (21 \pm 2)^\circ\text{C}$

Механизмы генерирования спектральных компонент кавитационного шума

Из сопоставления данных рис. 2, 3 следует, что субгармоника основной частоты $f_0/2$ и непрерывная составляющая спектра КШ (НСКШ) возникают на той же стадии развития кавитационной области, что и ЗЛ. Поэтому представляется возможным использовать любой из этих параметров для детектирования кавитации. Однако, как отмечено в [16], существуют режимы озвучивания жидкостей, при которых субгармоника отсутствует в спектре КШ. Такие спектры регистрируются, например, в частично дегазированной воде при большой скважности импульсов ультразвука $N = T/\tau$. Поэтому метод оценки активности кавитации по интенсивности субгармоники имеет существенные ограничения. С другой стороны, с ростом скважности уменьшается поглощение УЗ [17], т. е. наблюдается своего рода эффект акустического просветления кавитационной области. При этом интенсивность ЗЛ растет в широком диапазоне изменения N , что указывает на повышение эффективности преобразования и концентрации энергии кавитации при увеличении скважности импульсов УЗ-поля. Полученными в [16] результатами подтверждена гипотеза, в соответствии с которой субгармоника в спектре КШ генерируется большими пузырьками размерами больше резонансного. Такие пузырьки, согласно [1, 17, 19], пульсируют, мало меняя свои размеры, и не генерируют свечения и других кавитационных явлений, однако эффективно поглощают и рассеивают энергию УЗ. В импульсном поле концентрация больших неэффективных полостей снижается, что и обеспечивает упомянутое выше просветление кавитационной области и повышение активности кавитации.

Согласно [1, 2], интенсивность ЗЛ определяется концентрацией нестационарных полостей и эффективностью, с которой они преобразуют энергию УЗ в другие виды энергии. Поэтому ЗЛ могла бы служить надежным индикатором уровня активности кавитации. Однако возможности ее использования для таких целей существенно ограничены: во-первых, этот метод применим только для прозрачных жидкостей, во-вторых, измерения должны проводиться в затемненном

помещении, чтобы исключить влияние фоновых засветок. Поскольку кавитационный шум излучается пузырьками при их движении, то, как обоснованно считают многие авторы, он содержит информацию о состоянии кавитационной области и динамическом поведении пузырьков. Поэтому можно ожидать, что спектр КШ будет включать компоненты, генерируемые захлопывающимися полостями. С целью выявления таких компонент проведены исследования корреляции спектральных характеристик КШ и ЗЛ [18]. В табл. 1 представлен перечень параметров, по которым проводилось исследование их корреляции с активностью кавитации, оцениваемой по интенсивности ЗЛ.

Таблица 1. Параметры спектра кавитационного шума
Table 1. Parameters of the cavitation noise spectrum

Параметр H / Parameter H	Алгоритм вычисления параметра H / Algorithm for calculating parameter H
Power-1	Сумма всех точек спектра без основного сигнала
Power-123	Сумма всех точек спектра без основного сигнала (гармоника f_0) и без гармоник 1.5, 2, 2.5, 3
Power-12345	Сумма всех точек спектра без основного сигнала (гамоника f_0) и без гармоник 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5
Power-All	Сумма всех точек спектра без основного сигнала и без всех гармоник и субгармоник $(n + S)f_0$
Pnoise 12	Сумма точек спектра между основным сигналом и 2-й гармоникой (учитывается 1.5-я гармоника)
Pnoise 12-1.5	Сумма точек спектра между основным сигналом и 2-й гармоникой (без 1.5-й гармоники)
Psignal	Интенсивность основного сигнала (сумма точек спектральной составляющей на частоте f_0)
Pharm 0.5	Мощность 0.5-й гармоники (субгармоника, частота в два раза меньше, чем частота основного сигнала f_0)
Psumhalfharm	Мощность всех субгармоник $(n + S)f_0$

В экспериментах увеличивали напряжение U на излучателе и регистрировали выходной сигнал L фотоумножителя, пропорциональный интенсивности ЗЛ, и спектры КШ. На рис. 4 приведены примеры сопоставления L и параметров спектра КШ при $f_0 = 720$ кГц; $\tau = 3$ мс; $T = 30$ мс; $q = (21 \pm 1,5)^\circ\text{C}$. Здесь спектральный акустический параметр H представлен в линейном масштабе, а выходной сигнал фотоумножителя L – в логарифмическом. Показано, что в диапазоне интенсивностей, соответствующих первой стадии развития кавитационной области (рис. 4, a, b , $U < 150$ В), интенсивность ЗЛ хорошо коррелирует с интенсивностью субгармоники основного сигнала, т. е. сигнала на частоте $f_0/2$. Однако при более высоких интенсивностях УЗ зависимости $L(U)$ и $H(U)$ различаются кардинально, а именно: интенсивность ЗЛ увеличивается с ростом интенсивности УЗ, а H уменьшается. Примерно также зависит от U и параметр, полученный суммированием всех субгармоник.

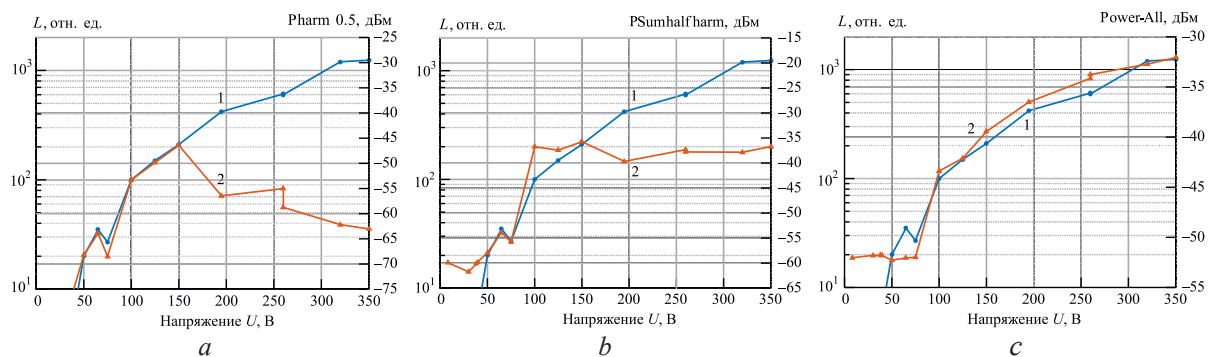


Рис. 4. Корреляция интенсивности звуколюминесценции L и параметров спектра кавитационного шума:
1 – L ; 2 – H ; a – интенсивность первой субгармоники; b – суммарная интенсивность всех субгармоник;
 c – интенсивность непрерывной составляющей спектра кавитационного шума

Fig. 4. Correlation of sonoluminescence intensity L and cavitation noise spectrum parameters:
1 – L ; 2 – H ; a – intensity of the first subharmonic; b – total intensity of all subharmonics;
 c – intensity of the continuous component of the cavitation noise spectrum

Из представленных в табл. 1 параметров однозначную связь с интенсивностью ЗЛ показали полная интенсивность КШ без первых трех гармоник и интенсивность КШ без всех гармоник и субгармоник (рис. 4, *c*). Последний параметр представляет собой интегральную интенсивность НСКШ. Высокая степень корреляции НСКШ и ЗЛ подтверждает гипотезу, в соответствии с которой генерирование НСКШ происходит вследствие захлопывания кавитационных полостей, и поэтому может использоваться в качестве индикатора уровня активности нестационарной кавитации. В [20] анализ механизма генерирования НСКШ выполнен путем моделирования возможных искажений (возмущений) исходного синусоидального УЗ-поля, вносимых кавитационными полостями. Использовался следующий алгоритм моделирования КШ. В докавитационном режиме давление в звуковом поле считается изменяющимся по синусоидальному закону. При возникновении кавитации на исходный синусоидальный сигнал накладываются акустические возмущения. Вид результирующего возмущения выбирается исходя из известных закономерностей динамики отдельных пузырьков и кавитационной области в целом. Сформированный таким способом сигнал в цифровом представлении подвергается спектральному анализу методом преобразования Фурье.

В качестве первого приближения рассмотрен случай единичного пузырька в сферически симметричном фокусированном УЗ-поле. Этот случай реализуется в экспериментах с однопузырьковой сонолюминесценцией (ОПЗЛ) [2]. В такой системе быстрое сжатие пузырька (захлопывание) происходит в конце первой или в начале второй половины полупериода сжатия ультразвуковой волны. Процесс повторяется в каждом периоде в одной и той же фазе с высокой степенью периодичности и сопровождается синхронным генерированием акустического импульса и вспышки света. Результирующий акустический сигнал представлен на рис. 5, *a* при $f_0 = 35$ кГц и амплитуде периодического импульса $0,9P_a$. Спектр включает основную частоту f_0 и гармоники nf_0 . Непрерывная составляющая отсутствует (рис. 5, *b*). Известно [2], что при увеличении амплитуды звукового давления P_a более $1,5P_0$ (где P_0 – гидростатическое давление) однопузырьковая система переходит в режим неустойчивого генерирования ЗЛ. Пузырек при этом неустойчив и хаотически колеблется в пространстве вблизи точки максимального давления. Фаза пульсаций такого пузырька варьируется стохастически около некоторого среднего положения относительно фазы волны.

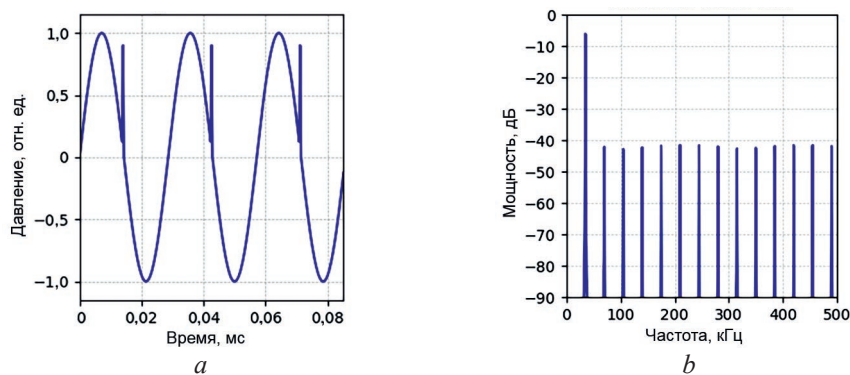


Рис. 5. Акустический сигнал и его спектр

для случаев периодического импульсного возмущения синусоидального сигнала

Fig. 5. Acoustic signal and its spectrum for the case of periodic pulsed disturbance of a sinusoidal signal

При моделировании соответствующего акустического сигнала для каждого последовательного периода ультразвука задавалось смещение генерируемого пузырьком импульса Δt от среднего положения, варьируемое случайным образом с ограничением максимальной величины Δt^* . Спектр такого сигнала представлен на рис. 6, *a* для $f_0 = 35$ кГц, амплитуды аperiodического импульса $0,3P_a$, $\Delta t^* = 0,1T_0$ ($T_0 = 1/f_0$). Таким образом, источником непрерывной составляющей могут быть не только ударные волны, генерируемые при захлопывании пузырька, но и аperiodичность следования импульсов. С ростом аperiodичности увеличивается и интенсивность НСКШ. В многопузырьковой кавитационной области суммарный акустический сигнал в любой заданной достаточно малой области поля, где находится датчик, формируется из возмущений, генерируемых не только близлежащими пузырьками, но также и находящимися на значительном удалении. Импульсы от удаленных пузырьков в данную точку будут приходить с некоторой задержкой во времени по отношению к моменту захлопывания.

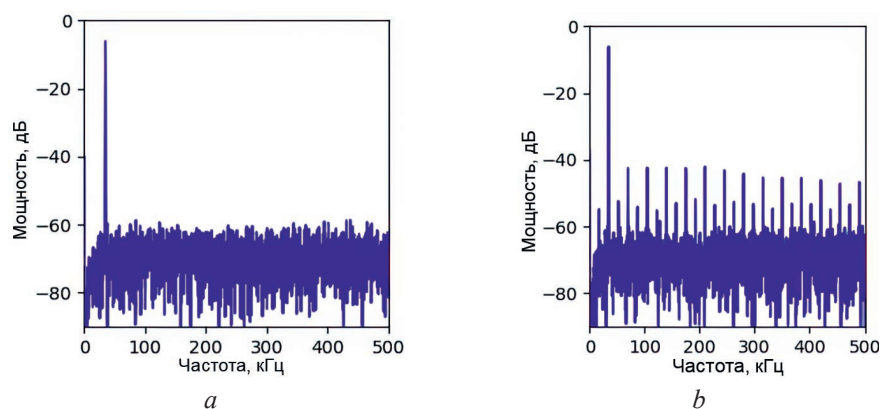


Рис. 6. Спектры результирующих сигналов для режимов однопузырьковой сонолюминесценции (а) и многопузырьковой кавитационной области (b)

Fig. 6. Spectra of the resulting signals for the single-bubble sonoluminescence (a) and multi-bubble cavitation region (b) modes

Кавитационная область, как известно, включает пузырьки разных размеров, и распределение по размерам может меняться от периода к периоду. Учитывая изложенное, логично предположить, что результирующее акустическое возмущение, генерируемое многопузырьковой кавитационной областью в заданной точке поля, не может быть строго периодическим. Такое возмущение в [20] моделировали в виде последовательных импульсов, интенсивность и фаза которых варьировались случайным образом в некотором заданном диапазоне величин. Спектр результирующего сигнала включает основную частоту и непрерывную составляющую.

Распределение пузырьков по размерам в кавитационной области имеет вид кривой с максимумом [1]. При этом наибольшее количество пузырьков (более 50 %) сосредоточено в узком диапазоне размеров. Ясно, что пузырьки из этого диапазона будут захлопываться с незначительной задержкой друг относительно друга, формируя при этом квазипериодический импульс, т. е. импульс, фаза которого хаотически варьируется вблизи некоторого положения относительно фазы волны. Спектр результирующего сигнала (рис. 6, b) включает основную частоту, гармоники и непрерывную составляющую, т. е. по составу аналогичен регистрируемым экспериментально спектрам [3, 14]. В [21] выявлена линейная связь между гармониками основной частоты, непрерывной составляющей спектра и интегральной мощностью кавитационного шума в исследуемом частотном диапазоне. Отсутствие связи (или слабая связь) данных компонент с частотой УЗ-поля указывает на то, что эти составляющие не являются прямыми производными частоты поля, т. е. не возникают, например, вследствие нелинейных искажений волны, а генерируются пузырьками, динамика которых не связана линейно с вариациями давления в поле.

Кавитация в импульсных ультразвуковых полях

При увеличении интенсивности УЗ выше порога кавитации увеличивается концентрация пузырьков в кавитационной области, соответственно растет активность кавитации как в целом в объеме жидкости, так и в любой точке. Однако, с другой стороны, с ростом концентрации пузырьков на пути звуковой волны увеличивается поглощение УЗ в кавитационной области. Кроме того, ухудшаются условия передачи энергии от излучателя в жидкость вследствие уменьшения ее волнового сопротивления. Это приводит к тому, что, начиная с некоторой амплитуды колебаний излучателя A , в любой заданной точке звукового поля, несмотря на увеличение A (или излучаемой мощности), активность кавитации достигает максимума и затем либо мало меняется с увеличением излучаемой мощности [7, 17, 19, 22], либо начинает уменьшаться.

В ходе исследований зависимости активности кавитации от параметров поля и свойств жидкости в импульсных УЗ-полях установлена неизвестная ранее связь между порогом кавитации и ее активностью. Активность кавитации оценивалась по интенсивности ЗЛ. Исследовались зависимости интенсивности ЗЛ от напряжения U , приложенного к излучателю, при котором возникает кавитация. Значения максимальной интенсивности ЗЛ, полученные при варьировании напряжения на излучателе (амплитудное значение) в диапазоне 0–250 В, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Максимальная интенсивность звуколюминесценции и пороговые давления ультразвука для различных жидкостей

Table 2. Maximum sonoluminescence intensity and ultrasound threshold pressures for various liquids

Параметр / Parameter	Жидкость / Liquid						
	1	2	3	4	5	6	7
P_{th} , атм	8,3	5,5	4,3	3,1	2,5	1,5	1,9
L_{max} , мВ	1380	790	420	109	46	19	8
U_{th} , В	87,9	59,7	46,7	33,7	22,8	16,3	15,0

Обозначения: 1, 2 – раствор NaCl 270 и 100 г/л соответственно; 3 – дистиллированная вода; 4 – хлорбензин; 5 – бензин; 6 – этиловый спирт; 7 – ацетон.

Примечание – Порог кавитации в данной серии экспериментов определялся по возникновению высокочастотного кавитационного шума с помощью кавитометра ICA-4D при скорости увеличения напряжения на излучателе 5 В/с, $T = 30$ мс, $\tau = 3$ мс, $q = 25$ °С.

Как видно из табл. 2, чем выше порог, тем выше максимальная активность кавитации. Зависимости, полученные для различных режимов УЗ-воздействия, подчиняются такой же закономерности. Исходя из данного анализа и экспериментальных результатов, представленных выше и в [7, 17, 19], сформулировано следующее утверждение (теорема о максимуме активности кавитации): максимум активности кавитации в многопузырьковой кавитационной области, достигаемый при варьировании излучаемой мощности УЗ в достаточно широких пределах, всегда выше в тех жидкостях и для тех параметров УЗ-воздействия, в которых для генерирования кавитации требуется более высокая интенсивность УЗ, т. е. в которых выше порог кавитации.

Использование этого результата облегчает задачу оптимизации воздействия УЗ на физико-химические процессы в жидкостях, выбора или синтеза жидкостей с наиболее высокой активностью кавитации. Для управления активностью кавитации и динамикой развития кавитационной области предлагается использовать импульсное модулирование УЗ-поля [12, 17]. Установлено, что зависимости интенсивности ЗЛ от скважности импульсов имеют вид кривых с максимумом. С ростом интенсивности УЗ максимум L смещается в сторону больших скважностей. Следует отметить, что спектральные характеристики КШ в импульсном поле меняются при увеличении скважности импульсов. Это указывает на изменение распределения по размерам пузырьков в кавитационной области. В частности, при больших скважностях в спектре КШ отсутствует субгармоника [18], которую обычно считают признаком наличия в кавитационной области пузырьков с размерами больше резонансного.

Кавитация при взаимодействии сильно различающихся по частоте ультразвуковых полей

Исследованы закономерности генерирования ЗЛ при взаимодействии сильно различающихся по частоте УЗ-полей [23]. На рис. 7, а, б представлен пример синхронной регистрации выходных сигналов гидрофона H и фотомножителя L при взаимодействии НЧ- и ВЧ-полей. Данные для рис. 7: длительность импульсов ВЧ-поля $\tau = 2$ мс; период следования импульсов $T = 300$ мс; напряжение на излучателе 135 В; амплитуда колебаний НЧ-излучателя 8 мкм. Время работы ВЧ- и НЧ-излучателей отмечено в нижней части рис. 7 закрашенными участками соответственно верхней и нижней полос.

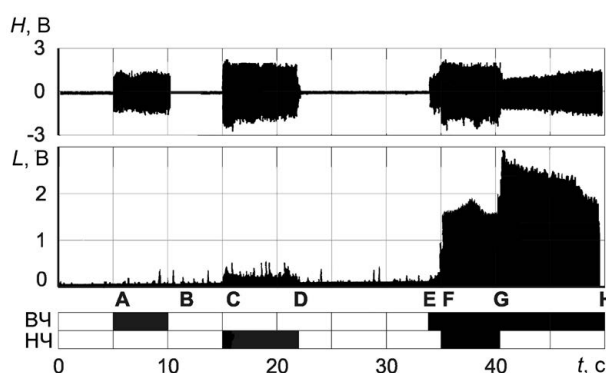


Рис. 7. Временные осциллограммы выходных сигналов гидрофона H (а) и фотомножителя L (б)
Fig. 7. Time oscillograms of the output signals of hydrophone H (a) and photomultiplier L (b)

Режимы работы ВЧ- и НЧ-излучателей в данном примере таковы, что интенсивность ЗЛ при работе каждого из них отдельно (рис. 7, участки АВ и CD соответственно) незначительно превышает уровень фоновых импульсов. При совместной работе излучателей (участок FG) суммарный эффект более чем в 10 раз превосходит сумму эффектов, вызываемых отдельно НЧ- и ВЧ-полями. Установлено, что при интенсивностях НЧ-поля, превышающих пороги кавитации, основным механизмом усиления ЗЛ является генерирование зародышей кавитации НЧ при их коллапсе. Механизмы усиления ЗЛ, связанные с непосредственным взаимодействием полей [24], реализуются, если только оба поля включены. Тот факт, что в момент отключения НЧ-поля интенсивность ЗЛ не падает мгновенно (рис. 7, *b*, участок GH), а плавно уменьшается, позволяет считать, что вклад данных механизмов в исследуемый эффект незначителен и основным фактором является, скорее всего, генерирование новых зародышей кавитации при захлопывании пузырьков. Таким образом, неаддитивное усиление ЗЛ (синергизм) имеет место не только при одновременном воздействии полей на жидкость, но также и в ВЧ-поле после предварительного озвучивания жидкости НЧ-полем, т. е. обнаружен эффект длительного последействия НЧ-поля на кавитацию.

Практическая реализация результатов исследований и перспективы их развития

Представленные результаты фундаментальных исследований использованы при создании оборудования для исследования кавитации, измерения уровня ее активности и генерирования мощного УЗ в жидкостях и жидкообразных средах. С использованием этих результатов совершенствуется программное обеспечение, которым комплектуются разрабатываемые приборы [25]. Созданы новые образцы УЗ-оборудования, внедренные на предприятиях Беларуси и поставляющиеся в страны ближнего и дальнего зарубежья. Среди них можно отметить прибор для исследования кавитации в низкочастотных УЗ-полях – кавитометр, по ряду параметров превосходящий лучшие мировые образцы, что подтверждается поставками в Россию, Китай, страны Евросоюза, США и Южную Корею. Для испытаний кавитометров и датчиков кавитации создан ультразвуковой кавитационный комплекс, который может использоваться также для оптимизации режимов работы УЗ-оборудования. На рис. 8 представлены образцы приборов: стационарный ICA-3M (*a*) и переносной ICA-4D (*b*) кавитометры, переносной кавитометр ICA-5DM (*c*) с USB выходом и программой обработки данных.

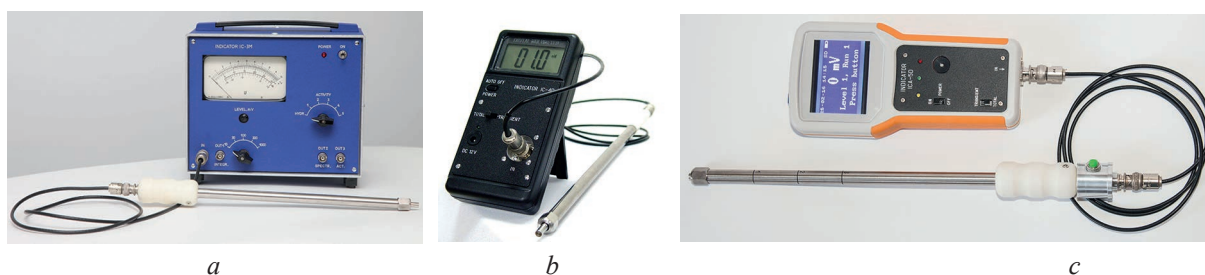


Рис. 8. Общий вид базовых образцов ультразвукового оборудования
Fig. 8. General view of basic samples of ultrasonic equipment

Одна из наиболее важных задач в области фундаментальных исследований – разработка физических основ метрологического обеспечения измерений активности кавитации и создание эталона кавитации. Ее решение является необходимым условием стандартизации измерений и введения единицы активности кавитации, что позволит закрепить лидирующее положение белорусских ученых в этой области. В ближайшее время планируется совершенствовать и создавать новые образцы датчиков и приборов для исследования кавитации. В рамках ГНТП «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование» будет создан новый спектрально-акустический индикатор кавитации (планируемое название – ИКА-С). Прибор впервые обеспечит возможность синхронной регистрации активности кавитации в различных частотных диапазонах и будет оснащен системой позиционирования датчика в звуковом поле.

Перспективным направлением является разработка специализированных датчиков кавитации и кавитометров для применения в медико-биологических исследованиях. Кроме того, планируется разработка специализированных излучателей и генераторов для ультразвуковой обработки

суспензий наночастиц во взаимодействующих НЧ и ВЧ УЗ-полях, для интенсификации процессов гальванической обработки и повышения качества получаемых покрытий и пленок, для прецизионной УЗ-очистки в технологических процессах микроэлектроники.

Заключение

1. Представлены результаты исследований кавитации, выполненных в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники и направленных на создание методов и приборов для мониторинга кавитации и управления ее активностью.

2. Показано, что кавитационная область проходит четыре стадии развития при увеличении интенсивности ультразвука, а импульсное модулирование ультразвукового поля позволяет управлять активностью кавитации; сформулирована теорема о максимуме активности кавитации; установлены спектральные характеристики кавитационного шума, коррелирующие с интенсивностью звуколюминесценции.

3. На основании полученных данных разработаны новые методы и приборы для исследования кавитации и управления ее активностью. По ряду параметров созданное оборудование превосходит лучшие мировые образцы, что подтверждается поставками в Россию, страны Евросоюза, Китай, США и Южную Корею.

Список литературы

1. Сиротюк, М. Г. Акустическая кавитация / М. Г. Сиротюк. М.: Наука, 2008.
2. Brenner, M. P. Single-Bubble Sonoluminescence / M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse // *Rev. Mod. Phys.* 2002. Vol. 74. P. 65–144.
3. Sonoluminescence and Acoustic Emission Spectra at Different Stages of Cavitation Zone Development / N. V. Dezhkunov [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 40, No 1. P. 104–109.
4. Dynamic Behavior of Polymer Microbubbles During Long Ultrasound Tone-Burst Excitation and Its Application for Sonoreperfusion Therapy / Xianghui Chen [et al.] // *Ultrasound Med Biol*. 2023. Vol. 49. P. 996–1006.
5. Дежкунов, Н. В. Исследование связи звуколюминесценции и ультразвукового капиллярного эффекта / Н. В. Дежкунов, Т. Г. Лейтон // *Инженерно-физический журнал*. 2004. Т. 77, № 1. С. 45–51.
6. Кавитация в водных растворах углекислого газа / А. В. Котухов [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. 2019. Т. 41, № 4. С. 35–41.
7. Characterization of Transient Cavitation Activity During Sonochemical Modification of Magnesium Particles / N. Brezhneva [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 70, No 3–4.
8. Протопович, Е. Л. Противоопухольевая эффективность сонодинамической терапии с фотосенсибилизатором хлоринового ряда в эксперименте / Е. Л. Протопович, Д. А. Церковский // *Российский биотерапевтический журнал*. 2022. Т. 21, № 1. С. 68–75.
9. Физический механизм терапевтического эффекта ультразвука / М. Р. Бэйли [и др.] // *Акустический журнал*. 2003. Т. 49, № 4. С. 369–388.
10. Burgess, M. T. Control of Acoustic Cavitation for Efficient Sonoporation with Phase-Shift Nanoemulsions / M. T. Burgess, T. M. Porter // *Ultrasound in Medicine and Biology*. 2019. Vol. 45, No 3. P. 846–858. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.
11. Direct Evidence of Multibubble Sonoluminescence Using Therapeutic Ultrasound and Microbubbles / E. Beguin [et al.] // *ACS Appl. Mat. Interfaces*. 2019. Vol. 11, No 22. P. 19913–19919.
12. Insight into Ultrasound-Mediated Reactive Oxygen Species Generation by Various Metal-Porphyrin Complexes / F. Giuntini [et al.] // *Free Radic. Biol. Med.* 2018. Vol. 121, No 1. P. 109–121.
13. Влияние импульсного модулирования ультразвукового поля на динамику развития кавитационной области и активность кавитации / Н. В. Дежкунов [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2012. № 2. С. 92–98.
14. Комбинированный метод исследования акустической кавитации / А. В. Котухов [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2020. Т. 18, № 4. С. 80–88. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88>.
15. Исследование корреляции звуколюминесценции и кавитационного шума в поле фокусирующего излучателя / А. В. Котухов [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. 2020. Т. 45, № 4. С. 32–36.
16. Наблюдение кавитационного шума без субгармоники / А. В. Котухов [и др.] // *Письма в Журнал технической физики*. 2023. Т. 49, № 6. С. 39–42.
17. Кавитация в импульсных ультразвуковых полях / Н. В. Дежкунов [и др.] // *Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: матер. IV Междунар. науч. конф., г. Витебск, 29–31 марта 2023 г. Минск: ИВЦ Минфина, 2023. С. 149–151.*
18. Звуколюминесценция и спектральные характеристики кавитационного шума в фокусированном ультразвуковом поле / В. С. Гаврилюк [и др.] // *Сб. тр. 34-й сессии Рос. акуст. общ., г. Москва, 14–18 февраля 2022 г. М.: ГЕОС, 2022. С. 1073–1080.*

19. Дежкунов, Н. В. Связь порога кавитации и максимальной интенсивности звуколюминесценции / Н. В. Дежкунов // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т. 34, № 8. С. 59–67.
20. Анализ механизма генерирования непрерывной составляющей кавитационного шума / Н. В. Дежкунов [и др.] // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50, № 6. С. 7–10.
21. Исследование взаимной корреляции спектральных составляющих кавитационного шума / В. С. Минчук [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. 2023. Т. 56, № 3. С. 69–74.
22. Сравнение методов оценки активности кавитации / Н. А. Жарко [и др.] // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: матер. IV Междунар. науч. конф., г. Витебск, 29–31 марта 2023 г. Минск: ИВЦ Минфина, 2023. С. 88–90.
23. Механизмы усиления звуколюминесценции во взаимодействующих ультразвуковых полях / А. В. Котухов [и др.] // Сб. тр. 34-й сессии Рос. акуст. общ., г. Москва, 14–18 февраля 2022 г. М.: ГЕОС. С. 1005–1010.
24. Дежкунов, Н. В. Механизмы усиления звуколюминесценции при взаимодействии сильно различающихся по частоте ультразвуковых полей / Н. В. Дежкунов // Сборник «Двадцать конкурсных лет». Минск: Беларус. навука, 2012. С. 133–146.
25. Cavitation [Электронный ресурс] // Исследования, технологии приборы, оборудование. Режим доступа: <https://cavitation.bsuir.by/ru/kavitometr>. Дата доступа: 11.02.2024.

References

1. Sirotyuk M. G. (2008) *Acoustic Cavitation*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
2. Brenner M. P., Hilgenfeldt S., Lohse D. (2002) Single-Bubble Sonoluminescence. *Rev. Mod. Phys.* 74, 65–144.
3. Dezhkunov N. V., Fransecutto A., Serpe L., Canaparo R., Cravotto G. (2018) Sonoluminescence and Acoustic Emission Spectra at Different Stages of Cavitation Zone Development. *Ultrasonics Sonochemistry*. 40 (1), 104–109.
4. Xianghui Chen, Xucui Chen, Jianjun Wang, Francois T. H. Yu, Flordeliza S. Villanueva, John J. Pacella (2023) Dynamic Behavior of Polymer Microbubbles During Long Ultrasound Tone-Burst Excitation and Its Application for Sonoreperfusion Therapy. *Ultrasound Med. Biol.* 49, 996–1006.
5. Dezhkunov N. V., Leighton T. G. (2004) Study of the Connection Between Sonoluminescence and Ultrasonic Capillary Effect. *Engineering and Physics Journal*. 77 (1), 45–51 (in Russian).
6. Kotukhov A. V., Zharko N. A., Minchuk V. S., Dezhkunov N. V. (2019) Cavitation in Aqueous Solutions of Carbon Dioxide. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 41 (4), 35–41 (in Russian).
7. Brezhneva N., Dezhkunov N. V., Ulasevich S. A., Skorb E. V. (2021) Characterization of Transient Cavitation Activity During Sonochemical Modification of Magnesium Particles. *Ultrasonics Sonochemistry*. 70 (3–4).
8. Protopovich E. L., Tzerkovsky D. A. (2022) Antitumor Efficiency of Sonodynamic Therapy in Combination with Chlorine-Based Photosensitizer in Experiments. *Russian Journal of Biotherapy*. 21 (1), 68–75 (in Russian).
9. Bailey M. R., Kargl S. G., Crum L. A., Khokhlova V. A., Sapozhnikov O. A. (2003) Physical Mechanisms of the Therapeutic Effect of Ultrasound. *Acoustical Physics*. 49 (4), 369–388 (in Russian).
10. Burgess M. T., Porter T. M. (2019) Control of Acoustic Cavitation for Efficient Sonoporation with Phase-Shift Nanoemulsions. *Ultrasound in Medicine and Biology*. 45 (3), 846–858. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.
11. Beguin E., Shrivastava S., Dezhkunov N. V., McHale A. P., Callan J. F., Stride E. (2019) Direct Evidence of Multibubble Sonoluminescence Using Therapeutic Ultrasound and Microbubbles. *ACS Appl. Mat. Interfaces*. 11 (22), 19913–19919.
12. Giuntini F., Foglietta F., Marucco A. M., Troia A., Dezhkunov N. V., Pozzoli A., et al. (2018) Insight into Ultrasound-Mediated Reactive Oxygen Species Generation by Various Metal-Porphyrin Complexes. *Free Radic. Biol. Med.* 121 (1), 109–121.
13. Dezhkunov N. V., Kotukhov A. V., Stoler V. A., Koltovich V. A., Nikolaev A. L. (2012) The Influence of Pulse Modulation of an Ultrasound Field on the Dynamics of Cavitation Zone Development and on Cavitation Activity. *Doklady BGUIR*. (2), 92–98 (in Russian).
14. Kotukhov A. V., Gavriluk V. S., Minchuk V. S., Dezhkunov N. V. (2020) Combined Method for Acoustic Cavitation Research. *Doklady BGUIR*. 18 (4), 80–88. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88> (in Russian).
15. Kotukhov A. V., Gavriluk V. S., Zharko N. A., Minchuk V. S., Dezhkunov N. V. (2020) Investigation of the Correlation Between Sound Luminescence and Cavitation Noise in the Field of a Focusing Emitter. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 45 (4), 32–36 (in Russian).
16. Kotukhov A. V., Efremov D. V., Bannikova I. A., Bayandin Yu. V., Uvarov S. V., Naimark O. B., et al. (2023) Observation of Cavitation Noise Without Subharmonics. *Technical Physics Letters*. 49 (6), 39–42 (in Russian).
17. Dezhkunov N. V., Rubanik V. V., Naimark O. B., Minchuk V. S. (2023) Cavitation in Pulsed Ultrasonic Fields. *Technical Acoustics: Developments, Problems, Prospects, Materials of the IV International Scientific Conference, Vitebsk, March 29–31*. Minsk, Information and Computing Center of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus. 149–151 (in Russian).

18. Gavrilyuk V. S., Minchuk V. S., Zharko N. A., Nikolaev A. L., Dezhkunov N. V. (2022) Sonoluminescence and Spectral Characteristics of Cavitation Noise in a Focused Ultrasonic Field. *Collection of Proceedings of the 34th Session of the Russian Acoustical Society, Moscow, Febr. 14–18*. Moscow, GEOS Publ. 1073–1080 (in Russian).
19. Dezhkunov N. V. (2008) Relationship Between the Cavitation Threshold and the Maximum Dose of Sonoluminescence. *Technical Physics Letters*. 34 (8), 59–67 (in Russian).
20. Dezhkunov N. V., Minchuk V. S., Uvarov S. V., Kurlyuk E. A. (2024) Analysis of the Mechanism for Generating a Continuous Component of Cavitation Noise. *Letters to the Technical Physics*. 50 (6), 7–10 (in Russian).
21. Minchuk V. S., Perkhunova A. Yu., Gavrilyuk V. A., Dezhkunov N. V. (2023) Investigation of the Cross-Correlation of Spectral Components of Cavitation Noise. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 56 (3), 69–74 (in Russian).
22. Zharko N. A., Minchuk V. S., Nikolaev A. L., Dezhkunov N. V. (2023) Comparison of Methods for Assessing Cavitation Activity. *Technical Acoustics: Developments, Problems, Prospects, Materials of the IV International Scientific Conference, Vitebsk, March 29–31*. Minsk, Information and Computing Center of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus. 88–90 (in Russian).
23. Kotukhov A. V., Minchuk V. S., Perkhunova A. Yu., Nikolaev A. L., Dezhkunov N. V. (2022) Mechanisms of Amplification of Sonoluminescence in Interacting Ultrasonic Fields. *Collection of Proceedings of the 34th Session of the Russian Acoustical Society, Moscow, Febr. 14–18*. Moscow, GEOS Publ. 1073–1080 (in Russian).
24. Dezhkunov N. V. (2012) Mechanisms of Amplification of Sonoluminescence During the Interaction of Ultrasonic Fields of Very Different Frequencies. *Collection “Twenty Competitive Years”*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 133–146 (in Russian).
25. Cavitation (2024) *Research, Technology, Devices, Equipment*. Available: <https://cavitation.bsuir.by/ru/kavitometr> (Accessed 11 February 2024).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Гаврилюк В. С., инж.-програм. науч.-исслед. лаб. «Ультразвуковые технологии и оборудование» (НИЛ 5.2) НИЧ, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Дежкунов Н. В., канд. техн. наук, доц., зав. НИЛ 5.2 НИЧ, БГУИР

Котухов А. В., зам. декана факультета компьютерного проектирования, БГУИР

Колтович В. А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НИЛ 5.2 НИЧ, БГУИР

Минчук В. С., мл. науч. сотр. НИЛ 5.2 НИЧ, БГУИР

Федоринчик М. П., науч. сотр. НИЛ 5.2 НИЧ, БГУИР

Курлюк Е. А., оператор ПЭВМ НИЛ 5.2 НИЧ, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-35
E-mail: dnv@bsuir.by
Дежкунов Николай Васильевич

Information about the authors

Gavriluk V. S., Software Engineer at the Scientific Research Laboratory “Ultrasound Technologies and Equipment” (Lab. 5.2) of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Dezhkunov N. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Lab. 5.2 of R&D Department, BSUIR

Kotukhov A. V., Deputy Dean of the Faculty of Computer-Aided Design, BSUIR

Koltovich V. A., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Lab. 5.2 of R&D Department, BSUIR

Minchuk V. S., Junior Researcher at the Lab. 5.2 of R&D Department, BSUIR

Fedorinchik M. P., Researcher at the Lab. 5.2 of R&D Department, BSUIR

Kurliuk E. A., PC Operator at the Lab. 5.2 of R&D Department, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-86-35
E-mail: dnv@bsuir.by
Dezhkunov Nikolai Vasilievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-105-115>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 615.47

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ МЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В. М. БОНДАРИК, М. И. ВАШКЕВИЧ, М. В. ДАВЫДОВ, Н. С. ДАВЫДОВА,
О. Б. ЗЕЛЬМАНСКИЙ, П. В. КАМЛАЧ, М. М. МЕЖЕННАЯ, А. Н. ОСИПОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 21.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Дан краткий обзор результатов работ по направлению «Приборы, системы и технологии медицинского назначения», полученных с непосредственным участием авторов статьи. Изложены результаты разработки и исследования в области моделирования воздействия физических факторов на организм человека и цифровой обработки биомедицинских сигналов. Приведены принципиальные аспекты оригинальных систем длительного мониторинга состояния человека и контроля опорно-двигательного аппарата.

Ключевые слова: системы длительного мониторинга, цифровая обработка биомедицинских сигналов, моделирование, методы и устройства воздействия на организм человека.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Методы проектирования приборов и систем медицинской электроники / В. М. Бондарик [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 105–115. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-105-115>.

METHODS FOR DESIGNING DEVICES AND SYSTEMS OF MEDICAL ELECTRONICS

VASILY M. BANDARYK, MAKSIM I. VASHKEVICH, MAKSIM V. DAVYDOV,
NADEZHDA S. DAVYDOVA, OLEG B. ZELMANSKI, PAVEL V. KAMLACH,
MARINA M. MEZHENNAYA, ANATOLIY N. OSIPOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 21.02.2024

Abstract. A brief overview of the results of work in the field of “Devices, systems and technologies for medical purposes”, obtained with the direct participation of the authors of the article, is given. The results of the development and research in the field of modeling the effects of physical factors on the human body and digital processing of biomedical signals are presented. The principal aspects of the original systems of long-term monitoring of the human condition and control of the musculoskeletal system are presented.

Keywords: long-term monitoring systems, digital processing of biomedical signals, modeling, methods and devices for influencing the human body.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation. Bandaryk V. M., Vashkevich M. I., Davydov M. V., Davydova N. S., Zelmanski O. B., Kamlach P. V., Mezhenaya M. M., Osipov A. N. (2024) Methods for Designing Devices and Systems of Medical Electronics. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 105–115. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-105-115> (in Russian).

Введение

Научное направление «Медицинская электроника» начало интенсивно развиваться в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники (БГУИР) с открытием в 1995 г. на кафедре электронной техники и технологии подготовки инженеров по специальности «Медицинская электроника». Ряд устройств и программных средств, разработанных в университете, были внедрены в клиническую практику. Университет совместно с организациями здравоохранения, Белорусской медицинской академией последипломного образования, Белорусским государственным медицинским университетом, начиная с 2002 г., явился организатором регулярной Международной научно-технической конференции «Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии». В исследованиях, проводимых в БГУИР, по различным аспектам теории и практики проектирования электронных медицинских аппаратов, систем и комплексов принимали участие сотрудники университета: академик А. П. Достанко; доктора медицинских наук, профессора Л. М. Лыньков и Т. В. Борботько; доценты А. Н. Осипов, С. К. Дик, М. В. Давыдов, В. М. Бондарик, П. В. Камлач, Н. С. Давыдова, М. М. Меженная, О. В. Бойправ и многие другие, а также ведущие специалисты здравоохранения – академики В. С. Улащик и В. А. Кульчицкий; лауреат Государственной премии Республики Беларусь Э. С. Кашицкий; доктора медицинских наук, профессора В. П. Сиваков и С. А. Лихачев. В 2021 г. открыта отраслевая лаборатория «Приборы, системы и технологии медицинского назначения» (научный руководитель – А. Н. Осипов).

Новый этап развития данного направления связан, с одной стороны, с обострением мировой проблемы охраны здоровья – ростом продолжительности жизни в развитых странах и демографическим взрывом в странах третьего мира, ограниченными кадровыми ресурсами здравоохранения, увеличением уровня доходов и более высоким уровнем жизни, обострением экологической ситуации и глобальной пандемией, вызванной коронавирусом COVID-19. С другой стороны, этому способствовало развитие информационно-коммуникационных технологий, основанных на технологиях 5G, анализа больших данных, искусственного интеллекта и интернета вещей, что предоставляет обширные возможности для развития медико-технического оснащения здравоохранения. Цифровое (электронное) здравоохранение должно охватить первичную и скорую помощь, профилактику заболеваний и стационарное лечение, лекарственное обеспечение, повышение информированности граждан, подготовку врачей, научную деятельность и управление отраслью. В связи с этим в статье представлены результаты исследований специалистов БГУИР, полученные за период 2011–2024 гг., по разработке методов и средств цифровой медицинской электроники.

Системы длительного дистанционного мониторинга жизненных параметров человека на основе беспроводных нательных сетей

В триаду исследовательских приоритетов, значимых для электронного здравоохранения, входят программно-аппаратные носимые медицинские электронные средства. Такие устройства используются для мониторинга, анализа и регистрации метаболических изменений в организме и позволяют измерять температуру тела, артериальное давление, частоту сердечбиения, отслеживать состояние организма во время сна и т. д. Одним из катализаторов расширения рынка носимой электроники специалисты считают сахарный диабет, который требует постоянного контроля. По данным Международной федерации диабета (IDF), в 2019 г. этой болезнью страдали 463 млн человек по всему миру, или 9,3 % населения планеты. Ожидается, что к 2030-му данный показатель увеличится до 10,2 %. В связи с этим значительный интерес направлен на разработку систем мониторинга жизненно важных (витальных) параметров, позволяющих решить следующие задачи: регистрация сигналов биомедицинской информации, идентификация предкризовых и критических состояний (гипертонический криз, инфаркт миокарда, нарушение сердечного ритма, инсульт, сахарная кома, внезапная сердечная смерть и т. д.) и выработка тревожной сигнализации как для пациента, так и для медицинского персонала с целью принятия неотложных мер.

Архитектура прототипа системы длительного мониторинга, разработанная в БГУИР, имеет трехуровневую систему, включающую датчики биомедицинских сигналов (биосенсоры) и носимый мобильный блок (первый уровень). В качестве шлюзового устройства связи (второй уровень) между сенсорной сетью и сетью третьего уровня используется смартфон. Сеть третьего

уровня обеспечивает хранение и обработку данных, коммуникацию с различными пользователями (больницей, скорой помощью, врачами, близкими родственниками, аптеками и т. д.).

В [1] контроль параметров исследуемых сигналов предложено осуществлять на основе регистрации и реагирования процессов, характерных для танатогенеза. Такой подход позволяет исключить проблему определения индивидуальных порогов предкризовых состояний пациента. Кроме того, в [1] сформулированы и реализованы в разработанной системе принципы проектирования систем дистанционного мониторинга, позволяющие обеспечить значительное снижение энергопотребления и объемов передаваемой и хранимой диагностической информации, увеличение длительности автономной работы носимых блоков, диагностической информации. Как следствие, повышаются быстродействие системы и оперативность разрешения медперсоналом критических ситуаций [2], а именно:

- 1) контроль и анализ параметров биосигналов, используемых для оценки состояния витальных функций, которые в крайне критических ситуациях отражают процесс танатогенеза;
- 2) выделение основных и дополнительных сигналов и, соответственно, параметров для анализа;
- 3) организация обратной связи путем формирования запроса к пациенту;
- 4) распределение функций мониторинга на различных уровнях с учетом вычислительных ресурсов системы.

В [3] описан алгоритм распознавания критических ситуаций состояния пациента. Регистрация и предварительная обработка контролируемых сигналов, вычисление на их основе диагностических параметров выполняются в носимом блоке в режиме реального времени со скоростью, сопоставимой с изменениями контролируемых физиологических процессов пациента. Контролируемые сигналы предлагается разделить на два типа – основные и дополнительные. Соответственно распознавание физиологического состояния человека выполняется в два этапа. Постоянно мониторятся основные биомедицинские сигналы. Если анализируемый параметр находится в норме, то система реагирует пассивно: с требуемой периодичностью информация пересылается на медицинский сервер хранения и обработки данных. При превышении пороговых значений параметров основных биосигналов выполняется второй этап распознавания степени критичности ситуации путем считывания и анализа дополнительных (коррелирующих) сигналов. Алгоритм предусматривает также организацию обратной связи: в автоматическом режиме формируются, при необходимости, запросы пациенту, с учетом ответа на которые (или отсутствия ответа) система корректирует уровень тревоги. С одной стороны, двухэтапный алгоритм позволяет повысить достоверность распознавания ситуации, классифицировать возникающие тревоги. С другой, это дает возможность снизить технические требования к системе – уменьшить скорость обмена данными между составными частями систем мониторинга, объем диагностической информации, хранимой в медицинском сервере, уменьшить вероятность ложных срабатываний. Таким образом, согласование вычислительных ресурсов, имеющихся на различных уровнях системы, со степенью сложности выполняемых функций обеспечивает повышение энергоэффективности и производительности систем мониторинга.

Цифровая обработка речевых сигналов в задачах детектирования, мониторинга и скрининга патологий голоса

Существует широкий спектр заболеваний, которые негативным образом влияют на состояние речевого аппарата человека и, в конечном итоге, ухудшают качество коммуникации, понижают уровень жизни. Сюда относятся дисфонии, дизартрии, охриплость, парезы и проч. Часто на голос оказывают влияние и неврологические заболевания: болезни Паркинсона и Альцгеймера, боковой амиотрофический склероз (БАС) и проч. Для проведения медицинской диагностики, своевременного выявления изменений голоса и речи требуются специальные инструментальные средства, основанные на акустическом анализе голосового сигнала. Обычно для проведения медицинского анализа голоса применяют специальные аппаратные комплексы, как, например, lingWAVES (Германия), который в настоящее время используется в РНПЦ оториноларингологии (г. Минск). Однако эти комплексы имеют высокую стоимость, требуют обученного персонала и дороги в обслуживании и ремонте. В настоящее время появляется все больше работ, в которых

указывается, что детектирование и скрининг голосовых патологий можно проводить с помощью обычного смартфона. Например, в [4] показано, что параметры голоса, полученные на основе сигналов, записанных смартфоном, могут быть использованы для скрининга голосовых патологий. Согласно исследованиям последних лет [5, 6], смартфон может применяться для детектирования речевых/голосовых аномалий (с точностью 90–94 %), связанных с развитием различных неврологических заболеваний. Типовая структура системы детектирования речевой патологии представлена на рис. 1.



Рис. 1. Система анализа и классификации для выявления патологии речи/голоса
Fig. 1. An analysis and classification system for detecting speech/voice pathology

Поступающий речевой/голосовой сигнал вначале предварительно обрабатывается, после чего из него выделяют информативные признаки. Далее вектор признаков попадает в блок классификации, который выдает вероятностную оценку отнесения вектора к одному из возможных классов. Блок принятия решения отвечает за присвоение метки класса полученному характеристическому вектору. Часто блок принятия решения является составной частью классификатора.

В период с 2019 по 2023 год сотрудники кафедры электронных вычислительных средств БГУИР активно работали над задачей детектирования неврологического заболевания БАС. За это время создан ряд методов и алгоритмов, которые относятся к этапам предобработки выделения признаков (рис. 1). Например, предложен метод сегментации голосового сигнала на периоды частоты основного тона, который использует информацию о контуре частоты основного тона. Применение такого метода сегментации позволяет более точно рассчитать параметры джиттера и шиммера голосового сигнала, что, в свою очередь, повысило точность детектирования заболевания. В [7] также предложен метод извлечения из голосового сигнала параметра патологичности вибрато, учитывающий особенности изменения голоса у пациентов с БАС. Использование данного параметра обеспечивает повышение точности классификации голосового сигнала.

В [8] предложен метод анализа модуляционного спектра звукового сигнала на основе неравнополосного банка фильтров с фазовым преобразованием, применение которого повышает правильность классификации патологии голосового аппарата по сравнению с общепринятым методом анализа на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с объединением энергий в субполосах. В [9] рассмотрен метод вычисления барк-частотных кепстральных коэффициентов (БЧКК) голосового сигнала, основанный на использовании неравнополосного ДПФ-модулированного банка фильтров, применение которого совместно с пертурбационными параметрами голоса позволяет строить эффективные системы классификации пациентов с заболеванием БАС. Точность системы классификации, использующей БЧКК, находится на уровне 96,7 %, что на 2,6 % больше, чем у систем, использующих признаки на основе широко применяемых мел-частотных кепстральных коэффициентов.

На базе представленных выше результатов сотрудниками кафедры электронных вычислительных средств разработано мобильное приложение ALS Expert [10], которое выполняет функции анализа голосового сигнала (вычисление пертурбационных параметров голоса и индекса патологичности вибрато) и предварительного детектирования наличия признаков заболевания БАС с использованием линейного дискриминантного анализа. Мобильное приложение тестировалось в РНПЦ неврологии и нейрохирургии. Предварительные результаты показали, что разработанная система обладает высокой эффективностью.

Разработка систем анализа голоса и речи продолжает оставаться актуальным направлением исследований и является частью так называемой цифровой медицины. В настоящее время для анализа и выявления патологических изменений наметился сдвиг в сторону применения методов на основе глубокого обучения, при этом методы статистического обучения также сохраняют свою актуальность, поскольку обладают важным качеством – интерпретируемостью. В свою очередь, перспективное направление – разработка интерпретируемых моделей глубокого обучения.

Физико-математическое моделирование энергетического воздействия на различные типы тканей организма

Проектированию современных приборов медицинского назначения должно предшествовать физико-математическое моделирование воздействия на различные типы тканей организма с учетом их свойств. Решению этой важной задачи во многом способствует использование современных систем программного обеспечения (ПО), которые задействуют различные модели при решении поставленных задач. Однако для их реализации следует знать о возможностях и об алгоритмах работы программных платформ, а также определить, какие физические формулы будут применяться [11].

Комплексная платформа моделирования Sim4Life представляет собой мощную среду 3D-проверенного биологического и анатомического моделирования для оптимизации эффективности и производительности медицинских устройств, повышения безопасности пациентов и поиска потенциальных новых методов лечения. Sim4Life включает в себя полноволновые решатели для электромагнетизма, квазистатические электромагнитные решатели, решатели термодинамики, решатели гидродинамики, решатели акустики, модели нейронной динамики.

В [12] предложена модель воздействия электромагнитного поля на биологические ткани. При моделировании рассчитаны параметры отклика в биологических тканях (амплитуда отклика в ткани и максимальное значение тока в ней) в платформе Sim4Life. С целью проверки математической модели был разработан лабораторный макет для измерений электрических характеристик биологической ткани. Исследования проводили с тремя образцами биологических тканей: соединительная ткань (жировая), мышечная ткань и кожа [13, 14]. Построены зависимости амплитуды отклика в биологических образцах от мощности выходного сигнала. Полученные результаты показывают возможность использования предложенного алгоритма в комплексе на ПО Sim4Life и моделирования электромагнитного поля с биологическим объектом, оптимальным для создания и экспертизы технологий и приборов электромагнитотерапии и индукторов экстракорпорального воздействия.

На платформе Sim4Life также разработана модель магнитотаргетинга лекарственных средств [15], которая позволяет производить точный расчет параметров электромагнитного поля лекарственными средствами с наночастицами ферромагнетика. Расчет показателя локального удельного коэффициента поглощения является наиболее важным при реализации магнитотаргетинга в практике. При вычислениях с наноструктурами с точки зрения классической электродинамики справедливо квазистатическое приближение. Получена альтернативная система зависимых от времени уравнений для поляризации заряда, поляризации тока и электрического поля. Поскольку вычисления необходимы для контроля транспорта наночастиц с ферромагнетиком в составе капсул, моделирование и расчеты для магнитотаргетинга необходимо проводить в нескольких точках транспорта лекарственных средств в проекции сосудов с помощью решателя LF – Magneto-Quasi-Static FDTD. Sim4Life позволяет моделировать различные типы источников (акустические, электромагнитные и др.), элементы приборов и реализовать возможности их применения на цифровых моделях экспериментальных животных и людей с базой данных всех электростатических и биоэлектрических характеристик тканей.

Методы и устройства сочетанного воздействия активирующих факторов различной физической природы с целью повышения эффективности физиотерапевтических процедур

В современной медицине все активнее применяются различные методы неинвазивного лечения без использования химических препаратов. Такие методы требуют наличия технического обеспечения лечебных процедур. Физиотерапевтические процедуры с применением лазерного излучения, поляризованного и неполяризованного света, магнитного поля, электрического тока, ультразвукового излучения, вибрационного воздействия и т. п. позволяют повысить эффективность и сократить сроки восстановления организма. Однако чрезвычайная сложность и высокая адаптивность человеческого организма со временем снижают эффективность физиотерапевтических процедур из-за наличия биологических обратных связей. Для повышения результативности физиотерапевтических процедур предложено использовать методы сочетанного воздействия активирующих факторов различной физической природы [11].

Совместное воздействие ультразвука и электрофореза на биологические ткани. Электрофорез позволяет свести к минимуму побочное действие лекарственного препарата, так как в ткани вводятся только необходимые его составляющие. Однако процедура электрофореза достаточно длительная (до 30 минут на одну процедуру, на курс лечения – до 30 процедур). Совместное воздействие ультразвука (УЗ) и электрофореза значительно ускоряет процесс введения лекарственного вещества, увеличивает глубину проникновения и тем самым повышает эффективность действия.

Предложена модель суммарного потока вводимого лекарственного вещества под сочетанным воздействием УЗ-энергии и электрического тока при допущении, что доля переноса лекарственных средств за счет диффузии составляет доли процента. Такое сочетанное воздействие увеличивает суммарный поток ионов лекарственного вещества в зоне взаимодействия, скорость и глубину диффузии. Проведены исследования, доказывающие, что при совместном воздействии УЗ и постоянного тока вводится большее количество действующего вещества (на 12–15 %) и на большую глубину, чем при обычном электрофорезе.

Сочетанное воздействие ультразвуковых и магнитных полей высокой интенсивности. Влияние сочетанного воздействия ультразвуковых и магнитных полей на организм человека позволяет улучшить кровообращение, обмен веществ, что повышает эффективность физиотерапевтических процедур и уменьшает их количество.

Предложена математическая модель влияния ультразвуковых и магнитных полей на скорость периферийного кровотока. Рассмотрен метод сочетанного воздействия ультразвуковых и магнитных полей высокой интенсивности, использование которого позволяет повысить скорость периферийного кровотока на 108–111 %. Однако практическому применению данного метода препятствует отсутствие аппаратов, способных воздействовать различными факторами. Поэтому представляется перспективной разработка оборудования для сочетанного воздействия ультразвуковыми и магнитными полями.

Сочетанное воздействие светотерапии и физических нагрузок высокой интенсивности на параметры физиотерапевтических процедур. В условиях высокого уровня конкуренции современных спортсменов остро стоит вопрос повышения эффективности восстановительного этапа подготовки как после ежедневного тренировочного цикла, так и в промежутке между физическими упражнениями в течение тренировки.

Предложен метод сочетанного воздействия светотерапии и физических нагрузок высокой интенсивности на восстановительный процесс дельтовидной мышцы человека [16]. Разработана методика исследования влияния светотерапии на эффективность физических нагрузок, включающая программу физических нагрузок, для дальнейшего исследования их влияния на электрические параметры тканей организма человека при сочетанном воздействии светотерапии. Установлено, что проведение процедур светотерапии оказывает существенное влияние на окислительно-восстановительные процессы внутри мышечной ткани, повышает выносливость и резистивность к нагрузкам после проведения высокоинтенсивных физических упражнений. Процедуры светотерапии положительно сказываются на электрических показателях дельтовидной мышцы испытуемых, полученных путем миографического исследования. Это доказывает перспективность совместного использования светотерапии с тренировками для ускорения восстановительного периода у спортсменов. Дополнительное применение процедур светотерапии во время тренировок поможет профессиональным спортсменам достигать более высоких спортивных результатов.

Системы структурно-функционального анализа и контроля опорно-двигательного аппарата человека

Структурно-функциональный анализ движений человека. Структурная и функциональная диагностика двигательных действий человека востребована не только в области двигательной реабилитации и протезирования, но также и в области спортивной медицины и биомеханики спорта. Группой разработчиков БГУИР предложен метод структурно-функционального анализа движений человека на базе оценки электромиографического паттерна двигательной деятельности [17]. Электромиографический паттерн движения показывает уровень активности и последова-

тельность включения мышц, задействованных в движении. Реализацией данного подхода к анализу движений человека стала техническая система структурно-функциональной диагностики двигательных навыков.

Предложенное устройство осуществляет регистрацию в реальном масштабе времени многоканальных электрофизиологических (интерференционная электромиография) и биомеханических (подография, гониометрия, акселерометрия) сигналов движения, беспроводную передачу данных и синхронизированную запись видеоизображения. Структурно-функциональный анализ движений человека осуществляется с учетом его индивидуальных характеристик, выбранных для диагностики мышц и типа движения. Система позволяет оценить согласованность работы мышц при выполнении движения, определить стабильность результата двигательного действия и оценить уровень физической подготовленности человека. Конструкция устройства предполагает минимизацию размеров и веса, а также удобство крепления для уменьшения влияния на естественные движения человека. Стандарт беспроводного канала передачи данных должен обеспечивать максимальное расстояние и скорость передачи данных, при этом иметь минимальное энергопотребление. Предложенная система может использоваться для исследования движений человека в клинической и спортивной медицине, а также в тренировочном процессе спортсменов.

Контроль и формирование движений человека. Движение человека представляет собой результат согласованной работы различных систем организма (опорно-двигательного аппарата, нервной системы, сердечно-сосудистой системы и т. д.). Сегодня актуальными для медицины и спорта являются задачи формирования у человека эффективного двигательного стереотипа, а также адаптации сформированного двигательного навыка в соответствии с заданными параметрами.

Предложена техническая система управляемого изменения двигательного навыка человека на основе многоканальной электростимуляции (рис. 2) [18]. На первом этапе на основании многоканальной электромиографии техническая система осуществляет структурно-функциональный анализ двигательного стереотипа человека (блок диагностики). На втором происходит построение индивидуальной программы многоканальной электростимуляции (блок выделения окон стимуляции) и корректирование выделенных окон стимуляции на базе эталонных программ (блок эталонных программ стимуляции). Система позволяет задавать критерии выделения окон стимуляции (вид интерполяции электромиографического сигнала, границы значимости временных интервалов, ширина окна стимуляции), а также параметры стимулирующего сигнала (вид, частота, амплитуда и проч.). На третьем этапе на основании разработанной программы многоканальной электростимуляции осуществляется формирование сигналов стимуляции для каждого канала (блок стимуляции). При этом для каждого канала электростимуляции учитываются временная организация окон стимуляции и амплитуда сигнала в окне стимуляции. Следует отметить, что электромиография и электростимуляция проводятся посредством одних и тех же пар электродов (блок электродов), коммутируемых либо к блоку стимуляции, либо к блоку диагностики.

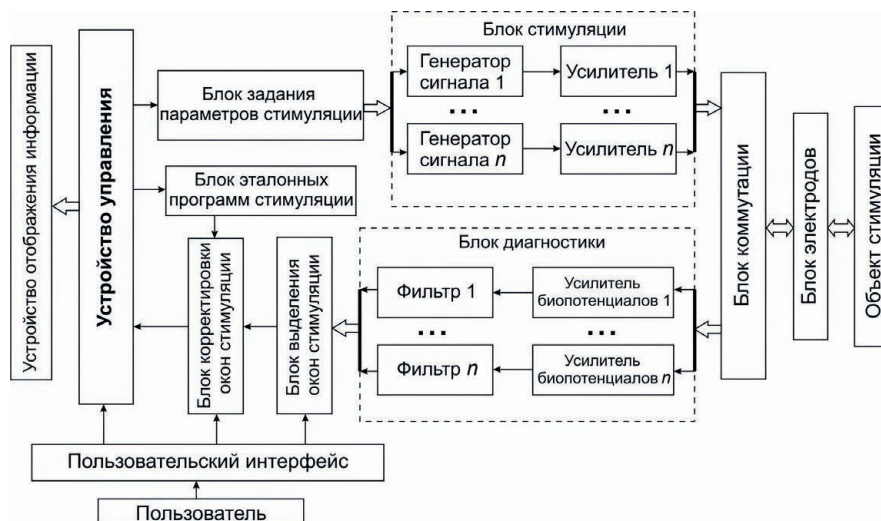


Рис. 2. Схема технической системы для контроля и формирования двигательного навыка человека
Fig. 2. The scheme of the technical system for the control and formation of human motor skills

Предложенная система может использоваться в клинической и спортивной медицине для формирования у человека эффективного двигательного стереотипа или адаптации уже сформированного двигательного навыка в соответствии с заданными параметрами. В рамках данного направления разработан лечебно-диагностический комплекс для анализа и контроля динамики функционального состояния опорно-двигательного аппарата человека на основе частотно-временного анализа суммарной электромиограммы. Технический комплекс включает электромиограф с частотно-временной обработкой интерференционной электромиограммы, а также электромиостимулятор, формирующий сигнал на базе анализа биоэлектрической активности мышц. Предложенный комплекс может использоваться для реабилитации и лечения опорно-двигательного аппарата человека.

Применение кислорода в медицине при лечении различных заболеваний

Перспективность применения кислорода в медицине при различных заболеваниях, сопровождающихся острой и хронической дыхательной недостаточностью, была признана практически сразу после его открытия немецко-шведским химиком Карлом Вильгельмом Шееле в 1771 г. Сегодня респираторная поддержка, традиционно тесно связанная с интенсивной терапией и реанимацией, активно внедряется и во многие другие направления медицины ввиду актуальности проблемы гипоксии, в том числе в условиях последствий пандемии COVID-19, поиска немедикаментозных методов лечения, а также благодаря разработке новых технологий получения и применения кислорода.

Предложена методика оперативной коррекции скорости подачи кислорода пациенту в ходе терапии дыхательной недостаточности на основе мониторинга значений частоты дыхания, сатурации и пульса с целью оптимизации расхода кислорода и повышения эффективности терапии. Данная методика реализована в оригинальном медицинском устройстве [19], которое может работать как с концентраторами кислорода, так и со стационарной кислородной сетью учреждения здравоохранения или с кислородными баллонами [20]. При отсутствии кислородной терапии происходит снижение сатурации до 78 % и соответствующее повышение пульса. Подача кислорода посредством предлагаемого устройства позволила нормализовать значения сатурации (до 94 %) и пульса, сократив расход кислорода с 5 до 1 л/мин [21]. Доказанную эффективность в терапии заболеваний кардиологического, неврологического и пульмонологического профилей показал аппарат для проведения кислородно-гелиевой терапии, который позволяет выполнять ингаляции подогретой до 35–99 °С кислородно-гелиевой смесью (30 % кислорода и 70 % гелия). Высокая эффективность обуславливается низкой плотностью, высокой теплопроводностью и диффузионной способностью гелия.

Актуальная задача – предупреждение и своевременное выявление заболеваний, в том числе на базе санаторно-курортных и оздоровительных учреждений. С такой целью разработан программно-аппаратный комплекс, осуществляющий раннее выявление заболеваний органов дыхания, а при необходимости – адаптивную контролируемую кислородную и/или СИПАП-терапию [22]. Данный комплекс в режиме реального времени выполняет мониторинг и анализ таких параметров пациента, как частота дыхания, сатурация гемоглобина артериальной крови, пульс, дыхательные усилия грудной клетки и живота, положение тела, храп. Применение комплекса в оздоровительных и санаторно-курортных учреждениях позволяет осуществлять во время первичного приема терапевта скрининг 100 % отдыхающих, фиксировать факты отклонения значений параметров от нормальных показателей, проводить суточное и/или ночное мониторинг при необходимости уточнить диагноз, а также осуществить подбор режима и параметров СИПАП- или кислородной терапии и ее проведение в контролируемом автоматическом режиме посредством аппарата респираторной поддержки для создания положительного давления в дыхательных путях [23], концентратора кислорода [24] и устройства для измерения насыщения кислородом артериального гемоглобина крови человека и частоты сердечных сокращений [25], входящих в его состав.

Принимая во внимание тот факт, что гипоксия также является одним из патогенетических звеньев алкоголизма, с целью терапии как основного наркологического, так и сопутствующих терапевтических и неврологических заболеваний, была разработана портативная система окси-

генации под избыточным давлением [26]. Данная система позволяет реализовать предложенный метод лечения синдрома отмены алкоголя с использованием нормоксической лечебной компрессии (НЛК). В ходе внедрения системы было доказано, что в комплексном лечении НЛК имеет более высокую, чем гипербарическая оксигенация, эффективность в отношении снижения тяжести патологического влечения к алкоголю, обусловленную вегетативным компонентом [27], и позволяет сократить время пребывания пациентов в стационаре [28].

С целью дистанционного контроля уровня содержания алкоголя в крови водителей транспортных средств, а также операторов технологического оборудования разработана система удаленного мониторинга и управления мобильными и стационарными объектами [29]. Система посредством спутниковой и радиосвязи принимает данные от устройства определения уровня содержания алкоголя в крови человека и отправляет команды на устройство блокировки исполнительного механизма, расположенные на удаленном объекте, осуществляя тем самым дистанционный контроль и управление данным объектом.

Заключение

1. Разработана трехуровневая система длительного дистанционного мониторинга жизненных параметров человека на основе беспроводных нательных сетей. Система позволяет осуществлять мониторинг жизненно важных параметров посредством регистрации биомедицинских сигналов, идентификации предкризовых и критических состояний (гипертонический криз, инфаркт миокарда, инсульт и т. д.) и выработки тревожной сигнализации как для пациента, так и для медицинского персонала с целью принятия неотложных мер.

2. Создано мобильное приложение ALS Expert, которое выполняет функции анализа голосового сигнала (вычисление пертурбационных параметров голоса и индекса патологичности вибрата) и предварительного детектирования наличия признаков широкого спектра заболеваний с использованием линейного дискриминантного анализа. Мобильное приложение тестировалось в РНПЦ неврологии и нейрохирургии: предварительные результаты показали, что оно обладает высокой эффективностью.

3. Разработана математическая модель воздействия электромагнитного поля на биологические ткани, учитывающая их удельную электропроводность и относительную диэлектрическую проницаемость. На основе модели в платформе Sim4Life рассчитаны параметры отклика в биологических тканях. Программа позволяет моделировать различные типы источников, элементов приборов электромагнитного излучения и реализовать возможности их применения на цифровых фантомах экспериментальных животных и людей с базой данных всех электростатических и биоэлектрических характеристик тканей. Полученные результаты могут быть использованы при проведении пилотных и клинических исследований.

4. Предложено для повышения эффективности физиотерапевтических процедур использовать методы сочетанного воздействия активирующих факторов различной физической природы: ультразвука и электрофореза, ультразвуковых и магнитных полей высокой интенсивности, светотерапии и физических нагрузок высокой интенсивности.

5. Представлена техническая система многоканальной электростимуляции с программным управлением параметрами стимулирующих сигналов. Разработаны лечебно-диагностический аппаратно-программный комплекс, содержащий электромиограф с частотно-временной обработкой суммарной электромиограммы, и электромиостимулятор с формированием стимулирующего сигнала различной сократительной способности на основе анализа биоэлектрической активности мышц.

6. Создана методика оперативной коррекции скорости подачи кислорода пациенту в ходе терапии дыхательной недостаточности на основе мониторинга значений частоты дыхания, сатурации и пульса. Методика реализована в оригинальном медицинском устройстве, которое может работать как с концентраторами кислорода, так и со стационарной кислородной сетью учреждения здравоохранения или с кислородными баллонами. Разработана система удаленного мониторинга и управления мобильными и стационарными объектами с целью дистанционного контроля уровня содержания алкоголя в крови водителей транспортных средств, а также операторов технологического оборудования.

Список литературы / References

1. Osipov A. N., Rolich O. C., Kluev A. P., Vladymtsev V. D., Migalevich S. A., Khazanovsky I. O. (2023) Heart Rate Measurement Algorithm in the Monitoring System of Human Body Condition. *Digital Transformation*. 29 (4), 66–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-4-66-72> (in Russian).
2. Osipov A. N., Patseev A. V., Patseev S. V. (2023) Analysis Algorithm of Biomedical Signals in Remote Monitoring Systems of Human Health. *Doklady BGUIR*. 21 (1), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-5-11> (in Russian).
3. Patseev A. V., Patseev S. V., Osipov A. N. A Method for Remote Monitoring of the Human Condition. *The Decision to Grant a Patent under EA Application No 202390206*.
4. Uloza V., Padervinskis E., Vegiene A., Pribuisiene R., Saferis V., Vaiciukynas E., et al. (2015) Exploring the Feasibility of Smart Phone Microphone for Measurement of Acoustic Voice Parameters and Voice Pathology Screening. *European Archives of Otorhinolaryngology*. 272, 3391–3399.
5. Rusz J., Hlavnička J., Tykalová T., Novotný M., Dušek P., Šonka K., et al. (2018) Smartphone Allows Capture of Speech Abnormalities Associated with High Risk of Developing Parkinson's Disease. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 26 (8), 1495–1507.
6. Lauraitis A., Maskeliūnas R., Damaševičius R., Krilavičius T. (2020) A Mobile Application for Smart Computer-aided Self-administered Testing of Cognition, Speech, and Motor Impairment. *Sensors*. 20 (11), 1–22.
7. Vashkevich M., Petrovsky A., Rushkevich Y. (2019) Bulbar ALS Detection Based on Analysis of Voice Perturbation and Vibrato. *IEEE Intern. Conf. on Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications, Poznan, Poland, 18–20 Sept.* 267–272.
8. Vashkevich M. I., Azarov I. S. (2020) Determination of the Pathology of the Vocal Apparatus Based on the Analysis of the Modulation Spectrum of Speech in Critical Bands. *Proceedings of SPIIRAN*. (2), 249–276.
9. Vashkevich M. I., Likhachov D. S., Azarov I. S. (2022) Voice Analysis and Classification System Based on Perturbation Parameters and Cepstral Presentation in Psychoacoustic Scales. *Doklady BGUIR*. 20 (1), 73–82. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-73-82> (in Russian).
10. Likhachov D., Vashkevich M., Azarov E., Malhina K., Rushkevich Y. (2021) A Mobile Application for Detection of Amyotrophic Lateral Sclerosis Via Voice Analysis. *Speech and Computer. SPECOM 2021. Lecture Notes in Computer Science*. Springer. 12997, 372–383.
11. Ulashchik V. S., Molchanova A. Yu., Zhavoronok I. P., Melik-Kasumov T. B., Schastnaya N. I., Voichenko N. V., et al. (2018) *Electromagnetic Therapy: New Data and Technologies*. Minsk, Belaruskaya Navuka.
12. Kamlach P. V., Hroda D. S., Churakov A. V., Kamlach V. I., Bondarik V. M., Madveika S. I., et al. (2020) Model of Electromagnetic Field Effect on Biological Tissues. *Doklady BGUIR*. 18 (8), 46–52. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-8-46-52> (in Russian).
13. Kamlach P. V., Sidorovich A. Y., Kulikov N. I., Kamlach V. I., Bondarik V. M., Churakov A. V., et al. (2018) Simulator of Electrical Characteristics of Adipose Tissue. *Doklady BGUIR*. (7) (in Russian).
14. Kamlach P., Sidorovich A., Kulikov M., Kamlach V., Davydova N. (2020) Simulator of Electrical Characteristics of Muscle Tissue. *Journal of Engineering Science*. (3). DOI: 10.528.
15. Churakov A. V., Kamlach P. V., Ongarbayeva A. I. (2023) Simulation of Magnetotargeting of Medicines Based on the Calculation of Permeability of Human Tissues by the Electromagnetic Field. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 118–123. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-118-123> (in Russian).
16. Gorokh P. I., Semenchik I. N., Bondarik V. M., Voitov V. V. (2022) Study of the Effect of Quantum Radiation on the Restoration Process of the Human Deltoid Muscle. *Medelectronics-2022. Medical Electronics and New Medical Technologies: Collection of Scientific Articles of the XIII International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 8–9*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 219–224 (in Russian).
17. Davydova N. S. (2011) Structural and Functional Diagnostics of Human Motor Skills Based on the Construction and Analysis of an Electromyographic Portrait of Movement. *News of Biomedical Sciences*. 4 (4), 178–186.
18. Davydova N. S., Osipov A. N., Davydov M. V., Mezhennaya M. M. (2012) Method and Technical Means of Controlled Change Human Motor Skill Based on Multichannel Electrical Stimulation. *Bulletin of the Polish State University. Series C. Fundamental Sciences*. (4), 10–15 (in Russian).
19. Zelmansky O. B., Zelmansky B. V. (2015) Automated Oxygen Delivery System to the Patient. *Pat. 10536 Rep. Belarus, MPK8 A61M 16/00, B01D 53/04; Applicant Borlen LLC. No u20140236; Published on 26.06.2014; Published on 28.02.2015*. Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (1), 131–132.
20. Zelmansky O. B., Davidovskaya E. I. (2016) Apparatus for the Long-Term Oxygen Therapy. *Doklady BGUIR*. (7), 226–230 (in Russian).
21. Zelmansky O. B., Davidovskaya E. I., Dubrovsky A. S. (2020) Respiratory Failure: Technical Means for Diagnosis and Respiratory Support. *Doklady BGUIR*. 18 (8), 29–36 (in Russian).
22. Zelmansky O. B., Zelmansky B. V. (2019) Therapeutic and Diagnostic Complex for Early Detection and Therapy of Respiratory Diseases, Aggravated by Respiratory and Heart Failure, Apnea/Hypopnea Syndrome. *Pat. 11984 Rep. Belarus, u20180333; Declared on 29.11.2018; Published on 15.02.2019*. Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (2).

23. Zelmansky O. B. (2019) Respiratory Support Device for Creating Positive Pressure in the Respiratory Tract. *Pat. 4305 Rep. Belarus, f20190113; Declared on 18.04.2019; Published on 01.10.2019.* Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (6).
24. Zelmansky O. B. (2020) Oxygen Concentrator. *Pat. 4411 Rep. Belarus, f20190242; Application on 03.09.2019; Published on 16.12.2019.* Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (1).
25. Zelmansky O. B. (2017) Device for Measuring Oxygen Saturation of Arterial Hemoglobin in Human Blood and Heart Rate. *Pat. 3721 Rep. Belarus, f20160156; Announcement on 13.09.2016; Published on 16.01.2017.* Afitsyny Bul. National Center of Intellectual Property. (2).
26. Zelmansky O. B. (2023) Technical Support for the Application of the Method of Normoxic Therapeutic Compression in Narcological Practice. *Medicine and High Technologies.* (4), 34–39.
27. Капытаў Д. А., Кудін Л. І., Капытаў А. В., Зельманскі О. В. (2020) Dynamics of Lipid Status in Alcohol Withdrawal Syndrome Against the Background of Complex Treatment. *Medical Journal.* (3), 75–83 (in Russian).
28. Капытаў Д., Кудін Л., Капытаў А., Зельманскі О. В. (2020) Estimation of Efficiency of Complex Treatment Alcohol Withdrawal Syndrome Taking into Account Markers of Hepato-Biliary System. *Military Medicine.* (3), 32–43 (in Russian).
29. Zelmansky O. B., Zelmansky B. V. (2011) The System of Remote Monitoring and Management of Mobile and Stationary Facilities and Control of Alcohol Content in the Blood of Personnel of These Facilities. *Pat. 7487 Rep. Belarus, u20110066; Application on 11.02.2011; Published on 06.05.2011.* Official Website. National Center of Intellectual Property. (4), 220–221.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Бондарик В. М., канд. техн. наук, доц., декан факультета доуниверситетской подготовки и профессиональной ориентации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Вашкевич М. И., д-р техн. наук, проф., проф. каф. электронных вычислительных средств, БГУИР

Давыдов М. В., канд. техн. наук, доц., первый проректор БГУИР

Давыдова Н. С., канд. техн. наук, доц., доц. каф. инфокоммуникационных технологий, БГУИР

Зельманский О. Б., канд. техн. наук, доц., доц. каф. защиты информации, БГУИР

Камлач П. В., канд. техн. наук, доц., зам. декана факультета компьютерного проектирования, БГУИР

Меженная М. М., канд. техн. наук, доц., доц. каф. инженерной психологии и эргономики, БГУИР

Осипов А. Н., канд. техн. наук, доц., зав. лаб. Центра междисциплинарных исследований, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-85-40
E-mail: osipov@bsuir.by
Осипов Анатолий Николаевич

Information about the authors

Bandaryk V. M., Cand. of Sci., Associate Professor, Dean of the Faculty of Pre-University Preparation and Occupational Guidance, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Vashkevich M. I., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Electronic Computing Facilities, BSUIR

Davydov M. V., Cand. of Sci., Associate Professor, First Vice-Rector, BSUIR

Davydova N. S., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information and Communication Technologies, BSUIR

Zelmanski O. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Information Security Department, BSUIR

Kamlach P. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Deputy Dean of the Faculty of Computer Engineering, BSUIR

Mezhennaya M. M., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics, BSUIR

Osipov A. N., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Laboratory of the Center for Interdisciplinary Research, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University of Informatics
and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-85-40
E-mail: osipov@bsuir.by
Osipov Anatoliy Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-116-125>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.317.335.3

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ

А. В. ГУСИНСКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27.02.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Представлен новый метод анализа высокочастотного тракта измерительных и радиотехнических систем на основе матричного анализа. Предложена и обоснована замена матрицы рассеяния погрешностей на матрицу передачи в виде клеточных матриц, в матричном виде получены уравнения калибровки и восстановления действительных (исправленных) значений измеряемых параметров, в общем виде приведены пути решения этих уравнений. Определены основные паразитные параметры тракта передачи полезного сигнала, связанные с неоднородностями, утечками и недостаточностью развязок. Использование разработанных методов позволило оптимизировать структуры приборов, алгоритмы калибровки и измерений. Рассмотрена большая гамма созданных приборов общего и специального назначения в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

Ключевые слова: S -параметры, матрица рассеяния, многополюсник, анализатор цепей, генератор, ваттметр, высотометр.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гусинский, А. В. Перспективные результаты исследований и разработки в области СВЧ-технологий / А. В. Гусинский // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 116–125. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-116-125>.

PROMISING RESEARCH RESULTS AND DEVELOPMENT IN THE FIELD OF MICROWAVE TECHNOLOGY

ALEXANDER V. GUSINSKY

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 27.02.2024

Abstract. A new method for analyzing the high-frequency path of measuring and radio engineering systems based on matrix analysis is proposed. The replacement of the error scattering matrix with a transmission matrix in the form of cellular matrices is proposed and justified, the equations of calibration and restoration of the actual (corrected) values of the measured parameters are obtained in matrix form, and the ways of solving these equations are given in general form. The main parasitic parameters of the useful signal transmission path associated with inhomogeneities, leaks and insufficiency of interchanges are determined. The use of the developed methods made it possible to optimize the structures of devices, calibration and measurement algorithms. A large range of general and special purpose devices has been created in the decimeter, centimeter and millimeter wavelength ranges.

Keywords: S -parameters, scattering matrix, multiport network, network analyzer, generator, wattmeter, altimeter.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Gusinsky A. V. (2024) Promising Research Results and Development in the Field of Microwave Technology. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 116–125. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-116-125> (in Russian).

Введение

Особое место в области радиоэлектроники занимают вопросы создания и применения радиоэлектронных сверхвысокочастотных средств и систем, в том числе миллиметрового диапазона длин волн (МДДВ). При этом можно выделить следующие направления развития:

- разработка и создание новой элементной базы в уже освоенных частотных диапазонах;
- освоение новых частотных диапазонов, а также элементной базы и средств метрологического контроля для них;
- широкое использование средств цифровой обработки сигналов и современных средств вычислительной техники;
- разработка новых научных и технических решений, обеспечивающих повышение качества продукции и дальнейшее совершенствование средств метрологического контроля.

Интерес к МДДВ обусловлен рядом особых свойств миллиметровых волн, отличающих их от других диапазонов:

- лучшее проникновение через пыль и туман, чем в оптическом диапазоне и при излучении более длинноволновых колебаний; меньшее затухание при прохождении через ионизированную среду по сравнению с волнами сантиметрового и дециметрового диапазонов;
- расширение полосы частот и возможность увеличения информативной емкости каналов связи, увеличение помехозащищенности линий связи, минимальные возможности несанкционированного съема информации;
- уменьшение массогабаритных характеристик устройств и систем, в частности, размеров антенн радиолокационных станций; возможность размещения на космических и быстро движущихся в атмосфере подвижных средствах; улучшение диаграмм направленности антенн, большая разрешающая способность, возможность обнаружения малых объектов;
- возможность исследования новых свойств сред и различных материалов.

Следует особо отметить, что интерес к МДДВ в значительной мере обусловлен сложностями, с которыми пришлось столкнуться при использовании оптических волн. Инфракрасные системы, способные работать как в дневных, так и в ночных условиях, часто оказываются неэффективными при наличии на трассе распространения волн облачности, тумана или дыма. В то же время излучение миллиметрового диапазона может проникать через такие непрозрачные области и обеспечивать достаточное разрешение по дальности и углам. Основные направления разработок в МДДВ связаны с созданием разнообразных систем и аппаратуры, прежде всего военного, а также научного и промышленного назначения – зондирование атмосферы в метеорологии, радиоастрономии, навигации, медицине и других областях. Данные области применения радиоэлектронных средств МДДВ предполагают наличие и использование достаточно однотипных элементов и узлов, таких как: источники или генераторы сигналов, гетеродины, приемные устройства на основе широко- и узкополосных смесителей; СВЧ-тракты распространения сигнала, адаптеры или согласующие переходы, направленные ответвители, делители мощности и/или антенные системы; устройства контроля и определения уровня мощности (ваттметры), преобразователи СВЧ-мощности в электрические сигналы постоянного тока; вторичные устройства преобразования сигналов промежуточной частоты от СВЧ-смесителей в цифровую форму. Перечисленные элементы и узлы в большинстве своем характеризуются потерями прохождения сигнала, согласованием входов и фланцевых соединений, коэффициентами преобразования. Эти параметры относятся к широкому спектру радиоэлектронных устройств МДДВ. Однако самые высокие требования предъявляются к средствам измерений (СИ), осуществляющим метрологическое обеспечение в радиолокации, телекоммуникации, навигации, телеметрии и радиоастрономии.

Один из главных параметров – динамический или широкий диапазон измерений. Для обеспечения требуемых пределов измерений необходимо уменьшить ослабление, вносимое СВЧ-трактом, что может быть осуществлено путем лучшего согласования составляющих элементов тракта и/или его существенного конструктивного упрощения. Конструктивное упрощение СВЧ-тракта в миллиметровом диапазоне важно также из-за высокой стоимости узлов и элементов, входящих в его состав. Все это накладывает определенные условия и ограничения на выбор структур-

ной схемы и соответствующего метода измерения, который должен обеспечивать конструктивную простоту СИ с возможностью получения высоких технических и метрологических характеристик.

Наряду с амплитудными параметрами, в любой системе МДДВ, начиная от СИ и до радиолокации, присутствуют фазовые параметры, во многом определяющие точность работы алгоритмов цифровой обработки сигналов, когерентного накопления и возможности работы в присутствии помеховых сигналов. Количественная оценка абсолютной погрешности измерения фазового сдвига показывает, что при относительной погрешности установки частоты не более $\delta f = \pm 0,002$, характерной для большинства систем, при длине отрезков волновода 10 мм значение этой погрешности на частоте 100 ГГц достигает $\pm 3,0^\circ$. С увеличением длины отрезка волновода погрешность линейно возрастает.

Также в МДДВ возникает проблема, связанная с точностью изготовления каналов волноводных элементов СВЧ измерительного тракта (ИТ) и рабочих эталонов в процессе их производства. При этом, чем выше частотный диапазон, тем жестче должны быть требования, предъявляемые к допускам на геометрические размеры волноводных каналов: например, для диапазона длин волн 8 мм допуск составляет 10–20 мкм, для диапазона 3 мм – 5–10 мкм. При стыковке волноводных фланцев из-за возможности различия при изготовлении их волноводных каналов и присоединительных размеров всегда возникает некоторое рассогласование (нарушается идеальность тракта).

Математические модели процессов калибровки и непосредственного измерения

Широкий круг существующих и потенциальных потребителей устройств, систем и СИ МДДВ определяет необходимость использования методов стандартизации, и в случае со СИ МДДВ это выражается:

- в разработке базовых структур построения по отдельным видам измерений для разных частотных поддиапазонов;
- во введении в структуры построения унифицированных функциональных частей, которые являются одинаковыми для разных частотных диапазонов.

Анализируя большое количество структурных схем различных устройств МДДВ, можно выделить и предложить для анализа и математического моделирования обобщающую структуру. Она может быть описана как многополюсник, состоящий из двух пар входных и двух пар выходных цепей. Математический анализ такого многополюсника позволяет выявить полезные и паразитные связи, искажающие прохождение сигнала, и обнаружить все места рассогласования в волноводном тракте любой системы.

Математическим аппаратом теоретического анализа СВЧ-цепей являются матричные и топологические методы, причем для матричного описания СВЧ-устройства могут использоваться различные системы параметров, между которыми существует однозначная связь. При теоретическом анализе и расчетах разнообразных СВЧ-устройств (СИ и ИТ) и их сочетаниях целесообразно введение понятия «измерительная система» (ИС), обобщающего эти сочетания. Для анализа и моделирования наиболее предпочтительным оказалось применение системы S -параметров, являющихся элементами матрицы рассеяния, описывающей анализируемое устройство или соединение. В некоторых случаях, например, при анализе каскадных соединений СВЧ-устройств, удобно использовать T - (или R -) параметры, выражаемые через S -параметры. При анализе СВЧ-устройств топологическими методами (методом ориентированных графов) для описания графов также преимущественно используются S -параметры. В идеальном случае СВЧ ИС должны быть абсолютно точными и полностью обеспечивать достоверные измерения. Если бы было возможно существование идеальной СВЧ ИС, она должна была бы иметь бесконечный динамический диапазон, бесконечные развязки и характеристики направленности, отсутствие рассогласований импедансов в любой части СВЧ ИТ, отсутствие помех, утечек и постоянные частотные характеристики каналов отражений и передачи тракта. Однако даже в самых точных СВЧ ИС существуют некоторые несовершенства, служащие причиной неидеальных результатов измерений. При любых СВЧ-измерениях имеются погрешности, связанные с СВЧ ИС, способствующие неидеальности получаемых результатов. Указанные погрешности характеризуются параметрами, приведенными в табл. 1, которые используются для математического моделирования процессов калибровки и непосредственного измерения.

Таблица 1. Параметры, используемые для математического моделирования процессов калибровки и непосредственного измерения

Table 1. Parameters used for mathematical modeling of calibration and direct measurement processes

Обозначение / Designation	Наименование / Name	Краткое описание / Short description
E_D, E_{DR}	Параметр, характеризующий направленность	Определяет относительный уровень паразитного сигнала при подключении идеальной согласованной нагрузки к измерительному порту в режиме измерения коэффициента отражения. Обусловлен неидеальностью ответвляющих устройств СВЧ ИС (направленных ответвителей, мостов). Ограничивает нижний предел измерений комплексного коэффициента отражения
E_S, E_{SR}	Параметр, характеризующий рассогласование со стороны источника СВЧ-сигнала	Определяет относительный уровень отраженного сигнала, вызванного неидеальным согласованием источника СВЧ-сигнала с СВЧ ИТ. Обусловлен отличием выходного импеданса источника СВЧ-сигнала и волнового сопротивления СВЧ ИТ. Ограничивает верхний предел измерений комплексного коэффициента отражения
E_L, E_{LR}	Параметр, характеризующий рассогласование со стороны нагрузки	Определяет относительный уровень отраженного сигнала, вызванного неидеальным согласованием объекта измерения (ОИ) и нагрузки в режиме измерения коэффициента передачи. Обусловлен отличием входного импеданса нагрузки и волнового сопротивления ОИ
E_M, E_{MR}	Параметр, характеризующий изоляцию	Определяет относительный уровень паразитного сигнала, поступающего на измерительный порт в режиме измерения коэффициента передачи. Обусловлен некоторой частью измерительных сигналов и помех, попадающих на измерительный вход напрямую без прохождения ОИ из-за неидеальности качества экранировки внутренних блоков, используемых переходов и сборок. Ограничивает нижний предел измерений комплексного коэффициента передачи
E_R, E_{RR}	Трекинг отражения	Показывает отличие коэффициентов передачи опорного и измерительных каналов в тракте отражения. Определяет плоскость отсчета модуля и фазы коэффициента отражения
E_T, E_{TR}	Трекинг передачи	Показывает отличие коэффициентов передачи опорного и измерительных каналов в тракте передачи. Определяет плоскость отсчета модуля и фазы коэффициента передачи

В общем случае любой восьмиполосник погрешностей характеризуется матрицей рассеяния 4-го порядка ($n = 4$), т. е. 16-тью параметрами (16-тью комплексными величинами) [1, 2]. Идеальная ИС, т. е. ИС без систематических погрешностей, как бы «воспринимает» ОИ через гипотетический восьмиполосник погрешностей, который характеризует систематические погрешности реальной ИС. Такая математическая модель измерения является полной для ОИ в виде четырехполосника (рис. 1). Данный подход предложен впервые и отличен от известных способов анализа многополосных цепей.

Транспортированная матрица $[E]^T$ имеет вид

$$[E]^T = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} & e_{44} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} E_D E_{TR} & E_M & 1 & E_Q \\ E_{MR} & E_{DR} E_T & E_{QR} & 1 \\ E_R E_{TR} & E_{LR} E_M E_R & E_S + E_{LR} E_R & E_{VR} \\ E_L E_{MR} E_{RR} & E_{RR} E_T & E_V & E_{SR} + E_L E_{RR} \end{bmatrix}^T. \quad (1)$$

Согласно (1), 16-параметрическая математическая модель восьмиполосника погрешностей будет иметь вид, представленный на рис. 2.

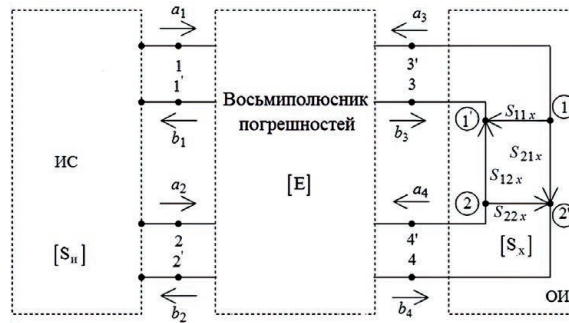


Рис. 1. Схема, поясняющая процедуру моделирования погрешностей измерения для объекта измерения в виде четырехполюсника: a_i, b_i – падающие и отраженные волны на входах восьмиполюсника погрешностей ($i = 1, \dots, 4$); $[E]$ – матрица рассеяния восьмиполюсника погрешностей; $[S_{и}]$ – матрица рассеяния измерительной системы; $[S_{о}]$ – матрица рассеяния объекта измерения; S_{11x}, S_{22x} – комплексный коэффициент отражения входа и выхода многополюсника; S_{12x}, S_{21x} – комплексный коэффициент передачи в прямом и обратном направлениях

Fig. 1. Diagram explaining the procedure for modeling measurement errors for a measurement object in the form of a quadripole: a_i, b_i – incident and reflected waves at the inputs of the eight-port error network ($i = 1, \dots, 4$); $[E]$ – eight-port error scattering matrix; $[S_{и}]$ – scattering matrix of the measuring system; $[S_{о}]$ – scattering matrix of the measured object; S_{11x}, S_{22x} – complex reflection coefficient of the input and output of the multiport network; S_{12x}, S_{21x} – complex transmission coefficient in forward and reverse directions

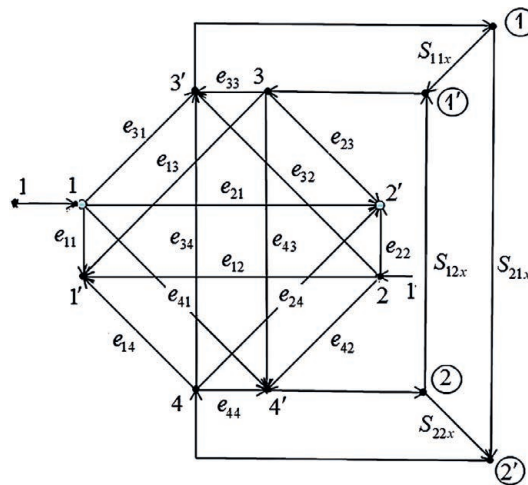


Рис. 2. Схема 16-параметрической математической модели восьмиполюсника погрешностей
Fig. 2. Diagram depicting a 16-parameter mathematical model of an eight-port error network

В результате проведенных преобразований получены следующие выражения для восстанавливаемых действительных (исправленных) значений параметров матрицы рассеяния $[S_{о}]$, выраженные через миноры матрицы передачи $[T]$ восьмиполюсника погрешностей и измеренные параметры матрицы $[S_{и}]$, найденные при калибровке:

$$\begin{aligned}
 S_{11x} &= -\frac{1}{Z_3} \{M_{12,23}(T) - S_{11и} M_{23,23}(T) - S_{12и} M_{13,23}(T) + S_{21и} M_{24,23}(T) + S_{22и} M_{14,23}(T) + \Delta S_{и} M_{34,23}(T)\}; \\
 S_{12x} &= -\frac{1}{Z_3} \{M_{12,13}(T) - S_{11и} M_{23,13}(T) - S_{12и} M_{13,13}(T) + S_{21и} M_{24,13}(T) + S_{22и} M_{14,13}(T) + \Delta S_{и} M_{34,13}(T)\}; \\
 S_{21x} &= \frac{1}{Z_3} \{M_{12,24}(T) - S_{11и} M_{23,24}(T) - S_{12и} M_{13,24}(T) + S_{21и} M_{24,24}(T) + S_{22и} M_{14,24}(T) + \Delta S_{и} M_{34,24}(T)\}; \\
 S_{22x} &= \frac{1}{Z_3} \{M_{12,14}(T) - S_{11и} M_{23,14}(T) + S_{12и} M_{13,14}(T) + S_{21и} M_{24,14}(T) + S_{22и} M_{14,14}(T) + \Delta S_{и} M_{34,14}(T)\}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $Z_3 = M_{12,23}(T) - S_{11и} M_{23,23}(T) - S_{12и} M_{13,23}(T) + S_{21и} M_{24,23}(T) + S_{22и} M_{14,23}(T) + \Delta S_{и} M_{34,23}(T)$.

Как видно из матрицы (1), в случае 12-параметрической модели предполагаются отсутствующими связи (утечки, паразитные передачи) между зажимами 2–3', 1–4', 3–4' и 4–3' (рис. 2), которые могут быть учтены 16-параметрической моделью восьмиполюсника погрешностей. Необходимость в учете таких утечек возникает, например, при использовании двунаправленных векторных анализаторов цепей (ВАЦ) и исследовании СВЧ-модулей (СВЧ-микросборок), когда к входным зажимам ОИ приходится подключать дополнительные переходные устройства (зонды, пробники и т. п.), связывающие входы устройства (например, выполненные на микрополосковых линиях и т. п.) с измерительными входами [2, 3].

Найдем выражения уравнений калибровки и восстановления по результатам измерений $[S_{и}]$ действительных исправленных параметров матрицы $[S_x]$ ОИ, используя матричные методы анализа схемы рис. 1. При этом относительно входов ОИ падающими будут волны b_3 и b_4 , а отраженными – a_3 и a_4 [1]. Связь падающих и отраженных волн на портах многополюсников может быть выражена через параметры волновой матрицы передачи $[T]$. Эту связь можно записать в виде уравнения, входящего в систему, что позволяет на основании набора комбинаций известных значений аттестованных эталонов $[S_x^k]$ и результатов измерений $[S_{и}^k]$ найти миноры матрицы передачи $[T]$, необходимые для определения параметров передачи матрицы $[T]$.

На основании использования эталонных калибровочных мер (короткое замыкание, согласованная нагрузка, отрезок волновода на проход, меры фазового сдвига и их комбинации) можно определить любой из параметров 16-полюсной модели, которая является самой полной. На практике, чтобы не усложнять процесс калибровки, можно пренебречь определением каких-либо параметров, учитывая их малое влияние при заданной точности измерений. В этом случае 16-параметрическая модель может быть преобразована в 12-, 8-, 6- и т. д. полюсные модели. Разработанную модель возможно использовать для анализа согласования потерь при передаче сигнала от источников (задающий генератор, передатчик) до потребителей сигнала (объект исследования, антенная система, приемник сигнала), что делает ее универсальной для любых радиотехнических устройств и систем.

Результаты исследований и их практическая реализация

Опираясь на теоретические расчеты, моделирование и лабораторные исследования, в Центре 1.9 НИЧ БГУИР в течение последних 20 лет были выполнены разработки большой номенклатуры устройств и систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. В вузе осуществляется серийное производство ряда измерительных приборов: векторных анализаторов цепей, синтезированных генераторов сигналов, измерителей мощности (годы выпуска 2021–2023) специального (высотомер, система сбора телеметрической информации) и общего (автоматическая система тестирования радиолокационных устройств) назначений, которые представлены на рис. 3–8 [4–6].

Для ВАЦ типа P4-MBM (рис. 3) рабочие диапазоны частот, ГГц: 0,01–17,44, 17,44–25,95, 25,95–37,50, 37,50–53,57, 53,57–78,33, 78,33–118,10, 118,10–178,40. Типовые значения погрешностей измерения этого прибора: погрешность измерения коэффициента стоячей волны по напряжению $\pm(0,2 + 0,03K)$ дБ, погрешность измерения ослабления $\pm(0,2 + 0,03K)$ дБ, погрешность измерения фазы $\pm 6^\circ$.



Рис. 3. Векторный анализатор цепей типа P4-MBM
Fig. 3. Vector network analyzer type P4-MBM

Для генераторов СВЧ типа Г4-МВМ (рис. 4) рабочие диапазоны частот, ГГц: 0,01–17,44, 17,44–25,95, 25,95–37,50, 37,50–53,57, 53,57–78,33, 78,33–118,10, 118,10–178,40; погрешность установки частоты $\pm(2 \cdot 10^{-5} f_{\max})$.



Рис. 4. Генератор СВЧ типа Г4-МВМ
Fig. 4. Microwave generator type Г4-МВМ

Для ваттметров (измерителей мощности) типа М2-МВМ (рис. 5) рабочие диапазоны частот, ГГц: 0,01–17,44, 17,44–25,95, 25,95–37,50, 37,50–53,57, 53,57–78,33, 78,33–118,10, 118,10–178,40; погрешность измерения мощности 6–10 %.



Рис. 5. Ваттметр типа М2-МВМ
Fig. 5. Wattmeter type М2-МВМ

Для высотомера, работающего в диапазоне частот от 31,80 до 33,40 ГГц (рис. 6), диапазон измерения высоты – от 0,3 до 300,0 м; среднеквадратическое отклонение измерения высоты в диапазоне высот от 0,3 до 10,0 м – не более $\pm 0,02$ м, от 10 до 300 м – ± 3 %.



Рис. 6. Высотомер, работающий в диапазоне частот от 31,80 до 33,40 ГГц
Fig. 6. Altimeter operating in the frequency range from 31.80 to 33.40 GHz

Для автоматической системы тестирования радиолокационных устройств и систем (рис. 7) рабочий диапазон частот – 0,10–140 ГГц, количество приемных каналов – 8, две 2х- и 3х- координатные подвижные платформы.

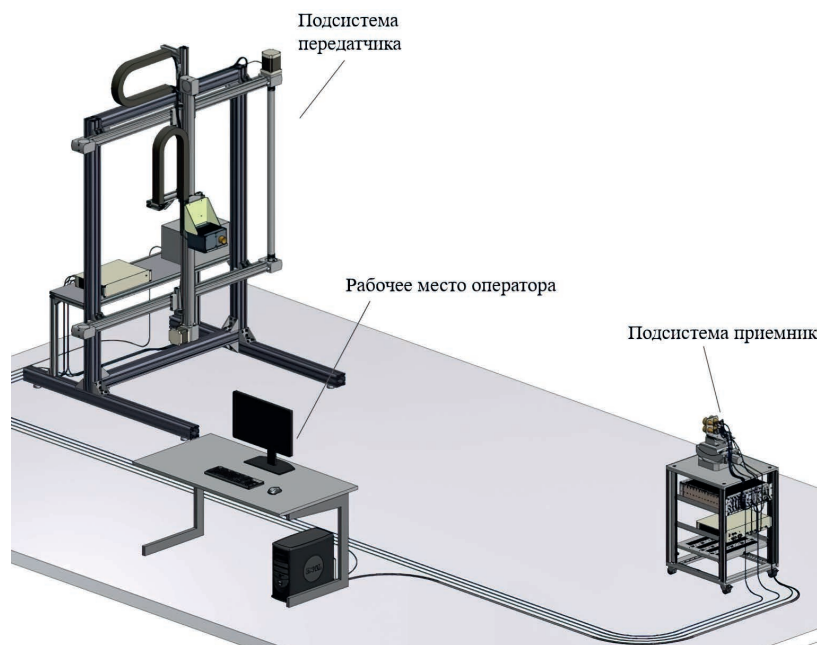


Рис. 7. Автоматическая система тестирования радиолокационных устройств и систем
Fig. 7. Automated testing system for radar devices and systems

Для комплекта телеметрического оборудования (рис. 8) диапазон частот – дециметровый, количество каналов – 4, поток информации – 1 Мв/с, жесткие условия эксплуатации.



Рис. 8. Комплект телеметрического оборудования
Fig. 8. Telemetry equipment set

Начиная с 1977 г., под руководством профессора Альберта Степановича Елизарова началась разработка измерителей комплексных S -параметров, которые успешно поставлялись в качестве единичных лабораторных приборов в различные НИИ СССР. Внешний вид одного из таких приборов показан на рис. 9. В 1996-м ученики А. С. Елизарова создали сначала НИЛ 1.9, а потом Центр 1.9 БГУИР, где продолжили исследования, разработку и производство широкой гаммы современных измерительных приборов МДДВ. В Центре 1.9 созданы и аккредитованы испытательная и калибровочная лаборатории в диапазонах частот 37,50–178,40 ГГц – единственные в Беларуси. Разработаны и метрологически аттестованы calorиметрические измерители мощности (ваттметры) в диапазонах частот 37,50–178,40 ГГц с погрешностью измерения 0,5–1,0 % (5 %) (рис. 10). Данные измерители позволят создать отечественную эталонную базу единицы мощности и ослабления [7, 8].

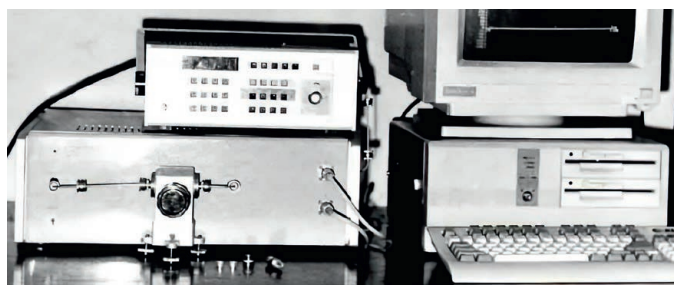


Рис. 9. Векторный анализатор цепей выпуска 1980 г.
Fig. 9. Vector network analyzer produced in 1980



Рис. 10. Калориметрический измеритель мощности типа МК-МВМ
Fig. 10. Calorimetric power meter type МК-MBM

Заключение

1. Разработана и создана новая элементная база миллиметрового диапазона длин волн, которая уже внедряется на опытном производстве и применяется при сборке приборов миллиметрового диапазона длин волн. Во всей номенклатуре производимой продукции широко используются оригинальные модули цифровой обработки сигналов и синтеза зондирующих сигналов.

2. Выведены оригинальные алгоритмы обработки сигналов и представления результатов, позволившие расширить пределы измерений, повысить их точность и получить новые качественные приборы общего, специального и двойного назначения, что подтверждается широкой номенклатурой выполненных контрактов, отечественных и зарубежных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

3. Полученные результаты успешно внедряются в учебный процесс. Ряд измерительных приборов – панорамный измеритель коэффициента стоячей волны по напряжению и ослабления, измеритель мощности – используются при выполнении лабораторных работ на кафедре информационно-измерительных систем БГУИР, векторный анализатор цепей – на кафедре электроники. Готовится к открытию новая специальность 7-07-0713-03 «Сверхвысокочастотные техника, технологии и измерительные системы».

4. Освоены новые частотные диапазоны 118,10–178,40 ГГц, не имеющие аналогов и соответственно метрологического обеспечения. Разработаны и метрологически аттестованы калориметрические измерители мощности в диапазонах частот 37,50–178,40 ГГц с погрешностью измерения 0,5–1,0 % (5 %). Перспективным направлением дальнейших исследований и создания технологического задела является освоение частотных диапазонов до 500 ГГц.

5. Прикладные и фундаментальные исследования требуют привлечения и использования микроэлектронного оборудования, уже имеющегося в БГУИР. Это участки вакуумного напыления, химии и фотолитографии, химии и электрохимии, что позволит создать малозумящие

усилители и усилители мощности миллиметрового диапазона длин волн. Также перспективным является создание новой специальности «СВЧ микроэлектроника» для подготовки специалистов по разработке и производству конкурентноспособных импортозамещающих изделий и систем миллиметрового диапазона длин волн.

Список литературы

1. Векторные анализаторы цепей сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / В. А. Богуш [и др.]. М.: Горячая линия – Телеком, 2019.
2. Гусинский, А. В. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и электр., 2008.
3. Гусинский, А. В. Введение в статистическую метрологию / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. Минск: Бестпринт, 2010.
4. Гусинский, А. В. Анализ и преобразования сигналов / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. Минск: Бестпринт, 2012.
5. Измеритель комплексных параметров СВЧ-устройств: пат. Респ. Беларусь 6193 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин. Опубл. 30.06.2004.
6. Способ формирования напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих S-параметров СВЧ-устройств: пат. BY 22074 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, Д. А. Кондрашов, А. В. Сайков, В. П. Липатников, Н. А. Певнева. Опубл. 30.08.2018.
7. Широкодиапазонный генератор сигналов: пат. 036472 EA / А. В. Гусинский, А. В. Ворошень, С. М. Лапшин, Д. А. Кондрашов, А. С. Волынец, А. М. Кострикин. Опубл. 30.09.2019.
8. Измерение мощности СВЧ в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн / И. Ф. Бурак [и др.]. М.: Горячая линия – Телеком, 2018.

References

1. Bogush V. A., Gusinsky A. V., Sharov G. A., Kostrikin A. M. (2019) *Millimeter and Centimeter Wave Length Vector Network Analyzers*. Moscow, Hote Line – Telecom (in Russian).
2. Gusinsky A. V., Sharov G. A., Kostrikin A. M. (2008) *Millimeter Wave Vector Network Analyzers*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
3. Gusinsky A. V., Sharov G. A., Kostrikin A. M. (2010) *Introduction to Statistical Metrology*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
4. Gusinsky A. V., Sharov G. A., Kostrikin A. M. (2012) *Analysis and Transformation of Signals*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
5. Gusinsky A. V., Kostrikin A. M. (2004) *Meter of Complex Parameters of Microwave Devices*. Pat. Rep. Belarus 6193. Publ. 30.06.2004 (in Russian).
6. Gusinsky A. V., Kostrikin A. M., Kondrashov D. A., Saikov A. V., Lipatnikov V. P., Pevneva N. A. (2018) *A Method for Generating Voltages that Carry Information about the Quadrature Components of the S-Parameters of Microwave Devices*. Pat. BY 22074. Publ. 30.08.2018 (in Russian).
7. Gusinsky A. V., Voroshen A. V., Lapshin S. M., Kondrashov D. A., Volynets A. S., Kostrikin A. M. (2019) *Wide-Range Signal Generator*. Pat. 036472 EA. Publ. 30.09.2019 (in Russian).
8. Burak I. F., Gusinsky A. V., Sharov G. A., Voroshen A. V., Lufarov A. N. (2018) *Measurement of Microwave Power in the Range of Centimeter and Millimeter Waves*. Moscow, Hotline – Telecom (in Russian).

Сведения об авторе

Гусинский А. В., д-р техн. наук, доц., зав. каф. информационно-измерительных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-23-53
E-mail: gusinski@bsuir.by
Гусинский Александр Владимирович

Information about the author

Gusinsky A. V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of Information and Measuring Systems Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-23-53
E-mail: gusinski@bsuir.by
Gusinsky Alexander Vladimirovich



О перспективах научно-технических исследований

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОФОТОНИКИ

В. А. ЛАБУНОВ

MICROELECTRONICS CAPABILITIES EXPANDING USING RADIOPHOTONICS TECHNOLOGY

VLADIMIR A. LABUNOV

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Введение

Информационные технологии представляют собой процессы создания, хранения, передачи, восприятия информации, а также методы и средства их реализации. Для обеспечения этих процессов необходимо развивать высокоуровневые технологии следующих поколений, к которым относятся: интернет вещей IoT, большие данные, беспроводная мобильная связь 5G, облачные вычисления, дополненная и виртуальная реальность, автономные подвижные средства, автоматизация (включая промышленных роботов), умные фабрики, квантовые вычисления. Особое место отводится искусственному интеллекту (ИИ). Предполагается, что ИИ будет драйвером высоких технологий. Перечисленные технологии взаимосвязаны: большие данные обрабатываются и передаются с помощью мобильной беспроводной связи и хранятся в облачных хранилищах. Эта связь обеспечивает повышение производительности, расширение полосы пропускания и энергетическую эффективность информационных систем. Во главе всего стоит интегральная схема (ИС) – КМОП-чип, т. е. микроэлектроника определяет развитие информационных технологий.

Основные вехи развития микроэлектронной промышленности

Долгое время микропроцессоры служили двигателями электронной промышленности. Уменьшение топологических норм полупроводниковых ИС (масштабирование) определяло прогресс в развитии этой отрасли, которое осуществлялось согласно закону Мура, гласящему: «Количество компонентов на кристалле удваивается каждые 24 месяца». До технологической нормы 90 нм масштабирование осуществляется только за счет геометрического фактора (классическое масштабирование), а с 90 нм – за счет применения новых материалов и структур. Характеристики транзисторов в основном определяются конструкцией затвора, которая обеспечивает электростатический контроль за каналом транзистора. GAA-транзистор представляет собой отдельные горизонтальные нанопластинки, каждая из которых является каналом. Затвор охватывает все пластинки канала. Этот транзистор еще называют нанопластинчатым. Транзистор GAA фирмы TSMC (Тайвань), которая в 2021 г. разработала ИС с транзисторами с технологической нормой 3 нм, – наиболее эффективен. Массовое производство GAA-транзисторов запланировано на 2024 г.

Медная металлизация ИС, которая используется сегодня во всех выпускаемых в мире ИС, была разработана в МРТИ (ныне – БГУИР). Впервые она упоминалась в журнале «Доклады Академии наук СССР» [1]. Также в рамках проекта Европейского союза Plated Copper Interconnect Systems for Advanced Microelectronics (INTAS-BELARUS, Project 97-0880, February 2001) была разработана технология медной металлизации. Уже в 2003 г. в промышленном производстве появились ИС с медной металлизацией, в результате чего впервые была достигнута технологическая

норма ИС 90 нм. Однако в Беларуси данная технология не используется, поскольку интегральные схемы, выпускаемые по отечественным технологическим нормам, не требуют медной металлизации.

Обычно развитие микроэлектроники связывают с законом масштабирования Мура. Однако он не полностью отражает картину развития микропроцессорной и вычислительной техники. Ее можно подробно описать лишь при рассмотрении трех взаимосвязанных законов – Мура, Деннарда и Амдахла.

Закон Мура используется в полупроводниковой индустрии более 50 лет, определяя долгосрочное планирование и цели для исследований и развития. К настоящему времени его действие находится на завершающем этапе. Закон масштабирования Деннарда гласит: с уменьшением размера транзисторов уменьшается потребляемая мощность, при этом меньшие транзисторы работают быстрее, в результате повышается тактовая частота процессора и пропорционально повышается его производительность. Таким образом, закон Деннарда соотносит масштабирование с производительностью, что определяет долгосрочный прогресс в развитии микропроцессорной и вычислительной техники. Законы Мура и Деннарда связаны с миниатюризацией, но если закон Мура определяет только повышение степени интеграции при миниатюризации, то закон Деннарда расширяет закон Мура, связав масштабирование с повышением производительности. Эти два закона определили, что постоянно уменьшающийся размер транзистора (технологический фактор) стал главным показателем прогресса в индустрии микропроцессорной техники. Однако, если закон Мура работает уже более 50 лет, и только к настоящему времени предсказывается окончание его действия, то закон Деннарда перестал выполняться в полной мере к 2016 г., хотя количество транзисторов в ИС продолжает увеличиваться. Отсюда нет результирующего улучшения в производительности – этот факт связан с пробоями в транзисторах малого размера и увеличенными токами утечки, что приводит к нагреву чипа и к повышенному потреблению энергии. Окончание действия закона Деннарда, которое приведет к невозможности увеличения тактовой частоты, стимулировало большинство производителей микропроцессорной техники перейти на использование многоядерных процессоров, как на альтернативный путь увеличения производительности.

В параллельных вычислениях часто применяется закон Амдахла, теоретически предсказывающий увеличение производительности при использовании многоядерных процессоров. Эти мультипроцессоры помогли поддерживать постоянный рост производительности за счет параллельных вычислений, но их использование привело к повышению потребления энергии. Кроме того, согласно анализу закона Амдахла, ускорение параллельных вычислений, в конечном счете, ограничено, и они не смогут решить всех проблем после окончания действия закона Мура. Получение оптимальных характеристик многоядерных процессоров потребует дальнейших исследований в развитии параллелизма и обеспечении более высокой скорости отдельных ядер.

На рис. 1 представлены графики тенденций масштабирования микропроцессорной техники.

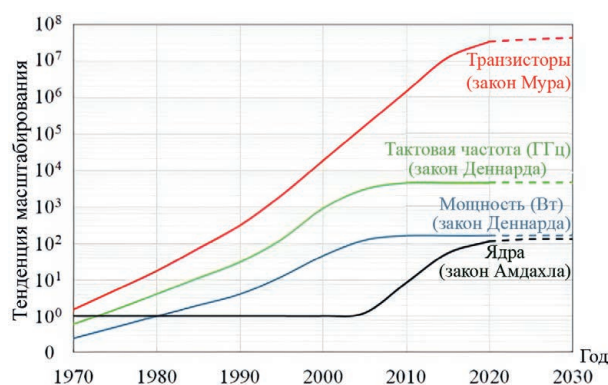


Рис. 1. Тенденции масштабирования микропроцессорной техники
Fig. 1. Trends in microprocessor technology scaling

Как видно из рис. 1, число транзисторов на кристалле (закон Мура), тактовая частота и мощность (закон Деннарда) и число ядер (закон Амдахла) возрастают начиная с 1970-х годов, но с 2020-го эти законы демонстрируют симптомы насыщения. Такая ситуация приводит к необходимости искать новые решения повышения функциональных возможностей и производительности электронных изделий. Выходом из положения является объединение электроники с совместимыми технологиями, такими как фотоника.

Объединение электроники и фотоники

Сегодня драйвер прогресса IoT – непрерывный и глобальный рост информации и рынка коммуникаций, которые требуют развития сверхскоростных (до 100 Гб/с), а, значит, и сверхширокополосных (с полосой пропускания до 100 ГГц) линий передачи данных, что невозможно обеспечить электронными средствами. Дело в том, что за последние три десятилетия, согласно законам Мура, Деннарда и Амдахла, быстродействие активных компонентов, размещенных на кремниевом кристалле, постоянно возрастало. В то же время скорость носителей в металлических проводниках, соединяющих отдельные компоненты, оставалась неизменной. В результате общее время задержки на логических элементах сопоставимо или даже превышает время переключения транзисторов, т. е. именно время соединения и обмена информацией между составляющими компонентами чипа определяет предел быстродействия «традиционных» микропроцессоров. Выходом из ситуации является оптическая передача данных внутри кремниевого кристалла. Оптические межсоединения обеспечивают скорость передачи данных около 50–100 Гбит/с, в то время как предел используемой в настоящее время медной металлизации оценивается в 20 Гбит/с. Отсюда появилась очевидная идея – эффективно объединить полупроводниковый и фотонный миры. В результате чиповая электронная индустрия начинает развивать новую гибридную область науки и техники путем интегрирования кремниевых (электронных) интегральных схем с оптическими компонентами.

Объединение полупроводникового и фотонного миров привело к созданию новой отрасли науки и техники. В зарубежной англоязычной литературе в подавляющем большинстве случаев для идентификации этой области используется термин «микроволновая фотоника» (Microwave Photonics, MWP). Однако в повседневном применении эту область называют фотоникой. Микроволновая фотоника – дисциплина, направленная на изучение физики, технологии и методов генерации, обработки и применения оптических полей, модулированных радиочастотными сигналами (с частотным диапазоном до 100 ГГц и более). Основными компонентами общей фотонной структурной схемы являются источник света (лазер), электрооптический преобразователь (модулятор), преобразователи сигналов (волноводы) и оптоэлектронный преобразователь (фотоприемник).

Этапы развития фотоники

Первичным этапом развития фотоники явилось создание устройств на основе дискретных фотонных компонентов. Здесь всегда стояли проблемы надежности традиционных дискретных оптических систем. На смену дискретной микроволновой фотонике пришла интегральная фотоника, когда активные и пассивные оптические компоненты формируются в едином технологическом процессе на одном чипе. Конечный продукт такой технологии – фотонные интегральные схемы (ФИС). Одновременно с ФИС на чипе или на пластине могут формироваться необходимые микроэлектронные компоненты и блоки. В этом случае считается, что понятие «фотоника» неадекватно отражает ситуацию. Намного корректнее такую область называть интегральной радиофотоникой, конечным продуктом которой являются радиофотонные ИС (РФИС). В случае, когда РФИС интегрированы с изделиями микроэлектроники, имеет смысл использовать термин «радиофотонные системы».

Фундаментальные преимущества интегральной радиофотоники:

- сверхмалые потери при передаче сигналов;
- возможность передачи сверхширокополосных сигналов, вплоть до терагерц;
- высокая скорость передачи данных (сегодня – 100х, завтра – 1000х);
- управляемость и контролируемость процессов;
- помехозащищенность (устойчивость к внешним электромагнитным излучениям).

Интегральный подход позволяет обеспечивать малые мощность и цену, низкую задержку, увеличенную плотность полосы частот и улучшенные рабочие характеристики информационных систем, что необходимо для удовлетворения требований взрывообразного роста данных и трафика данных. Согласно зарубежным источникам, пик инвестиций в развитие дискретных технологий фотоники пройден, в настоящее время усилия концентрируются на интегральной радиофотонике.

Технологические платформы фотонных интегральных схем

Базовым компонентом интегральной радиофотоники являются ФИС. Технологические платформы ФИС определяются используемым материалом. Исторически первыми материалами были фосфид индия (InP), арсенид галлия (GaAs) и нитрид кремния (SiN). Они интенсивно исследовались в течение длительного времени для придания им новых функциональных возможностей. Но одновременно развивались и другие технологические платформы на основе таких материалов, как кремний (Si) или кремний на изоляторе (КНИ, которому в последнее время уделяется особое внимание), тонкие пленки нитрида лития на изоляторе (LNOI), полимеры, стекло, силикон и плазмонная фотоника. В настоящее время в основном используются две действующие технологические платформы – ФИС на основе фосфида индия и на основе кремния.

Платформа на основе фосфида индия получила наибольшее распространение, все компоненты ФИС в ней выполняются в кристалле InP. Это перспективные системы в чипе, позволяющие передавать данные с высокой скоростью, используя оптические носители, функционирующие в видимой и инфракрасной областях электромагнитного спектра (350–1650 нм), обеспечивающие комплексные функции, аналогичные электронным ИС. Наивысшую степень интеграции (2000 функций в чипе) имеет оптический трансмиттер, показавший рекордные 4.9 Tbps объема данных. Будущая интеграция с электронными схемами (драйверы, логика) расширит функциональность InP ФИС для широкого спектра приложений. Однако такая степень интеграции привела к большому размеру чипа и его высокой стоимости. В результате степень интеграции в чипе фактически не увеличилась за последние десять лет.

Платформа на основе кремния идеальна благодаря высокой развитости и экономичности КМОП-технологии производства кремниевых ИС, с которой она совместима. Кремний обладает важными оптическими свойствами в ближней инфракрасной области: он работает на длине волны 1,55 мкм, используемой в большинстве оптоволоконных телекоммуникационных системах. Базовые компоненты кремниевой фотоники – модуляторы, волноводы и фотоприемники – также могут быть созданы в кремнии по КМОП-технологии. Однако основы оптической связи требуют обеспечения возможности не только модулировать и детектировать свет, но и генерировать. Кремний не может быть использован для создания лазеров и оптических усилителей (не прямозонный полупроводник). Выход из положения – применение III–V полупроводников (InP, GaAs, SiN), которые являются прямозонными для всех длин волн, для создания III–V лазеров на кремнии. Такая гетерогенная интеграция привела к появлению термина «гибридная кремниевая фотоника», конечный продукт которой – гибридные кремниевые ИС. Эта технология является прорывной для следующих поколений ФИС и определяет размер, вес, мощность и целевые характеристики для различных приложений.

В случае гибридных кремниевых ИС лазерный источник отделен от чипа. Его нужно интегрировать с кремниевой подложкой. Но следует иметь в виду, что это приводит к высокой стоимости, сложности корпусирования и неизбежным потерям на соединениях, ограничивающим сохранение мощности. При гибридном подходе лазер может быть вне кремниевой подложки, может связываться с ней с помощью волоконного волновода или припаиваться к подложке.

Многообещающим подходом для решения проблемы повышения степеней интеграции является реализация гибридной технологии (технологии мембраны из фосфида индия InP на кремнии), основанной на использовании InP-мембраны субмикронной толщины, сформированной на кремниевой пластине. Радиофотоникой занимается множество компаний в мире, и каждая из них разрабатывает свою технологическую платформу, содержание которой в большинстве случаев не раскрывается.

Закон Мура в кремниевой фотонике

Интеграция ФИС развивается по тому же пути, что и микроэлектронная интеграция. В развитии этих двух направлений есть много схожего. На рис. 2 представлен рост степени интеграции (компонентов в чипе) радиофотонных схем с 1980 по 2020 год (и перспективы до 2030 г.). Наблюдается экспоненциальный рост степени интеграции, аналогичный закону Мура в электронике, хотя с несколько меньшим градиентом [2]. В начале века ФИС содержали десятки компонентов. Когда интеграция с лазерами и модуляторами улучшилась, соединились сотни компонентов. Наиболее сложные схемы, включающие лазеры, модуляторы, детекторы и мультиплексоры, имеют свыше тысячи компонентов в чипе (рис. 2, синие точки).



Рис. 2. Закон Мура в кремниевой фотонике
Fig. 2. Moore's law in silicon photonics

Наибольшее число компонентов в чипе, полученное до настоящего времени, равно 4096 для 64×64 -фазовой дифракционной решетки (рис. 2, красная точка). Однако с традиционной InP-технологией трудно продвигать уровень интеграции. Ожидается, что у ФИС, выполненных по технологии мембраны из фосфида индия на кремнии, будет обеспечена большая степень интеграции.

Основные проблемы оптических компонентов

В кремниевой фотонике не предусматриваются уровни интеграции, достигнутые ранее в цифровой микроэлектронике. Оптические компоненты обладают фундаментальным ограничением на размеры, которое диктуется дифракционным пределом. Электроны характеризуются длиной волны порядка нескольких нанометров, а фотоны – нескольких микрометров. В этом смысле фотоника схожа с аналоговой и радиочастотной СВЧ-электроникой, у которых степень интеграции тоже значительно ниже, чем в цифровой электронике.

Приборы волновой фотоники всегда будут больше по размеру, чем микроэлектронные, и могут производиться на фабриках, не требующих передовых микроэлектронных технологий. Микроэлектроника и фотоника – две разные технологии, поэтому имеет смысл держать их отдельно. В фотонике стоит задача разработки технологий и конструкций оптических компонентов с целью минимизации их размеров. Кроме больших размеров, оптические компоненты характеризуются низкой температурной стойкостью. Фундаментальная проблема при создании ФИС – изготовление проводников и волноводов с малыми потерями.

Наиболее перспективным подходом для решения проблем уменьшения размеров фотонных компонентов представляется использование поверхностных плазмонов. Они распространяются вдоль границы раздела проводник/диэлектрик и характеризуются более короткими длинами волн и высокой локализацией электромагнитного поля. Это позволяет достичь характерных размеров порядка 100 нм, что сравнимо с размерами электронных компонентов в современных микросхемах, и создать действительно наноразмерные приборы. Кроме того, фотонные компоненты на поверхностных плазмонах обладают повышенной температурной стойкостью. Исключительным материалом для плазмонных приборов является графен – гексагональная сетка из атомов углерода толщиной в один атом. Он обладает уникальными электрическими, оптическими, механическими и тепловыми свойствами. Важно, что все основные строительные блоки переднего конца архитектуры ФИС могут быть реализованы с использованием графеновой плазмоники, включая переключатели, фазовращатели, фильтры с низкой полосой пропускания или модуляторы и фотоприемники.

Компонентная база кремниевой фотоники

Ранее значительные исследования и разработки концентрировались на создании «строительных блоков» – компонентов схем, необходимых для повышения их функциональности. К таким блокам относятся активные и пассивные компоненты, а также электронные схемы.

Активные компоненты – это оптические компоненты кремниевых ФИС:

- гибридные инжекционные полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью (Distributed Feedback Laser, DFB), электроны генерируют фотоны;
- полупроводниковые оптические усилители на чипе (Semiconductor SOAs);

– полупроводниковый светодиод на чипе (Semiconductor LED-SLED) – высокая мощность, низкая когерентность; Si/Ge фотодетекторы (PD) – детектирующие нормально падающий свет (Normal-Incidence Photodetector, NIPD); волноводные PD, лавинные PD – фотоны генерируют электроны;

– кремниевые модуляторы: Mach-Zehnder-модуляторы, микрокольцевые модуляторы – электроны контролируют фотоны.

Пассивные компоненты (к ним укрупненно отнесены основные компоненты): мультиплексоры/демультиплексоры (MUX/DEMUX), оптические фильтры, разветвители/сумматоры (планарные волноводы), системы ввода/вывода оптического излучения в волноводы (Coupling I/O), интерферометры/переключатели, разнообразные поляризаторы. Основной пассивный компонент – планарный волновод, который выполняет следующие функции: управление распространением света, перенос информации фотонами, распространение света → поглощение, ограничение предельного быстродействия скоростью света в среде (оптический переключатель).

Электронные схемы включают резисторы, конденсаторы, драйверы модуляторов, контроллеры.

Сегодня для повышения функциональности схем ведутся разработки таких компонентов, как источники света, электрооптические модуляторы, фотоприемники и т. д. Среди источников света, создаваемых в настоящее время, можно выделить следующие типы:

– монолитные интегральные III-V/ViCMOS-лазеры, работающие при высоких температурах (выше 85 °C). В Физическом институте имени П. Н. Лебедева РАН разрабатывается GaN-лазер на квантовых точках на кремниевой подложке, обладающий малыми размерами и высокой температурной стойкостью;

– монолитные интегральные III-V/ViCMOS-лазеры с внутренней модуляцией; применяя их, можно исключить модулятор из радиофотонной схемы;

– полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором (VCSEL) для использования в 3D-схемах;

– широкополосный (белый) источник света для восприятия. В БГУИР разработан и прошел практическую проверку источник некогерентного света на основе наноструктурированного кремния с внутренним модулятором.

Требования к минимизации фотонных элементов вынуждают критически относиться к выбору типа электрооптического модулятора. На практике чаще всего разрабатывают и используют нерезонантные модуляторы, такие как Mach-Zehnder-интерферометры. Они имеют типичные размеры в миллиметровой области и обычно применяются в Telecom/Datacom-приложениях. Перспективным является кремний/графен Mach-Zehnder-модулятор. Разработаны устройства с полосой пропускания 30 ГГц и эффективностью модуляции 15 дБ на 10 В. В то же время резонантные модуляторы (например, кольцевые резонаторы) могут иметь размеры в несколько десятков микрон, что позволяет использовать их в ФИС в качестве электрооптических модуляторов.

Большой интерес представляет высокоскоростной лавинный фотодиод, который представлен в работе Бартоло Переса (Калифорнийский университет) “High Sensitivity Avalanche Photodetectors for Low-Light Detection and Imaging”. В Беларуси такой фотоприемник разработан и серийно выпускается ОАО «Интеграл». Наличие фотодиодов и фотодетекторов, выполняемых по одной технологии, позволяет создать реальную фотонную систему.

Области применения кремниевой фотоники

Кремниевая радиофотоника вместе с оптическими трансиверами заняла значительную нишу в областях связи и обработки данных. Основное ее применение – для иммунологического анализа, который появился в 2020 г. В том же году кремниевая радиофотоника вышла на автомобильный рынок с LiDAR (Light Detection and Ranging) и волоконно-оптическими гироскопами. Ожидается, что другие области применения кремниевой радиофотоники появятся в ближайшие годы – это носимые устройства, например, умные часы, фотонные вычисления в искусственном интеллекте, квантовые вычисления, а также оптические межсоединения в дезагрегированных центрах обработки данных. Расширяется применение кремниевой радиофотоники и в области построения 5G-систем. В табл. 1 представлены прогнозные показатели рынка различных фотонных технологий до 2030 г.¹

¹ Photonics Market Size, Trends & Opportunities, 2024–2030. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/photonics-market-size-trends-opportunities-ug5yf> (Accessed 26 February 2024).

Таблица 1. Прогноз рынка различных технологий радиофотоники до 2030 года
Table 1. Market forecast for various radiophotonics technologies until 2030

Область применения фотоники / Application area of photonics	Прогнозный показатель, млрд долл. / Forecast figure, billion dollars
5G-системы	4–10
Дисплейные технологии	5–20
Автомобильная промышленность (LiDAR)	20–50
3D-оптическое зондирование	2–5
Биофотонное зондирование	2–5
Медицинская электроника	5–10
Приборостроение	1–3
Волоконно-оптическая связь	40–60
Воспроизводительные вычисления / искусственный интеллект	10–20
Создание центров обработки данных	20–30

Согласно табл. 1, самый большой рынок будут иметь автомобильная промышленность (применение LiDAR) – 20–50 млрд долл., трансиверы для центров обработки данных (20–30 млрд долл.) и волоконно-оптическая связь (40–60 млрд долл.). Очевидно, что первых два обозначенных приложения должны явиться предметом первостепенного внимания разработчиков ОАО «Интеграл».

Заключение

Волновая фотоника – хорошо отработанная технология и рынок для оптических трансиверов. Начиная с 2020 года, появился ряд новых важных приложений фотоники, таких как LiDAR для автомобильного и промышленного применения. Учитывая достигнутый технологический уровень ОАО «Интеграл» в области микроэлектроники, нужно рассматривать, как перспективу для него, развитие кремниевой радиофотоники. В частности, большую перспективу представляют LiDAR для автомобильного и промышленного применения, биосенсоры, бытовая электроника (умные часы), квантовые вычисления. Необходимо создание отечественной компонентной базы (сначала дискретной, затем – интегральной) с последовательным освоением технологий как в области более низких частот, так и в области высокочастотных диапазонов. Работы следует проводить в тесном сотрудничестве с предприятиями и организациями Российской Федерации.

Список литературы

1. Лабунов В. А. Влияние постоянного магнитного поля на электроосаждение меди / В. А. Лабунов [и др.] // Доклады Академии наук СССР. 1990. Т. 311, № 1. С. 139–142.
2. Thulen, L. A Moores Law for Photonics / L. Thulen // Proceedings of International Symposium on Biophotonics, Nanophotonics and Metamaterials. 2006. P. 252–259.

References

1. Labunov V. A., Danilyuk F. L., Kurmashev V. I., Matyushkov F. L. (1990) Influence of Constant Magnetic Field Upon Copper Electrodeposition. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 311 (1), 139–142 (in Russian).
2. Thulen L (2006) A Moores Law for Photonics. *Proceedings of International Symposium on Biophotonics, Nanophotonics and Metamaterials*. 252–259.

Сведения об авторе

Лабунов В. А., академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., науч. рук. науч.-исслед. лаб. «Интегрированные микро- и наносистемы», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-21-21
E-mail: labunov@bsuir.by
Лабунов Владимир Архипович

Information about the author

Labunov V. A., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Scientific Director of the Research Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-21-21
E-mail: labunov@bsuir.by
Labunov Vladimir Arkhipovich