
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. Батура, 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

Фам В. Т., Подрябинкин Д. А., Чубенко Е. Б., Борисенко В. Е. Мемристорный эффект в слоистых пленочных структурах.....	5
Лазарук С. К., Райченко Т. Ф., Томашевич Л. П., Лашковская Е. И., Повжик А. А., Гапоненко Н. В. Формирование антиотражающих покрытий на основе наноструктурированного алюминия и слоя ксерогеля титаната бария	14
Пилипенко В. А., Солодуха В. А., Сергейчик А. А., Шестовский Д. В. Влияние рекристаллизации механически нарушенного слоя с рабочей стороны кремниевой пластины на электрические параметры КМОП интегральных микросхем.....	21

Близнюк Л. А., Петроченко Т. П., Летко А. К., Каско В. И. Получение и исследование гибридных структур на основе перовскитоподобных материалов	28
Минчук В. С., Перхунова А. Ю., Федоринчик М. П., Дежкунов Н. В. Оценка активности кавитации по кавитационному шуму в различающихся частотных диапазонах	36
Колосов С. В., Шатилова О. О. Гиро-ЛБВ-умножитель частоты	44
Гейстер С. Р., Цяньлань Хуан. Анализ различий сигнала, отраженного от самолета, и имитирующей помехи в приложении к защите радиолокационных станций.....	52
Гринкевич А. В., Иванец В. В., Орабей М. С., Денис А. А. Анализ методов сверхразрешения применительно к радиолокатору подповерхностного зондирования для обнаружения скрытых объектов	61
Volcheck V. S., Stempitsky V. R. Performance Characteristics of an Infrared Photo Detector Using Intersubband Junctions in Quantum Wells Based on Gallium Nitride (Волчѣк В. С., Стемпицкий В. Р. Эксплуатационные характеристики инфракрасного фотодетектора, использующего межподзонные переходы в квантовых ямах на основе нитрида галлия).....	69
Vishniakou U. A., YiWei Xia. IT Parkinson's Disease Diagnostics Based on the Freezing of Gait Analysis Using Long Short Term Memory Neural Network (Вишняков В. А., Ивэй Ся. IT-диагностика болезни Паркинсона, основанная на анализе замедления движений пациента с использованием LSTM нейронной сети)	76
Di Zhao, Yi Tang, Gourinovitch A. B. Effective Algorithm for Biomedical Image Segmentation (Ди Джао, И Тан, Гуринович А. Б. Эффективный алгоритм сегментации биомедицинских изображений).....	84
Краснопрошин Д. В., Вашкевич М. И. Метод распознавания эмоций в речевом сигнале с использованием машины опорных векторов и надсегментных акустических признаков.....	93
Кураев А. А., Матвеев В. В. Красное смещение и постоянная затухания энергии фотона в вакууме	101
Четыркина З. Н. О лакунах в порядках полных групп изометрий и гомотетий в специализированных римановых пространствах и метрики самых подвижных этих пространств первых шести лакунарностей	106

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Подписано в печать 28.05.2024. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 11,2. Тираж 77 экз. Заказ 79.

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

Pham V. T., Podryabinkin D. A., Chubenko E. B., Borisenko V. E. Memristor Effect in Layered Film Structures.....	5
Lazarouk S. K., Raichenok T. F., Tomashevich L. P., Lashkovskaya E. I., Povzhik A. A., Gaponenko N. V. Formation of Anti-Reflection Coatings Based on Nanostructured Aluminum and Barium Titanate Xerogel Layer	14
Pilipenka U. A., Saladukha V. A., Siarheichyk H. A., Shestouski D. U. Impact Produced by Recrystallization of Mechanically Destroyed Layer on Planar Side of Silicon Wafer Upon Electrical Parameters of CMOS Microcircuits	21
Bliznyuk L. A., Petrochenko T. P., Letko A. K., Kasko V. I. Preparation and Investigation of Hybrid Periodic Structures Based on Perovskite-Like Materials.....	28
Minchuk V. S., Perhunova A. Y., Fedorinchik M. P., Dezhkunov N. V. Assessment of Cavitation Activity by Cavitation Noise in Different Frequency Ranges	36
Kolosov S. V., Shatilova O. O. Gyro-TWT Frequency Multiplier.....	44
Heister S. R., Qianlan Huang. Analysis of Differences in the Signal Reflected from an Aircraft and Simulated Interference in an Application to Radar Protection.....	52

Grinkevich A. V., Ivanets V. V., Orabei M. S., Denis A. A. Analysis of Superresolution Methods in the Application to the Subsurface Sounding Radar for Detecting Hidden Objects	61
Volcheck V. S., Stempitsky V. R. Performance Characteristics of an Infrared Photodetector Using Intersubband Junctions in Quantum Wells Based on Gallium Nitride	69
Vishniakou U. A., YiWei Xia. IT Parkinson’s Disease Diagnostics Based on the Freezing of Gait Analysis Using Long Short Term Memory Neural Network.....	76
Di Zhao, Yi Tang, Gourinovitch A. B. Effective Algorithm for Biomedical Image Segmentation	84
Krasnoproshin D. V., Vashkevich M. I. Speech Emotion Recognition Method Based on Support Vector Machine and Suprasegmental Acoustic Features.....	93
Kurayev A. A., Matveyenka V. V. Redshift and Photon Energy Attenuation Constant in Vacuum	101
Chetyrkina Z. N. On Gaps in the Orders of Complete Groups of Isometry and Homoteties in Specialized Riemannian Spaces and Metrics of the Most Mobile of These Spaces of the First Six Lacunars	106

Responsible Secretary T. Mironenka

Signed for printing 28.05.2024. Format 60×84 ¼. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.
Ed.-pr. l. 13,25. Ed.-ed. l. 11,2. Edition 77 copies. Order 79.

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



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-5-13>

Оригинальная статья

Original paper

УДК 538.91, 539.143.5

МЕМРИСТОРНЫЙ ЭФФЕКТ В СЛОИСТЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ

В. Т. ФАМ, Д. А. ПОДРЯБИНКИН, Е. Б. ЧУБЕНКО, В. Е. БОРИСЕНКО

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

Поступила в редакцию 18.12.2023

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

Аннотация. Предложены эквивалентные электрические схемы многослойных пленочных структур с мемристорным переключением сопротивления на межслойных границах и на границах кристаллических зерен в каждом слое. Численное моделирование вольт-амперных характеристик таких структур показало, что их типичный для мемристоров петлеобразный вид трансформируется в линейную омическую зависимость общего тока от величины приложенного внешнего напряжения по мере увеличения как количества слоев, так и количества зерен в каждом слое. Установлено определенное сочетание количества слоев и зерен в слое, при котором максимальный протекающий через структуру общий ток и отношение сопротивлений в «выключенном» и «включенном» состояниях достигают наибольших значений.

Ключевые слова: мемристор, моделирование, слоистая пленка, эквивалентная схема, вольт-амперная характеристика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы признательны А. Л. Данилюку за полезное обсуждение предложенной модели и результатов расчетов по ней. Работа выполнена в рамках проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Ф22-114.

Для цитирования. Мемристорный эффект в слоистых пленочных структурах / В. Т. Фам [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-5-13>.

MEMRISTOR EFFECT IN LAYERED FILM STRUCTURES

VAN T. PHAM, DENIS A. PODRYABINKIN, EUGENE B. CHUBENKO,
VICTOR E. BORISENKO

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

Submitted 18.12.2023

Abstract. Equivalent electrical circuits of multilayer film structures with memristor switching of resistance at interlayer boundaries and at the boundaries of crystal grains in each layer are proposed. Numerical modeling of the current-voltage characteristics of such structures has shown that their loop-shaped form, typical of memristors, is transformed into a linear ohmic dependence of the total current on the magnitude of the applied external voltage as both the number of layers and the number of grains in each layer increase. A certain combination of the number of layers and grains in a layer has been established, at which the maximum total current flowing through the structure and the ratio of resistances in the “off” and “on” states reach the highest values.

Keywords: memristor, modeling, layered film, equivalent scheme, current-voltage characteristic.

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

Gratitude. The authors thank A. L. Daniluk for useful discussion of the proposed model and numerical results obtained. The work was performed within the grant of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research F22-114.

For citation. Pham V. T., Podryabinkin D. A., Chubenko E. B., Borisenko V. E. (2024) Memristor Effect in Layered Film Structures. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-5-13> (in Russian).

Введение

Мемристорный эффект, представляющий собой изменение электрического сопротивления твердотельной структуры по достижении определенного напряжения на контактах к ней, что приводит к гистерезису ее вольт-амперной характеристики (ВАХ), имеет существенный интерес для создания нового поколения ячеек памяти [1]. Размеры этих ячеек могут быть уменьшены до нанометровых величин благодаря использованию наноструктурированных тонких пленок из полупроводников. Реальная поликристалличность или блочная структура таких пленок приводит к тому, что мемристорный эффект в них может проявляться при протекании тока как в плоскости, так и перпендикулярно плоскости пленок вследствие определяющей роли в нем процессов на границах кристаллических зерен (блоков) [2–6]. При этом в пленках с выраженной слоистой структурой механизмы внутри- и межслойного переключений каналов переноса носителей заряда могут отличаться. С учетом этого предложены эквивалентные схемы таких структур и выполнены расчеты их ВАХ, которые представлены в статье.

Модель и эквивалентные схемы

Основу предлагаемых эквивалентных схем составляют разработанные авторами модельные представления о слоистой пленочной структуре [7], в рамках которых протекание тока внутри кристаллических зерен через их внутри- и межслойные границы описано линейными резистивными элементами. Учет мемристорного эффекта осуществлен заменой резисторов, соответствующих внутри- и межслойным границам, на мемристоры с гистерезисом ВАХ.

В качестве такого элемента была выбрана одномерная модель мемристора с жестким переключением, рассмотренная в [8], структурная и эквивалентная схемы которого показаны на рис. 1. Предполагается, что мемристор длиной D разделен на две области, характеризующиеся соответственно высокой (R_{ON}) и низкой (R_{OFF}) проводимостями. Граница, разделяющая эти области, способна изменять свое положение в зависимости от количества прошедшего через мемристор заряда q . Если протяженность области с высокой проводимостью w равна длине мемристора, то отношение $w/D = 1$ и проводимость мемристора полностью определяются электрическим сопротивлением этой области. При уменьшении длины области с высокой проводимостью до нуля (при $w/D = 0$) сопротивление мемристора определяется только областью с высоким сопротивлением.

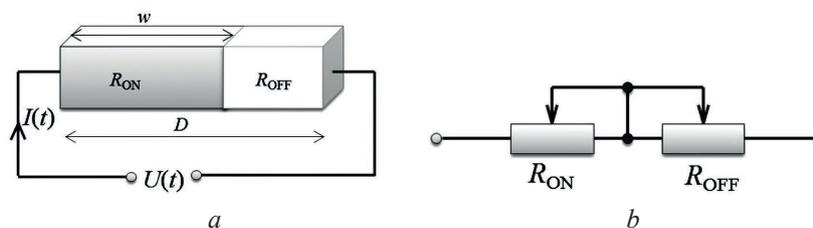


Рис. 1. Модель рабочей области мемристора (а) и его эквивалентная электрическая схема (b)
Fig. 1. Model of the active region of a memristor (a) and its equivalent electrical circuit (b)

Математическая модель рассматриваемого мемристора может быть представлена уравнениями [8]:

$$R_M(w) = R_{ON} \frac{w}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{w}{D}\right); \quad (1)$$

$$I(t) = R_M^{-1}(w)U(t), \quad (2)$$

где $R_M(w)$ – сопротивление мемристора, Ом; $I(t)$ – протекающий через мемристор ток, А; $U(t)$ – напряжение, приложенное к мемристор, В; t – время, с.

Изменение со временем длины w области высокой проводимости R_{ON} описывается уравнением

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu \frac{R_{ON}}{D} I(t), \quad (3)$$

где μ – средняя подвижность частиц, ответственных за появление мемристорного эффекта, зависящая от используемого материала пленки, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Интегрируя уравнение (3), можно получить зависимость величины w от количества прошедшего через мемристор заряда $q(t)$

$$w(t) = w_0 + \mu \frac{R_{ON}}{D} q(t), \quad (4)$$

где w_0 – постоянная интегрирования, физическим смыслом которой является начальное значение величины w ; $q(t)$ определяется по формуле

$$q(t) = \int_0^t I(t) dt. \quad (5)$$

Величина прошедшего через мемристор заряда $q(t)$ так же, как и зависимость тока $I(t)$ от времени, в общем случае не известна. Для преодоления этой неопределенности при расчете ВАХ мемристоров получено решение уравнений (1)–(3) для тока в зависимости от напряжения $U(t)$ с известной функцией изменения во времени, так как оно задается внешним источником напряжения:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R_{OFF}} \left[1 - 2 \frac{\mu}{D^2} \left(1 - \frac{R_{ON}}{R_{OFF}} \right) \frac{R_{ON}}{R_{OFF}} \int_0^t U(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что при $t = 0$ $I(0) = U/R_{OFF}$. С ростом напряжения $U(t)$ знаменатель уменьшается, обеспечивая нелинейное возрастание тока, а при приближении знаменателя к нулю с увеличением интеграла $\int_0^t U(t) dt$ происходит резкий рост тока, что качественно адекватно отражает проявление мемристорного эффекта.

Предлагаемая эквивалентная схема многослойной (на примере трехслойной) пленочной структуры, в которой мемристорное переключение сопротивления R_{M1} имеет место только на границах зерен внутри каждого слоя, представлена на рис. 2.

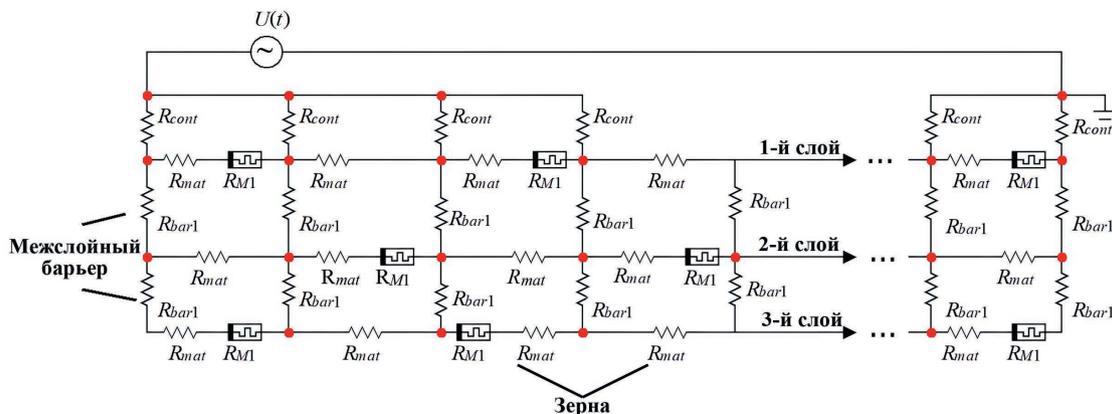


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема трехслойной пленки с мемристорным переключением сопротивления на межзеренных границах внутри каждого слоя

Fig. 2. Equivalent electrical circuit of a three-layered films with memristive switching at grain boundaries in each layer

Протекание тока через подводящие контакты, внутри кристаллических зерен и через межслойные границы контролируется соответствующими линейными резистивными элементами – R_{cont} , R_{mat} , R_{bar1} . Предполагается идентичность свойств кристаллических зерен, межзеренных

и межслоевых границ. Учтено, что кристаллические зерна в соседних слоях могут быть смещены друг относительно друга.

Для многослойной пленки с межслоевым мемристорным переключением сопротивления эквивалентная электрическая схема показана на рис. 3. Она получена заменой в предыдущей эквивалентной схеме R_{M1} на R_{bar2} и R_{bar1} на R_{M2} .

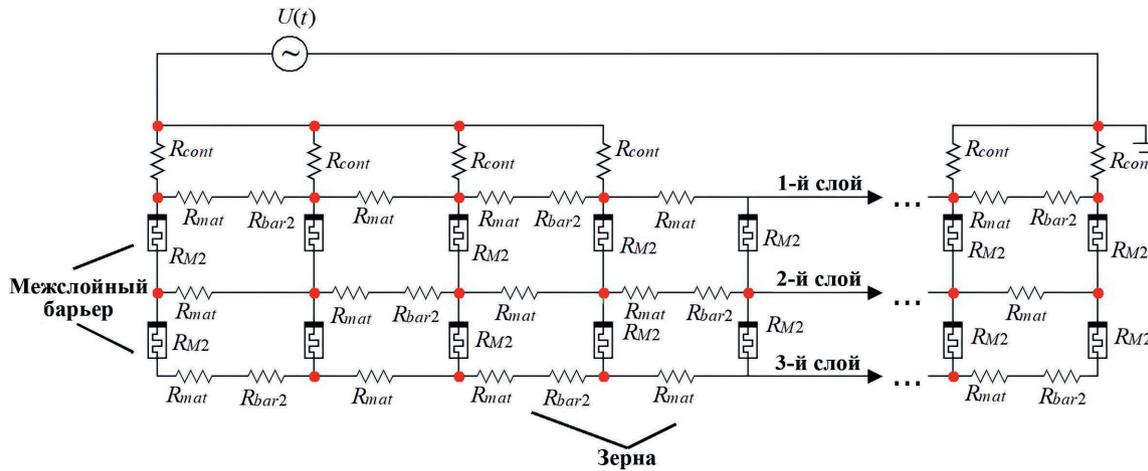


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема трехслойной пленки

с мемристорным переключением сопротивления на межслоевых границах

Fig. 3. Equivalent electrical circuit of three-layered films with memristive switching at layer boundaries

Эквивалентная схема для случая мемристорного эффекта одновременно на межзеренных и межслоевых границах получена включением дополнительных мемристорных элементов в одну из приведенных схем. Рассмотренные варианты были использованы для анализа ВАХ, регистрируемых при пропускании тока в плоскости пленки, лежащей на изолирующей подложке. Однако после переноса одного из электрических контактов к нижнему слою пленки они пригодны и для моделирования ВАХ при пропускании тока перпендикулярно плоскости пленки, лежащей на электропроводящей подложке.

Моделирование ВАХ многослойных пленок по предложенным эквивалентным схемам осуществляли в программном комплексе Micro-Cap 12. Количество слоев изменяли от 3 до 9, а количество кристаллических зерен в слое – от 15 до 30. Величины сопротивлений, представленные в табл. 1, выбирали на основе оценок электронных свойств материалов, демонстрирующих мемристорный эффект [2–6].

Таблица 1. Параметры, использованные при моделировании вольт-амперных характеристик слоистых пленочных структур

Table 1. Parameters used in modeling the current-voltage characteristics of layered film structures

R_{ON} , Ом	R_{OFF} , кОм	R_{INIT} , кОм	R_{cont} , Ом	R_{mat} , Ом	R_{bar1} , Ом	R_{bar2} , Ом
Для моделирования R_{M1}						
100	100	20	0,001	100	500	1000
Для моделирования R_{M2}						
10	10	1	0,001	100	500	1000
Примечание – R_{INIT} – начальное сопротивление мемристора, определяемое отношением w/D [9].						

Различия в величинах параметров для мемристоров R_{M1} и R_{M2} , а также R_{bar1} и R_{bar2} призваны учесть тот факт, что площадь межзеренных границ не менее чем на порядок меньше площади межслоевых границ. Расчеты выполнены для переменного внешнего напряжения $U(t) = U_0 \sin(2\pi t)$, где $U_0 = 10$ В. По рассчитанным ВАХ анализировали влияние количества слоев и количества кристаллических зерен в каждом слое на максимальный ток, протекающий в плоскости пленки, и на отношение R_{max}/R_{min} в точке ВАХ, соответствующей максимальному току. Величина этого отношения актуальна для оценки перспектив применения конкретных мемристорных структур в системах электронной цифровой обработки и хранения информации.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 4 приведены ВАХ структур, в которых мемристорное переключение сопротивления происходит только на межзеренных границах внутри каждого слоя, что учтено в эквивалентной схеме, показанной на рис. 2. В качестве примера взята семислойная пленка на изолирующей подложке, а рассчитанные ВАХ отличаются количеством кристаллических зерен в слое. Для сравнения показана и ВАХ единичного мемристора.

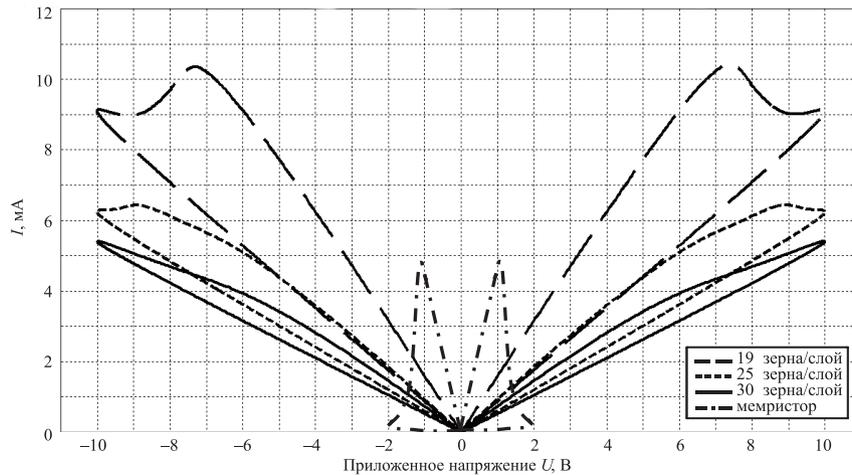


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики семислойных пленочных структур с мемристорным переключением сопротивления на межзеренных границах в зависимости от количества кристаллических зерен в каждом слое

Fig. 4. Current-voltage characteristics of seven layers films with memristive switching of resistance at crystal grain boundaries for different numbers of grains in each layer

Петлеобразный вид рассчитанных ВАХ хотя и является типичным для мемристорных структур, существенно отличается от ВАХ единичного мемристора. Переключение всей структуры из высокоомного в низкоомное состояние происходит при большем внешнем приложенном напряжении. Его величина возрастает с увеличением количества кристаллических зерен в одном слое. При этом изменяется максимальный ток, протекающий через многослойную структуру, и уменьшается ширина петли. Зависимость этих изменений одновременно от количества зерен и слоев иллюстрируют данные, приведенные на рис. 5.

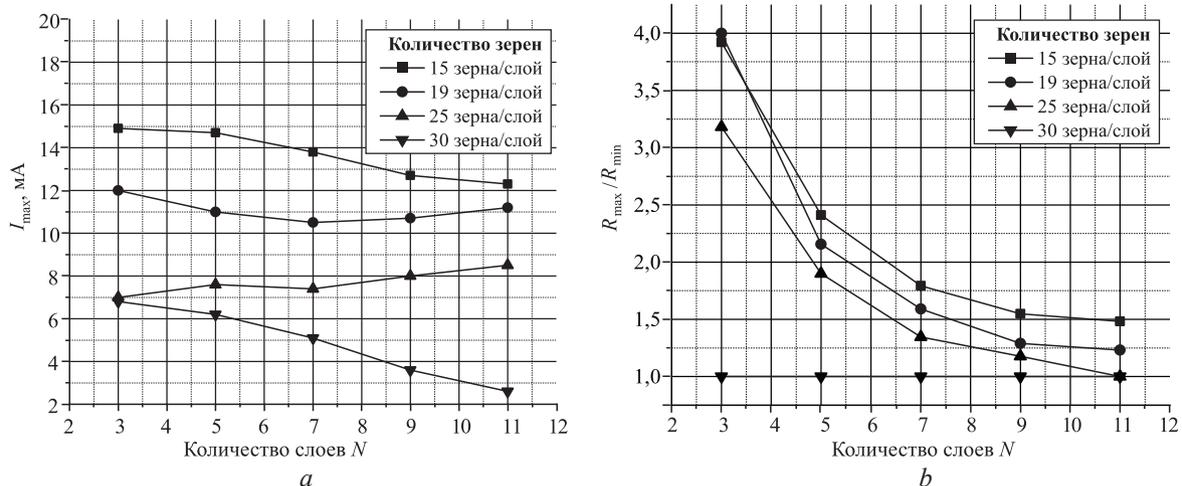


Рис. 5. Максимальный ток I_{\max} (a) и отношение R_{\max}/R_{\min} (b) в многослойных пленочных структурах с мемристорным переключением сопротивления на межзеренных границах

в зависимости от количества слоев N для различного количества кристаллических зерен в каждом слое
Fig. 5. Peak current I_{\max} (a) and the rate R_{\max}/R_{\min} (b) in multilayered film structures with memristive switching of resistance at grain boundaries as a function of number of layers N for different numbers of crystal grains in each layer

Показатели на рис. 5 сняты с ВАХ, рассчитанных для всех анализируемых сочетаний количества слоев и количества зерен в слое. Изменение максимального тока носит переменный характер. Он монотонно снижается с увеличением количества слоев при «малом» и «большом» количестве зерен в слое (соответственно 15 и 30 зерен), хотя в промежутке между этими значениями демонстрирует незначительный рост. Такие зависимости находят объяснение, если учесть конкурирующую роль параллельных каналов протекания тока, количество которых увеличивается с возрастанием количества слоев, и рост последовательно включаемых при этом сопротивлений межслойных барьеров R_{bar1} .

В отличие от закономерностей изменения максимального тока отношение R_{max}/R_{min} , характеризующее ширину петли ВАХ, монотонно уменьшается как с увеличением количества слоев, так и с возрастанием количества зерен в слое. При количестве зерен 30 и более петля вообще отсутствует ($R_{max}/R_{min} = 1$) при любом количестве слоев. К этому результату, как к асимптоте, стремятся и отношения R_{max}/R_{min} при меньших количествах зерен в слое, что свидетельствует об определяющей роли омических сопротивлений в общем токе, протекающем через многослойную структуру.

На рис. 6 представлены ВАХ структур, в которых мемристорное переключение сопротивления происходит только на межслойных границах, что отражено в эквивалентной схеме, показанной на рис. 3. В качестве примера, так же, как и в предыдущем случае, взята семислойная пленка на изолирующей подложке, а рассчитанные ВАХ отличаются количеством кристаллических зерен в слое.

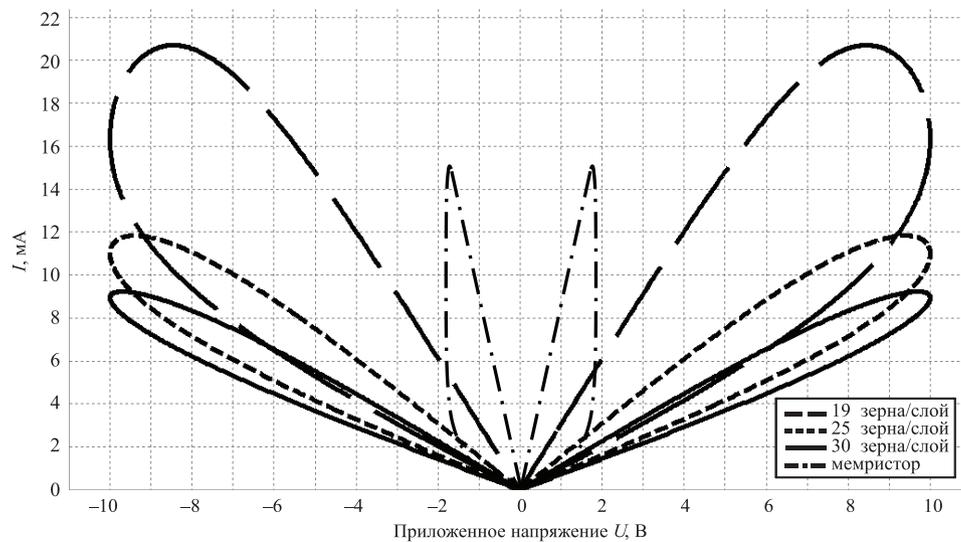


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики семислойных пленочных структур с мемристорным переключением сопротивления на межслойных границах в зависимости от количества кристаллических зерен в каждом слое

Fig. 6. Current-voltage characteristics of seven layers films with memristive switching of resistance at layer boundaries for different numbers of grains in each layer

Характерный для мемристорного переключения сопротивления петлеобразный внешний вид ВАХ сохраняется и в случае его проявления только на межслойных границах. Однако количественные характеристики такого переключения приобретают определенные особенности. Во-первых, возрастает максимальный ток, протекающий через структуру. Это объяснимо меньшими величинами мемристорных сопротивлений, использованных в расчетах, чтобы учесть то, что площадь межслойных границ больше площади межзеренных границ. Во-вторых, изменяется характер зависимостей I_{max} и R_{max}/R_{min} от количества слоев при различном количестве зерен в слое (рис. 7). Следует отметить, что эти зависимости приобретают характерные максимумы для пленок, состоящих из 7–9 слоев.

Немонотонный характер приведенных зависимостей объясняется конкуренцией между последовательно соединенными и параллельными каналами проводимости в многослойной структуре. Увеличение параллельно включенных каналов и количества слоев ведет к возрастанию максимального тока и тем большему, чем меньше количество зерен в каждом слое. При этом общий ток определяется сопротивлениями R_{max} и R_{bar2} .

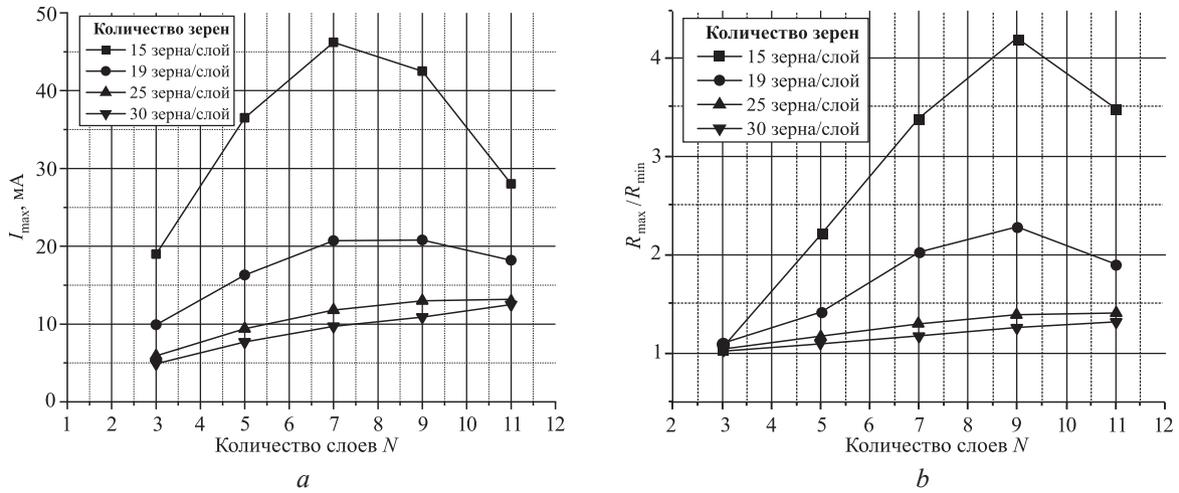


Рис. 7. Максимальный ток I_{\max} (a) и отношение R_{\max}/R_{\min} (b) в многослойных пленочных структурах с мемристормым переключением сопротивления на межслоевых границах в зависимости от количества слоев N для различного количества кристаллических зерен в каждом слое
Fig. 7. Peak current I_{\max} (a) and the rate R_{\max}/R_{\min} (b) in multilayered film structures with memristive switching of resistance at layer boundaries as a function of number of layers N for different numbers of crystal grains in each layer.

По достижении определенного количества слоев (в рассматриваемых расчетах – 7–9) основную роль, ограничивающую ток, начинают приобретать последовательно соединенные сопротивления мемристоров, включенных между слоями. Максимальный ток I_{\max} и отношение R_{\max}/R_{\min} имеют тенденцию к снижению. При этом в исследованном диапазоне изменения количества слоев и зерен в слое величина отношения R_{\max}/R_{\min} хоть и уменьшается, но своего асимптотического значения, равного единице, не достигает. Несмотря на уменьшение I_{\max} и отношения R_{\max}/R_{\min} , эти параметры остаются в динамичном состоянии, не достигая установившихся значений, что подчеркивает важность учета конкуренции между различными каналами проводимости в многослойных структурах. Таким образом, представленные результаты демонстрируют влияние структурных факторов на электрические свойства системы, открывая перспективы для дальнейших исследований в области многослойных структур с мемристормыми элементами. Одновременное проявление мемристормого переключения на межзеренных и межслоевых границах иллюстрируют ВАХ, приведенные на рис. 8.

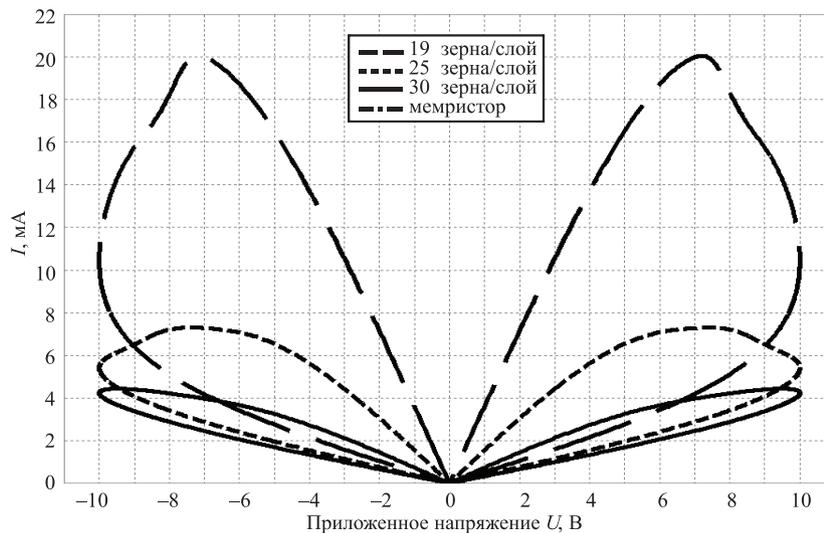


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики семислойных пленочных структур с мемристормым переключением сопротивления на межзеренных и межслоевых границах в зависимости от количества кристаллических зерен в каждом слое
Fig. 8. Current-voltage characteristics of seven layers films with memristive switching of resistance both at grains and layer boundaries for different numbers of grains in each layer

Следует отметить стабильность общей формы вольт-амперных характеристик, которая сохраняется в виде петлеобразной структуры. Это свидетельствует о консистентности эффектов в системе при изменении структурных параметров. В контексте представленных на рис. 9 зависимостей I_{\max} и R_{\max}/R_{\min} от числа слоев и зерен в слое отчетливо прослеживается близость как в качественном, так и в количественном отношении к аналогичным зависимостям, полученным при включении мемристорных элементов на границах между слоями. Результаты исследования подтверждают, что параметры структуры, такие как количество слоев и зерен, существенно влияют на электрические характеристики системы, а форма петлеобразных ВАХ остается устойчивой при варьировании этих параметров. Примечательно, что как I_{\max} , так и R_{\max}/R_{\min} в системе с мемристорами между слоями проявляют схожие зависимости с системой, включающей мемристоры на межслойных границах, подчеркивая важность структурных особенностей в формировании электрических свойств. Итак, зависимости I_{\max} и R_{\max}/R_{\min} от количества слоев и количества зерен в слое качественно и количественно ближе к аналогичным зависимостям, полученным при включении мемристорных элементов на межслойных границах.

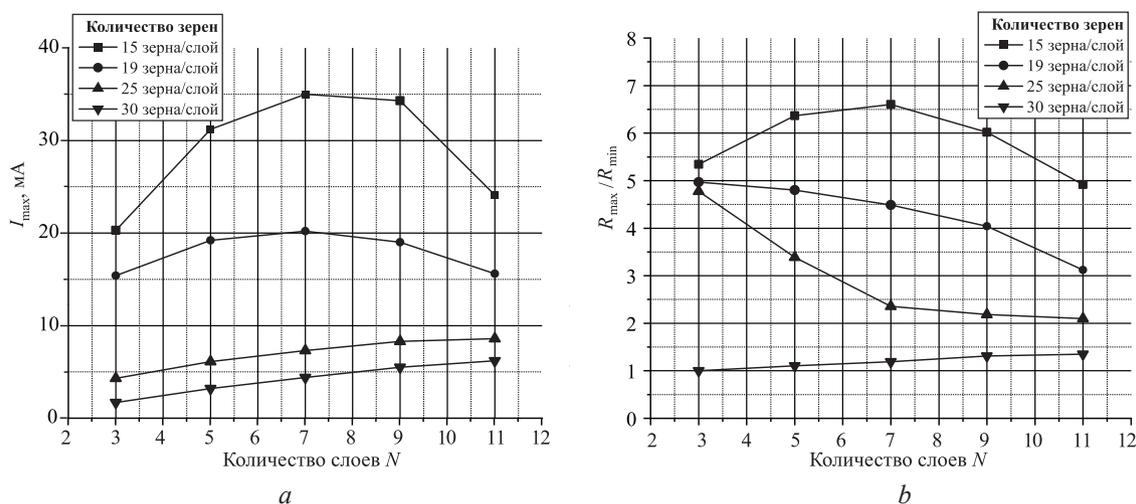


Рис. 9. Максимальный ток I_{\max} (a) и отношение R_{\max}/R_{\min} (b) в многослойных пленочных структурах с мемристорным переключением сопротивления на межзеренных и межслойных границах в зависимости от количества слоев N для различного количества кристаллических зерен в каждом слое
Fig. 9. Peak current I_{\max} (a) and the rate R_{\max}/R_{\min} (b) in multilayered film structures with memristive switching of resistance at both grain and layer boundaries as a function of number of layers N for different numbers of crystal grains in each layer

Немонотонное изменение I_{\max} и R_{\max}/R_{\min} в зависимости от количества слоев наиболее выражено для «малого» (15–19) количества зерен в слое. Это свидетельствует об определяющей роли мемристорного переключения сопротивления на межслойных границах. При больших количествах зерен ВАХ всей многослойной структуры начинает контролироваться мемристорным эффектом на межзеренных границах.

Заключение

1. Предложенные эквивалентные электрические схемы многослойных пленочных структур с кристаллическими зернами в каждом слое и моделирование их вольт-амперных характеристик позволяют обобщить некоторые закономерности проявления в них мемристорного переключения сопротивления на межзеренных и межслойных границах. Приведенные количественные оценки получены для определенных номиналов омических резисторов и мемристоров. Они актуальны для общезначимых модельных представлений, но требуют уточнения для структур из определенных материалов.

2. В результате исследований установлено, что характерный для мемристоров петлеобразный вид вольт-амперных характеристик постепенно трансформируется в линейную омическую зависимость общего тока от величины приложенного внешнего напряжения по мере увеличения количества слоев и количества зерен в слое многослойной пленочной структуры. При этом мемристорное переключение сопротивления на межслойных границах наиболее значимо проявляется

в вольт-амперных характеристиках всей структуры, поскольку площадь таких границ обычно намного больше межзеренных границ.

3. Отмечено существование определенного сочетания количества слоев и зерен в слое, обеспечивающего максимальные значения протекающего тока I_{\max} и отношения сопротивлений R_{\max}/R_{\min} , характеризующих «выключенное» и «включенное» состояния всей структуры.

Список литературы / References

1. Joshua Yang J., Feng Miao, Matthew D. Pickett, Douglas A. A. Ohlberg, Duncan R. Stewart, Chun Ning Lau, et al. (2009) The Mechanism of Electroforming of Metal Oxide Memristive Switches. *Nanotechnology*. 20 (21). DOI: 10.1088/0957-4484/20/21/215201.
2. Lei Zhang, Tian Gong, Huide Wang, Zhinan Guo, Han Zhang (2019) Memristive Devices Based on Emerging Two-Dimensional Materials Beyond Graphene. *Nanoscale*. 11 (26), 12413–12435.
3. Ki Chang Kwon, Ji Hyun Baek, Kootak Hong, Soo Young Kim, Ho Won Jang (2022) Memristive Devices Based on Two-Dimensional Transition Metal Chalcogenides for Neuromorphic Computing. *Nano-Micro Lett.* 14 (1). DOI: 10.1007/s40820-021-00784-3.
4. Sabeen F., Hakim M. W., Akinwande D., Rizwan S. (2022) Graphene and MXene Based Free-Standing Carbon Memristors for Flexible 2D Memory Applications. *Adv Elect Materials*. 8 (1).
5. Da Li, Bin Wu, Xiaojian Zhu, Juntong Wang, Byunghoon Ryu, Wei D. Lu, et al. (2018) MoS₂ Memristors Exhibiting Variable Switching Characteristics Toward Biorealistic Synaptic Emulation. *ACS Nano*. 12 (9), 9240–9252. DOI: 10.1021/acsnano.8b03977.
6. Ascoli A., Menzel S., Rana V., Kempen T., Messaris I., Demirkol A. S., et al. (2022) A Deep Study of Resistance Switching Phenomena in TaO_x ReRAM Cells: System-Theoretic Dynamic Route Map Analysis and Experimental Verification. *Adv Elect Materials*. 8 (8).
7. Van Tung Pham, Chubenko E. B., Borisenko V. E. (2023) Resistor Model of Layered Film Structures. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-14-20> (in Russian).
8. Xiaojun Wang, Bai Sun, Xiaoxia Li, Bolin Guo, Yushuang Zeng, Shuangso Mao, et al. (2018) Influence of the Voltage Window on Resistive Switching Memory Characteristics Based on g-C₃N₄ Device. *Ceramics International*. 44 (15), 18108–18112. DOI:10.1016/j.ceramint.2018.07.016.
9. Biolek Z., Biolek D., Biolková V. (2009) *SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift*. 18 (2), 210–214.

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Фам В. Т., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Подрябинкин Д. А., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

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

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

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-75
E-mail: v.tu2103@gmail.com
Фам Ван Тунг

Information about the authors

Pham V. T., Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Podryabinkin D. A., Cand. of Sci., Senior Researcher at 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

Borisenko V. E., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, 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 17 293-88-75
E-mail: v.tu2103@gmail.com
Pham Van Tung



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-14-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.357.74-022.532:669.056.91

ФОРМИРОВАНИЕ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ И СЛОЯ КСЕРОГЕЛЯ ТИТАНАТА БАРИЯ

С. К. ЛАЗАРУК¹, Т. Ф. РАЙЧЕНОК², Л. П. ТОМАШЕВИЧ¹, Е. И. ЛАШКОВСКАЯ¹,
А. А. ПОВЖИК³, Н. В. ГАПОНЕНКО¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

³ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 20.11.2023

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

Аннотация. Выполнены исследования по формированию антиотражающих покрытий на основе пористого алюминия, полученного методом электрохимического анодного травления, и нанесенного на его поверхность слоя ксерогеля титаната бария. Толщина пористого алюминия составила от 15 до 100 мкм. Анализ спектров отражения полученных структур показал эффективные антиотражающие свойства сформированных покрытий с коэффициентом зеркального отражения 0,25–2,50 % в диапазоне 200–1100 нм. Применение сформированных покрытий с низким коэффициентом отражения возможно в авиастроении, электронике и энергетике.

Ключевые слова: электрохимическое анодирование, пористый алюминий, хлорид натрия, ксерогель титаната бария, антиотражающие свойства.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № X23M-044.

Для цитирования. Формирование антиотражающих покрытий на основе наноструктурированного алюминия и слоя ксерогеля титаната бария / С. К. Лазарук [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22. № 3. С. 14–20.
<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-14-20>

FORMATION OF ANTI-REFLECTION COATINGS BASED ON NANOSTRUCTURED ALUMINUM AND BARIUM TITANATE XEROGEL LAYER

SERGUEI K. LAZAROUK¹, TAMARA F. RAICHENOK², LEONID P. TOMASHEVICH¹,
EKATERINA I. LASHKOVSKAYA¹, ALEXANDER A. POVZHIK³, NIKOLAI V. GAPONENKO¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²State Scientific Institution B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

³OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20.11.2023

Abstract. The research has been carried out on the formation of anti-reflection coatings based on porous aluminum obtained by electrochemical anodic etching and a layer of barium titanate xerogel deposited on its surface. The thickness of the porous aluminum ranged from 15 to 100 microns. Analysis of the reflection spectra of the

resulting structures showed effective anti-reflection properties of the formed coatings with a specular reflection coefficient of 0.25–2.50 % in the range of 200–1100 nm. The use of formed coatings with a low reflectance coefficient is possible in aircraft manufacturing, electronics and energy.

Keywords: electrochemical anodizing, porous aluminum, sodium chloride, barium titanate xerogel, anti-reflective properties.

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 X23M-044.

For citation. Lazarouk S. K., Raichenok T. F., Tomashevich L. P., Lashkovskaya E. I., Povzhik A. A. Gaponenko N. V. (2024) Formation of Anti-Reflection Coatings Based on Nanostructured Aluminum and Barium Titanate Xerogel Layer. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-14-20> (in Russian).

Введение

Алюминий является наиболее распространенным металлом, по наличию в земной коре он уступает только кислороду и кремнию. Сплавы на основе алюминия широко используются в авиастроении, электронике и энергетике. При этом возникает задача формирования антиотражающих покрытий на алюминиевой поверхности. В частности, в авиастроении это необходимо при разработке стелс-технологии, в микроэлектронике они формируются на поверхности алюминиевых пленок для подавления бликов в процессе операций фотолитографии, в энергетике – при изготовлении солнечных тепловых коллекторов. Также изменение отражения на поверхности алюминия в сочетании с нанесением люминесцентных пленок может быть использовано в технологии защиты изделий от подделок. Для формирования антиотражающих покрытий на поверхности алюминия рассматривались конусообразные наноструктуры оксида алюминия [1, 2], наночастицы оксида алюминия, получаемые лазерной абляцией алюминиевых мишеней [3], пленки нитрида алюминия [4]. Однако известные методы формирования таких покрытий на алюминии имеют ограничение по уровню поглощения оптического сигнала и диапазону длин волн поглощения [1–5]. Следует отметить, что если процесс анодного пористого окисления алюминия интенсивно исследуется [7–9], то анодное пористое травление алюминия недостаточно изучено. Известны лишь единичные сообщения о процессе травления без исследования формируемой структуры.

В статье предложен метод формирования антиотражающего покрытия на алюминиевой поверхности, основанный на наноструктурировании алюминия с последующим нанесением слоя ксерогеля $\text{BaTiO}_3\cdot\text{Eu}$.

Проведение экспериментов

Эксперименты по формированию пленок пористого алюминия проводили на образцах из алюминиевой фольги толщиной 500 мкм, чистотой 99,7 %, площадью 1 см². В качестве электролита использовали 1%-ный раствор хлорида натрия.

После предварительной обработки поверхности алюминиевой фольги спиртосодержащим раствором выполняли формирование пористого алюминия в двухэлектродной электрохимической ячейке. Ячейка состояла из фторопластового (тефлонового) цилиндра, который при помощи уплотнительного резинового кольца прижимался к анодируемому образцу. Образец находился на металлическом (алюминиевом) аноде-держателе. Для формирования пористого алюминия использовали катод из титановой фольги, который располагался внутри фторопластового цилиндра. Анодирование проводили в гальваностатическом режиме при плотности тока $J_f = 200 \text{ mA/cm}^2$. Время анодирования – от 5 до 30 мин.

Пленкообразующий золь титаната бария, содержащий европий, готовили с использованием ранее разработанной методики на основе ледяной уксусной кислоты (CH_3COOH) и ацетилацетона ($\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{COCH}_3$) с объемным соотношением 4:1, с добавлением изопропоксида титана ($\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$), ацетата бария ($\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) и гидрата ацетата европия ($\text{Eu}(\text{CH}_3\text{COO})_3\cdot x\text{H}_2\text{O}$) [6]. Концентрация оксидов в получившемся растворе составила 61,2 мг/мл титаната бария BaTiO_3 и 1,5 мг/мл оксида европия (III) Eu_2O_3 .

Для получения однослойных образцов $\text{BaTiO}_3\cdot\text{Eu}$ золь титаната бария наносили центрифугированием на подложки пористого алюминия, затем образцы сушили в сушильном шкафу при тем-

пературе 200 °С в течение 10 мин, после чего отжигали при 450 °С в течение 30 мин. Спектры отражения измеряли на спектрофотометре МС 122 (СООО «Проскан специальные инструменты», Беларусь).

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе экспериментов были сформированы пленки пористого алюминия толщиной от 15 до 100 мкм (рис. 1, *a, b*). Анализ образцов с помощью растрового электронного микроскопа показал, что полученные пленки действительно имеют пористую структуру, диаметр пор варьируется от 0,8 до 2,0 мкм, минимальный размер алюминиевого «скелета» – 50 нм (рис. 1, *c, d*).

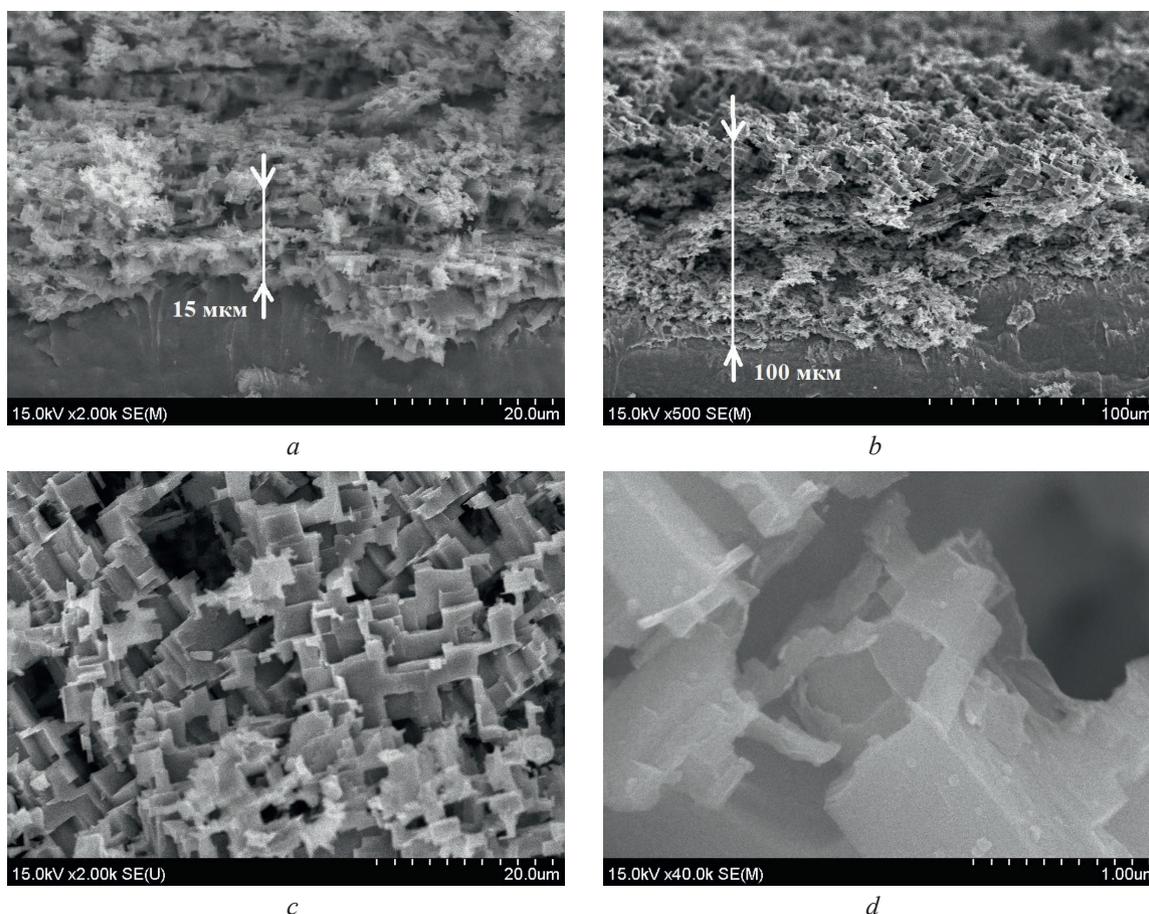


Рис. 1. РЭМ-изображения образцов, полученных в гальваностатическом режиме при разных плотностях тока в 1%-ном водном растворе хлорида натрия:
a, b – пористый слой толщиной 15 и 100 мкм соответственно;
c, d – поперечное сечение пористой структуры с увеличением 2 и 40 тыс. крат
Fig. 1. SEM images of samples obtained in galvanostatic mode at different current densities in a 1 % aqueous solution of sodium chloride:
a, b – porous layer with a thickness of 15 and 100 μm , respectively;
c, d – cross section of the porous structure with magnification of 2 and 40 thousand times

Результаты рентгеноспектрального анализа сформированных пористых пленок изображены на рис. 2. Из рисунка видно, что пористая пленка в основном состоит из алюминия (83 ат.%), также в ней присутствуют примесные элементы – углерод (10 ат.%) и кислород (7 ат.%).

Спектры отражения сформированных образцов приведены на рис. 3, 4. Кривая 0 относится к исходной подложке без анодирования, кривые 1, 2, 3 – к образцам, подвергавшимся анодированию в течение 5, 20 и 30 мин соответственно, кривые 4, 5, 6 – к образцам, подвергавшимся анодированию в течение 5, 20 и 30 мин и покрытых одним слоем ксерогеля $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$. Отражение чистой исходной подложки алюминия без анодирования увеличивается во всем диапазоне длин волн от 6–7 % при 200 нм до 25 % при 940 нм.

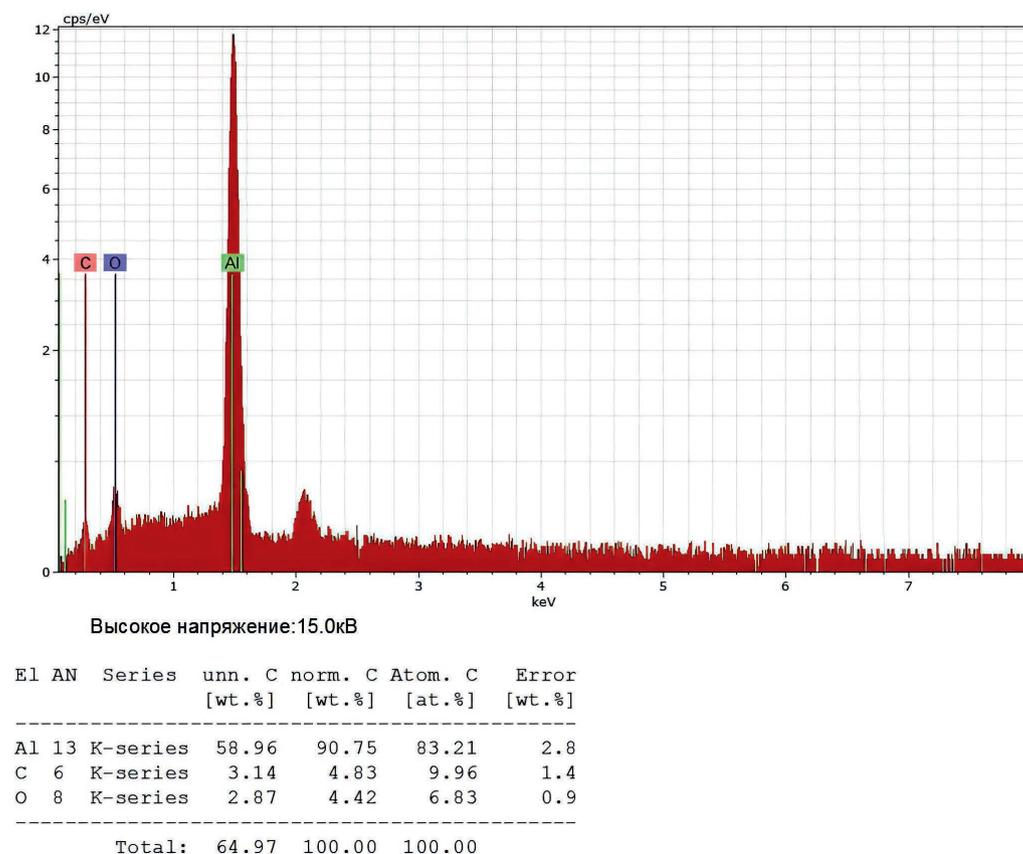


Рис. 2. Рентгеноспектральный анализ пленок пористого алюминия
Fig. 2. EDX analysis of porous aluminum films

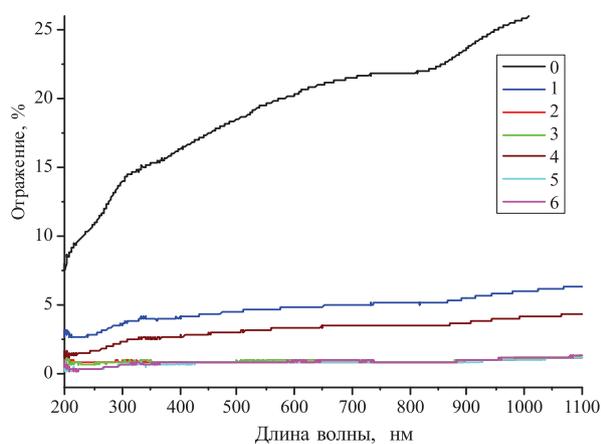


Рис. 3. Спектры отражения образцов пористого алюминия, полученных в процессе анодирования: 1, 2, 3 – в течение 5, 20 и 30 мин соответственно; 4, 5, 6 – в течение 5, 20 и 30 мин соответственно с осажденным слоем ксерогеля BaTiO₃:Eu; 0 – образец чистого непроаноцированного алюминия
Fig. 3. Reflection spectra of porous aluminum samples obtained during anodization:

1, 2, 3 – for 5, 20 and 30 min, respectively;
4, 5, 6 – for 5, 20 and 30 min, respectively, with a deposited layer of BaTiO₃:Eu xerogel;
0 – sample of pure non-anodized aluminum

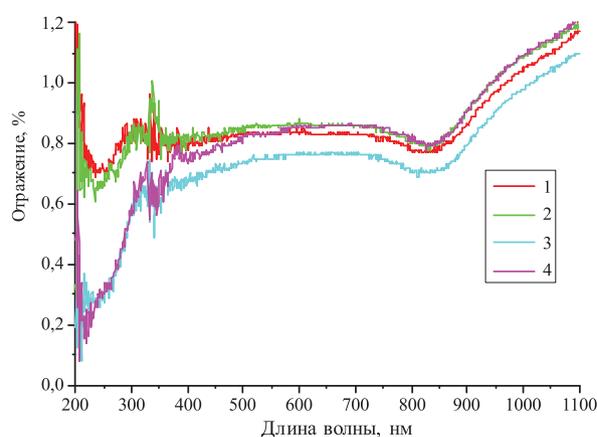


Рис. 4. Спектры отражения образцов алюминия, полученных в процессе анодирования, в диапазоне регистрируемого отражения 0,1–1,2 %: 1, 2 – в течение 20 и 30 мин соответственно; 3, 4 – в течение 20 и 30 мин соответственно с осажденным слоем ксерогеля BaTiO₃:Eu
Fig. 4. Reflection spectra of aluminum samples obtained during the anodizing process, in the range of recorded reflection 0.1–1.2 %:

1, 2 – for 20 and 30 min, respectively;
3, 4 – for 20 and 30 min, respectively, with the deposited layer of BaTiO₃:Eu xerogel

Анодирование приводит к значительному уменьшению отражения. Но так же, как и для исходной подложки алюминия, наблюдается увеличение отражения в диапазоне 200–1100 нм. Для образца, анодированного в течение 5 мин (рис. 3, кривая 1), отражение увеличивается от 2,5–3,0 % при 200 нм до 6,0–6,4 % при 1100 нм. Для образцов, анодированных в течение 20 и 30 мин (рис. 3, кривые 2 и 3 соответственно), отражение увеличивается от 0,5 % при 200 нм до 1,1 % при 1100 нм. Для образца, подвергнувшегося анодированию в течение 5 мин (рис. 3, кривая 4), уменьшение отражения после формирования слоя ксерогеля $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$ составило приблизительно 1–3 % во всем диапазоне длин волн. Отражение увеличивается от 1,5 % при 200 нм до 4,0 % при 1100 нм. Для образцов, подвергнувшихся анодированию в течение 20 и 30 мин (рис. 3, кривые 5 и 6 соответственно), нанесение слоя ксерогеля на подложку пористого алюминия приводит к уменьшению отражения приблизительно в два раза в области 200–300 нм и достигает минимума 0,2 % в диапазоне 200–225 нм. Для образца 5 уменьшение отражения составило около 0,1–0,3 % в диапазоне от 350 до 1100 нм и достигло максимума до 1 % при 1100 нм. Для образца 6 уменьшение отражения – около 0,1–0,2 % в диапазоне от 300 до 500 нм, от 500 до 1100 нм значения отражения почти такие же, как и до нанесения слоя $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$.

Ввиду масштабного ограничения рис. 3, ряд кривых на графике трудно различим. Поэтому на рис. 4 представлены спектры отражения исследуемых образцов в диапазоне регистрируемого отражения 0,1–1,2 %, что позволяет увидеть различия полученных спектральных характеристик.

Заключение

1. Предложен метод формирования антиотражающего покрытия на алюминиевой поверхности, основанный на наноструктурировании алюминия с последующим нанесением слоя ксерогеля $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$. Пленки пористого алюминия толщиной 15–100 мкм получены впервые.

2. Установлено, что формирование на поверхности алюминия пористого слоя анодным травлением приводит к значительному уменьшению отражения. Введение в пористый алюминий ксерогеля титаната бария, легированного европием, также уменьшает отражение.

3. Предлагаемые антиотражающие покрытия могут быть использованы как в интегральной электронике, так и в интегральной оптике. Управление световым сигналом с помощью антиотражающих покрытий при генерации, распространении и регистрации света в оптических межсоединениях интегральных схем востребовано в интегральной оптике, в частности в кремниевой фотонике [10–17]. Кроме того, антиотражающие покрытия на металлических деталях могут найти применение в спутниковых системах дистанционного зондирования Земли, где необходимо предотвратить паразитные блики из-за нежелательного отражения света от металлических поверхностей. При формировании анодированного алюминия и люминесцентных покрытий золь-гель-методом на поверхности алюминия возможно создание участков, отличающихся интенсивностью люминесценции, что представляет интерес для технологии формирования люминесцентных изображений и защиты изделий от подделок [18].

Список литературы

1. Isakov, K. Superhydrophobic Antireflection Coating on Glass Using Grass-Like Alumina and Fluoropolymer / K. Isakov, C. Kauppinen, S. Franssila // ACS Applied Material Interfaces. 2020. Vol. 12, No 44. P. 49957–49962.
2. Soon, H. L. Nanopatterned Polymer Molds Using Anodized Aluminum Templates for Anti-Reflective Coating / H. L. Soon, H. L. Nguen, A. L. Jung // Polymer MDPI. 2021. Vol. 13, No 19. P. 3333–3342.
3. Raid, A. I. Preparation and Characterization of Aluminum Oxide Nanoparticles by Laser Ablation in Liquid as Passivating and Anti-Reflection Coating for Silicon Photodiodes / A. I. Raid, A. Z. Shihab, M. K. Rafal // Appl. Nanoscience. 2017. Vol. 7. P. 477–487.
4. Goldsmith, J. Black Aluminum: A Novel Anti-Reflective Absorbing Coating / J. Goldsmith, V. Vasilyev, J. Vella // United States Air Force Research Laboratory. Wright-Patterson AFB. 2014. P. 69–70.
5. Kumar, R. H. Anti-Reflective Coatings: A Critical, In-Depth Review / R. H. Kumar, A. Ganesh, N. Sreekumar // Energy and Environmental Science. 2011. Vol. 4. P. 3779–3804.
6. Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ Multilayer Cavity Structure / N. V. Gaponenko [et al.] // Optical Materials. 2019. Vol. 96.
7. 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.
8. Fabrication of Ideally Ordered Nanoporous Alumina Films and Integrated Alumina Nanotubule Arrays by High-Field Anodization / S. Chu [et al.] // Advanced Materials. 2005. Vol. 17. P. 2115–2119.

9. Formation of Alumina Nanotubes and Jet Effect During High-Voltage Local Anodization of Aluminum / S. K. Lazarouk [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. 2022. Vol. 24, No 1.
10. 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 Archive*. 1994. Vol. 358. P. 659–664.
11. 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.
12. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2005. Т. 39, № 1. С. 136–138.
13. Si-Based Optoelectronic Couple / P. Jaguiro [et al.] // *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 2009. Vol. 41. P. 1094–1096.
14. Porous Alumina as Low- ϵ Insulator for Multilevel Metallization / S. Lazarouk [et al.] // *Microelectronic Engineering*. 2000. Vol. 50, No 1–4. P. 321–327.
15. 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, No 3, 4.
16. Электролюминесценция наноструктурированного кремния в матрице анодного оксида алюминия / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2007. Т. 41, № 9. С. 1126–1129.
17. Anodic Nanoporous Titania for Electro-Optical Devices / S. Lazarouk [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2007. Vol. 46.
18. Enhancement of Green Terbium-Related Photoluminescence from Highly Doped Microporous Alumina Xerogels in Mesoporous Anodic Alumina / N. V. Gaponenko [et al.] // *J. Electrochem. Soc.* 2002. Vol. 149.

References

1. Isakov K., Kauppinen C., Franssila S. (2020) Superhydrophobic Antireflection Coating on Glass Using Grass-Like Alumina and Fluoropolymer. *ACS Applied Material Interfaces*. 12 (44), 49957–49962.
2. Soon H. L., Nguen H. L., Jung A. L. (2021) Nanopatterned Polymer Molds Using Anodized Aluminum Templates for Anti-Reflective Coating. *Polymer MDPI*. 13 (19), 3333–3342.
3. Raid A. I., Shihab A. Z., Rafal M. K. (2017) Preparation and Characterization of Aluminum Oxide Nanoparticles by Laser Ablation in Liquid as Passivating and Anti-Reflection Coating for Silicon Photodiodes. *Appl. Nanoscience*. (7), 477–487.
4. Goldsmith J., Vasilyev V., Vella J. (2014) Black Aluminum: A Novel Anti-Reflective Absorbing Coating. *United States Air Force Research Laboratory. Wright-Patterson AFB*. 69–70.
5. Kumar R. H., Ganesh A., Sreekumaran N. (2011) Anti-Reflective Coatings: A Critical, In-Depth Review. *Energy and Environmental Science*. 4, 3779–3804.
6. Gaponenko N. V., Kholov P. A., Raichenok T. F., Prislowski S. Ya. (2019) Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived BaTiO₃/SiO₂ Multilayer Cavity Structure. *Optical Materials*. 96.
7. Lazarouk S. K. (2013) High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. 355–358.
8. Chu S., Wada K., Inoue S., Isogai M., Yasumori A. (2005) Fabrication of Ideally Ordered Nanoporous Alumina Films and Integrated Alumina Nanotubule Arrays by High-Field Anodization. *Advanced Materials*. 17, 2115–2119.
9. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Dudich V. V., Lazarouk A. S., Borisenko V. E. (2022) Formation of Alumina Nanotubes and Jet Effect during High-Voltage Local Anodization of Aluminum. *Advanced Engineering Materials*. 24 (1).
10. Lazarouk S., Bondarenko V., Pershukevich P., La Monica S., Maiello G. (1994) Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate *n*-Type Silicon. *MRS Online Proceedings Library Archive*. 358, 659–664.
11. 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.
12. 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), 136–138.
13. Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., Moore S., Smirnov A. (2009) Si-Based Optoelectronic Couple. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 41, 1094–1096.
14. Lazarouk S., Katsouba S., Leshok A., Demianovich A., Stanovski V., Voitech S., et al. (2000) Porous Alumina as Low- ϵ Insulator for Multilevel Metallization. *Microelectronic Engineering*. 50 (1–4), 321–327.
15. Lazarouk S. K., Leshok A. A., Kozlova T. A., Dolbik A. V., Le Dinh Vi, Ilkov V. K., et al. (2019) 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 18 (3, 4).

16. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Katsuba P. S., Labunov V. A., Leshok A. A., Borisenko V. E. (2007) Electroluminescence of Nanostructured Silicon in Anodic Alumina Matrix. *Semiconductors*. 41 (9), 1126–1129.
17. Lazarouk S., Xie Z., Chigrinov V., Kwok H. S. (2007) Anodic Nanoporous Titania for Electro-Optical Devices. *Japanese Journal of Applied Physics*. 46.
18. Gaponenko N. V., Molchan I. S., Sergeev O. V., Thompson G. E., Pakes A., Skeldon P., et al. (2002) Enhancement of Green Terbium-Related Photoluminescence from Highly Doped Microporous Alumina Xerogels in Mesoporous Anodic Alumina. *J. Electrochem. Soc.* 149.

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 наноэлектроники, зав. науч.-исслед. лаб. «Интегрированные микро- и наносистемы» (НИЛ 4.6) НИЧ, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Райченко Т. Ф., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Центра «Фотоника атомных и молекулярных структур», Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси

Томашевич Л. П., инж.-электрон. НИЛ 4.6 НИЧ, БГУИР

Лашковская Е. И., инж. науч.-исслед. лаб. «Нанофотоника» (НИЛ 4.5) НИЧ, БГУИР

Повжик А. А., нач. сектора СП-110, ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Гапоненко Н. В., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и наноэлектроники, зав. НИЛ 4.5 НИЧ, 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. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the Scientific Research Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems” (Lab. 4.6) of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Raichenok T. F., Cand. of Sci., Leading Researcher at the Center “Photonics of Atomic and Molecular Structures”, State Scientific Institution B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

Tomashevich L. P., Electronics Engineer at the Lab. 4.6 of R&D Department, BSUIR

Lashkovskaya E. I., Engineer at the Scientific Research Laboratory “Nanophotonics” (Lab. 4.5) of R&D Department, BSUIR

Povzhik A. A., Head of Sector SP-110, OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials”

Gaponenko N. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the Lab. 4.5 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 17 293-88-69
E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by
Lazarouk Serguei Konstantinovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-21-27>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.383:539.1.43

ВЛИЯНИЕ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИ НАРУШЕННОГО СЛОЯ С РАБОЧЕЙ СТОРОНЫ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КМОП ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В. А. ПИЛИПЕНКО¹, В. А. СОЛОДУХА², А. А. СЕРГЕЙЧИК¹, Д. В. ШЕСТОВСКИЙ¹

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 24.01.2024

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

Аннотация. Установлено влияние рекристаллизации механически нарушенного слоя на рабочей стороне пластины кремния с применением быстрой термической обработки (1000 °С, 20 с) на электрические параметры комплементарных металл-окисел-полупроводниковых микросхем. В качестве анализируемых характеристик *n*- и *p*-канальных транзисторов были выбраны: ток стока от напряжения на затворе при диодном включении; выходные характеристики при различных напряжениях на затворе; ток стока от напряжения на стоке без подачи потенциала на затвор; процент выхода годных изделий. Сравнение данных параметров проводили с микросхемами, изготовленными по стандартной технологии. Анализ результатов показал, что быстрая термическая обработка исходных кремниевых пластин позволяет значительно улучшить вышеуказанные характеристики *n*-канальных металл-окисел-полупроводниковых (*n*-МОП) и *p*-канальных металл-окисел-полупроводниковых (*p*-МОП) транзисторов за счет снижения фиксированного заряда в подзатворном диэлектрике, полученном пирогенным окислением кремния. Это дает возможность повысить качество выпускаемых комплементарных металл-окисел-полупроводниковых микросхем и увеличить процент выхода годных изделий с 74,38 до 77,53 %.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, подзатворный диэлектрик, фиксированный заряд в диэлектрике, вольт-амперные характеристики, *n*- и *p*-канальные металл-окисел-полупроводниковые транзисторы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Влияние рекристаллизации механически нарушенного слоя с рабочей стороны кремниевой пластины на электрические параметры КМОП интегральных микросхем / В. А. Пилипенко [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 21–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-21-27>.

IMPACT PRODUCED BY RECRYSTALLIZATION OF MECHANICALLY DESTROYED LAYER ON PLANAR SIDE OF SILICON WAFER UPON ELECTRICAL PARAMETERS OF CMOS MICROCIRCUITS

ULADZIMIR A. PILIPENKA¹, VITALY A. SALADUKHA², HANNA A. SIARHEICHYK¹,
DZMITRY U. SHESTOUSKI¹

¹JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (Minsk, Republic of Belarus)

²SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology” of the National Academy of Sciences
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24.01.2024

Abstract. The influence of recrystallization of a mechanically damaged layer on the working side of a silicon wafer using rapid heat treatment (1000 °C, 20 s) on the electrical parameters of complementary metal-oxide-semiconductor microcircuits has been established. The analyzed characteristics of *n*- and *p*-channel transistors were selected: drain current from the gate voltage when diode-connected; output characteristics at various gate voltages; drain current from the drain voltage without applying potential to the gate; percentage of yield of suitable products. These parameters were compared with microcircuits manufactured using standard technology. Analysis of the results showed that rapid thermal treatment of the original silicon wafers can significantly improve the above characteristics of *n*-channel metal-oxide-semiconductor (*n*-MOS) and *p*-channel metal-oxide-semiconductor (*p*-MOS) transistors by reducing the fixed charge in gate dielectric obtained by pyrogenic oxidation of silicon. This makes it possible to improve the quality of manufactured complementary metal-oxide-semiconductor microcircuits and increase the percentage of yield of suitable products from 74.38 to 77.53 %.

Keywords: rapid thermal treatment, gate dielectric, fixed charge in dielectric, voltage current characteristics, *n*- and *p*-channel metal-oxide-semiconductor transistors.

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

For citation. Pilipenka U. A., Saladukha V. A., Siarheichyk H. A., Shestouski D. U. (2024) Impact Produced by Recrystallization of Mechanically Destroyed Layer on Planar Side of Silicon Wafer Upon Electrical Parameters of CMOS Microcircuits. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 21–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-21-27> (in Russian).

Введение

Важным условием создания надежных изделий микроэлектроники с воспроизводимыми электрофизическими характеристиками является степень совершенства кристаллической решетки, определяющая электрические характеристики формируемых на ее поверхности микроэлектронных приборов. Поэтому обязательное условие бездефектных полупроводниковых изделий, в основном выполненных по униполярной технологии, – отсутствие на поверхности пластин нарушенного слоя, образующегося при финишной полировке рабочей стороны исходных кремниевых пластин [1–3]. Наличие такого слоя приводит к формированию в подзатворном диэлектрике соответствующего фиксированного заряда, уменьшающего пробивные напряжения и увеличивающего токи утечки подзатворного диэлектрика [4–7]. При этом с уменьшением топологических норм проектирования, приводящих к значительному уменьшению его толщины до единиц нанометров, данный фактор становится определяющим в получении работоспособных изделий для субмикронной электроники. Один из наиболее перспективных методов устранения нарушенного слоя – его твердофазная рекристаллизация с применением быстрой термической обработки (БТО), приводящей к нагреву пластины до 1000–1100 °C при длительности светового импульса 20 с [8–10]. Это обеспечивает уменьшение фиксированного заряда в подзатворном диэлектрике, сформированном за счет окисления кремния с нарушенной кристаллической решеткой, возникающей при полировке рабочей поверхности пластины. Однако в перечисленных публикациях рассматриваются вопросы, касающиеся только процесса твердофазной рекристаллизации механически нарушенного слоя на рабочей поверхности пластины и его роли в формировании фиксированного заряда в подзатворном диэлектрике, полученном путем пирогенного термического окисления кремния. При этом совершенно не затрагивались вопросы влияния такой обработки исходных кремниевых пластин на *n*- и *p*-канальные транзисторы комплементарных ме-

талл-окисел-полупроводниковых (КМОП) микросхем. Проведение исследований в этой области позволит установить влияние данного фиксированного заряда на изменение электрических характеристик металл-окисел-полупроводниковых (МОП) транзисторов и микросхемы в целом.

Методы проведения исследования

Для исследования влияния БТО исходных кремниевых пластин на электрические параметры интегральных микросхем (ИМС) выбрали микросхему, выполненную по КМОП-технологии, т. е. имеющую как n -, так и p -канальные транзисторы. Для установления влияния такой обработки на электрические параметры ИМС половина пластин проходила БТО, а вторая половина не подвергалась ее воздействию. Быстрая термическая обработка осуществлялась на установке УБТО ПИТ1801 в среде азота N_2 при атмосферном давлении. Облучение пластин проводилось с их рабочей стороны импульсным фотонным потоком длительностью 20 с излучением галогенных ламп в режиме теплового баланса, обеспечивающем их нагрев до 1000 °С.

Исследуемыми параметрами ИМС являлись следующие характеристики n - и p -канальных транзисторов: ток стока от напряжения на затворе при диодном включении; выходные характеристики при различных напряжениях на затворе; ток стока от напряжения на стоке без подачи потенциала на затвор. Указанные параметры определялись на комплексе прецизионных измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик KEYSIGHT B1500A Semiconductor Device Analyzer с зондовой станцией MPI TS-2000SE (США). С целью установления влияния БТО исходных кремниевых пластин на работоспособность КМОП-микросхемы в целом проводили сравнительный анализ процента выхода данных схем, изготовленных с применением такой обработки и без нее.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ подпороговых характеристик n - и p -канальных транзисторов показал, что для n -канальных транзисторов, изготовленных с применением БТО исходных кремниевых пластин, ток стока в области малых напряжений на затворе меньше, чем для аналогичных транзисторов, полученных на пластинах без такой обработки. В случае p -канальных транзисторов картина имеет обратный характер. Это объясняется тем, что на пластинах, не проходивших БТО, формируется подзатворный окисел, имеющий большую плотность заряда, чем окисел, формируемый на пластинах, прошедших такую обработку [5, 11]. Поскольку при термическом окислении в двуокиси кремния формируется положительный фиксированный заряд, не зависящий от приложенного потенциала [12], следует ожидать, что при одинаковом напряжении на затворе ток стока для n -канального транзистора будет выше там, где большая плотность заряда. Это означает, что на транзисторах, изготовленных с применением БТО исходных кремниевых пластин, ток стока будет меньше, чем на транзисторах, сформированных на пластинах, не проходивших БТО при одинаковых напряжениях на затворе (рис. 1, *a*). Противоположная картина наблюдается для p -канального транзистора, поскольку в этом случае на затвор подается отрицательный потенциал, а с учетом необходимости компенсации положительного заряда в подзатворном диэлектрике напряжение на затворе должно быть выше там, где больше плотность заряда. В этом случае при одинаковом напряжении на затворе у p -канальных транзисторов, изготовленных на пластинах с БТО, ток стока больше, чем у транзисторов, полученных на пластинах без обработки (рис. 1, *b*), поскольку в первом случае фиксированный заряд в подзатворном диэлектрике меньше.

Аналогичная картина наблюдается в случае исследования выходных характеристики n - и p -канальных транзисторов при различных напряжениях на затворе (рис. 2). Установлено, что разница в величине тока стока при одинаковом напряжении на стоке и затворе, выше порогового, значительно больше, чем в случае зависимости тока стока от напряжения на затворе в подпороговых характеристиках. Это обусловлено тем, что напряжение на затворе обеспечивает открытие канала, приводя к значительному возрастанию через него тока стока, а, следовательно, к росту величины разницы тока стока для транзисторов, изготовленных на подложках, проходивших и не проходивших предварительную БТО. Причина возникновения этой разницы в токе стока остается той же, как описано выше, а именно – уменьшение фиксированного заряда в подзатворном диэлектрике, сформированном пирогенным окислением кремниевых пластин после их БТО.

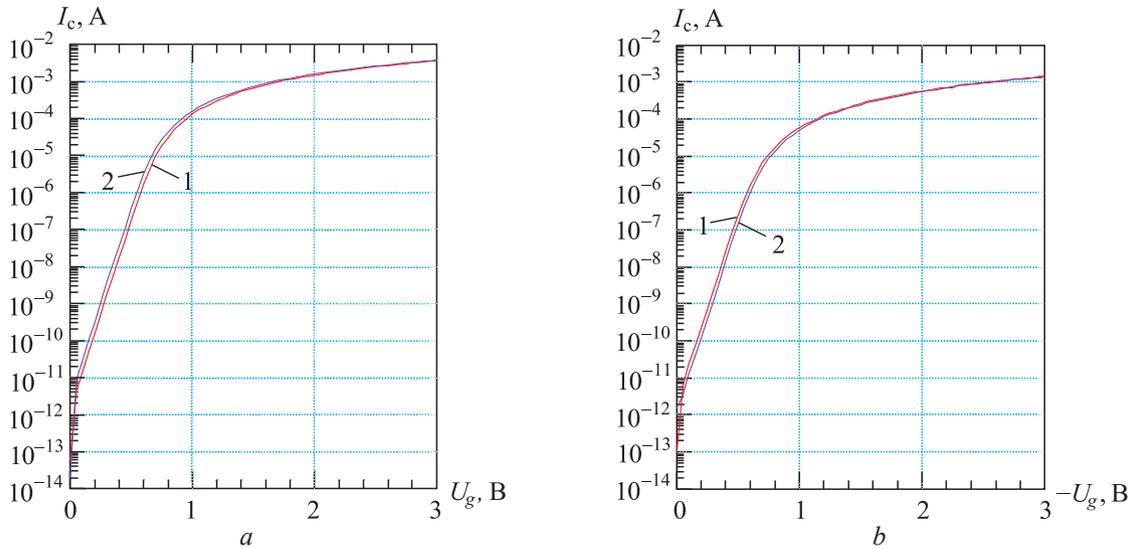


Рис. 1. Зависимость тока стока от напряжения на затворе в диодном включении для *n*-МОП (а) и *p*-МОП (b) транзисторов, изготовленных: 1 – с применением быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин при температуре 1000 °С в течение 20 с; 2 – без нее

Fig. 1. Dependence of the drain current on the gate voltage in the diode connection for *n*-MOS (a) and *p*-MOS (b) transistors manufactured: 1 – using rapid heat treatment of the original silicon wafers at a temperature of 1000 °C for 20 s; 2 – without it

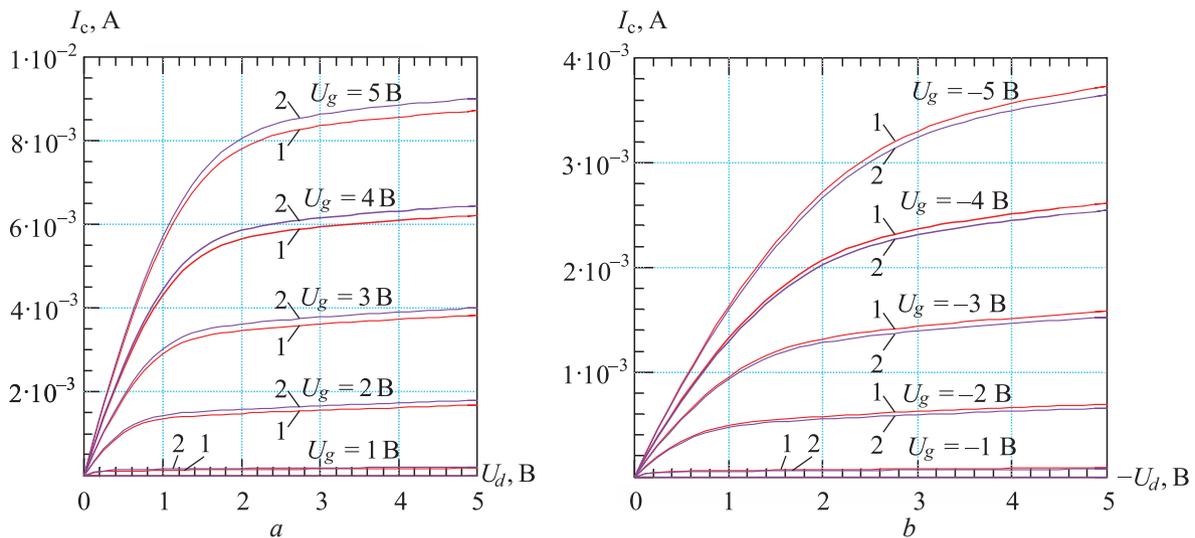


Рис. 2. Выходные характеристики при различных напряжениях на затворе для *n*-МОП (а) и *p*-МОП (b) транзисторов, изготовленных: 1 – с применением быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин при температуре 1000 °С в течение 20 с; 2 – без нее

Fig. 2. Output characteristics at various gate voltages for *n*-MOS (a) and *p*-MOS (b) transistors manufactured: 1 – using rapid heat treatment of the original silicon wafers at a temperature of 1000 °C for 20 s; 2 – without it

Исследование зависимости тока стока *n*- и *p*-канальных транзисторов от подаваемого на сток напряжения при нулевом напряжении на затворе показало, что влияние БТО исходных кремниевых пластин имеет такой же характер, как и у рассмотренных выше характеристик этих транзисторов (рис. 3). На рис. 3 принято, что напряжение на затворе равно нулю. Зависимость тока стока от напряжения на стоке для *n*-канальных транзисторов выше на пластинах, не проходивших БТО, а, следовательно, имеющих подзатворный диэлектрик с более высокой плотностью заряда (рис. 3, а). Противоположная картина – для *p*-канальных транзисторов (рис. 3, b). Такой ход зависимостей тока стока для *n*- и *p*-канальных транзисторов от напряжения на стоке при нулевом напряжении на затворе обусловлен следующей причиной. Согласно [13], образование фиксированного положительного заряда в подзатворном диэлектрике вызывает обеднение основными носителями заряда в кремнии *p*-типа и обогащение в кремнии *n*-типа проводимости. Это приводит

к большому току стока для n -канального транзистора по сравнению с p -канальным для приборов, изготовленных по традиционной технологии (рис. 3). В то же время при уменьшении фиксированного заряда в подзатворном диэлектрике за счет применения кремниевых пластин, прошедших рекристаллизацию механически нарушенного слоя, значение тока стока для n -канальных транзисторов должно уменьшаться, а для p -канальных увеличиваться (рис. 3). Такой результат обуславливается уменьшением воздействия фиксированного заряда на основные носители заряда, приводящего к снижению обеднения основными носителями заряда в области кремния p -типа (n -канальный транзистор) и обогащения в области кремния n -типа проводимости (p -канальный транзистор) (рис. 3).

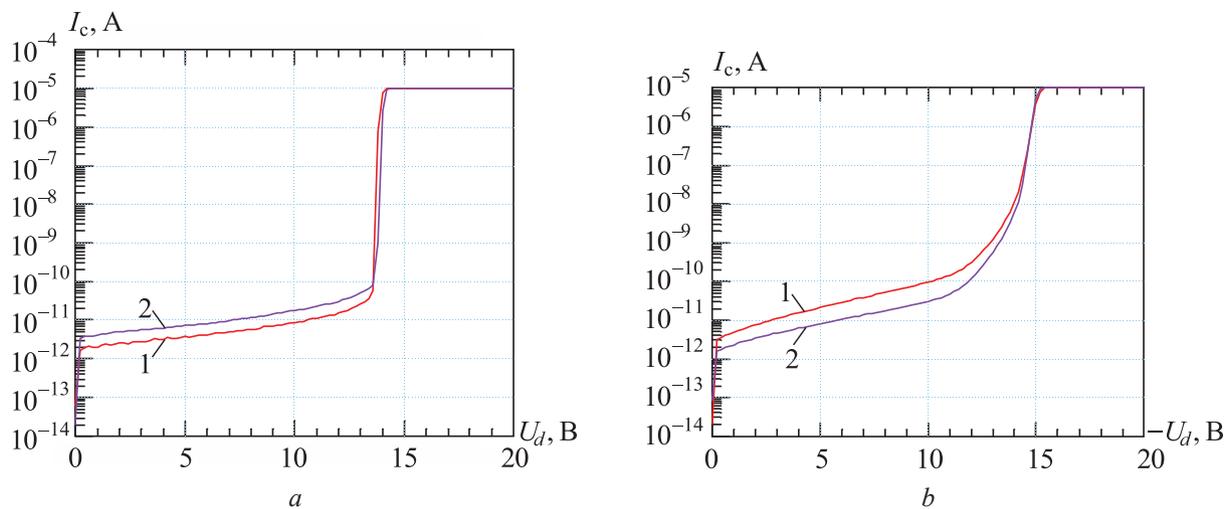


Рис. 3. Зависимость тока стока от напряжения на стоке для n -МОП (a) и p -МОП (b) транзисторов, изготовленных: 1 – с применением быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин при температуре $1000\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 с ; 2 – без нее

Fig. 3. Dependence of the drain current on the drain voltage for n -MOS (a) and p -MOS (b) transistors manufactured:

1 – using rapid heat treatment of the original silicon wafers at a temperature of $1000\text{ }^\circ\text{C}$ for 20 s ; 2 – without it

Как видно из рассмотренных данных, проведение БТО исходных кремниевых пластин позволяет значительно улучшить параметры n -МОП и p -МОП транзисторов за счет снижения фиксированного заряда в подзатворном диэлектрике, полученном пирогенным окислением кремния. Для подтверждения результатов были изготовлены ИМС по КМОП-технологии, которые позволили установить, что применение такой обработки исходных кремниевых пластин позволяет увеличить процент выхода годных изделий с $74,38$ до $77,53\%$. С учетом столь высокого процента выхода годных на изделиях, изготовленных по традиционному маршруту $74,38\%$, увеличение на $3,15\%$ является существенным повышением, что отразилось на увеличении процента выхода по всем контролируемым параметрам данного изделия.

Заклучение

Использование в технологическом маршруте создания комплементарных металл-окисел-полупроводниковых микросхем процесса быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин в стационарной атмосфере азота N_2 при длительности фотонного импульса 20 с и максимальной температуре $1000\text{ }^\circ\text{C}$ для рекристаллизации механически нарушенного слоя на рабочей поверхности кремниевой пластины уменьшает величину фиксированного заряда в подзатворном диэлектрике. Это обеспечивает улучшение подпороговых и выходных характеристик n - и p -канальных транзисторов, а также зависимости тока стока этих транзисторов от подаваемого на сток напряжения при нулевом напряжении на затворе. Перечисленное позволяет повысить качество выпускаемых комплементарных металл-окисел-полупроводниковых микросхем и тем самым увеличить процент выхода годных изделий с $74,38$ до $77,53\%$.

Список литературы

1. Технология СБИС. В 2 т. / Под ред. С. М. Зи. М.: Мир, 1986. Т. 1.
2. Красников, Г. Я. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. Ч. 2 / Г. Я. Красников, Н. А. Зайцев. М.: Микрон-принт, 1999.
3. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. В 3 т. / О. Ю. Наливайко [и др.]; под. ред. А. С. Турцевича. Минск: Интеграл-полиграф, 2013. Т. 1.
4. Технология СБИС. В 2 т. / Под ред. С. М. Зи. М.: Мир, 1986. Т. 2.
5. Анищик, В. М. Влияние быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин на процесс их пирогенного окисления / В. М. Анищик [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2018. № 2. С. 81–85.
6. Influence of the Rapid Thermal Treatment of the Initial Silicon Wafers on the Electro-Physical Properties of Silicon Dioxide, Obtained with Pyrogenous Oxidation / V. Pilipenko [et al.] // High Temperature Material Processes. 2019. Vol. 23, No 4. P. 283–290.
7. Пилипенко, В. А. Механизм формирования фиксированного заряда в слое SiO₂, полученном термическим окислением кремния / В. А. Пилипенко, А. А. Омелченко // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 28–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-28-32>.
8. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В. А. Пилипенко [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2018. Т. 62, № 3. С. 347–352.
9. Recrystallization of Silicon During Rapid Thermal Treatment / V. Gorushko [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. 2018. Vol. 94, No 5. P. 196–198.
10. Спектральная эллипсометрия как метод изучения влияния быстрой термообработки кремниевых пластин на их оптические характеристики / В. А. Солодуха [и др.] // Приборы и методы измерений. 2022. Т. 13, № 3. С. 190–207.
11. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.]. Минск: Беларус. навука, 2020.
12. Александров, О. В. Модель образования фиксированного заряда в термическом диоксиде кремния / О. В. Александров, А. И. Дусь // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, вып. 4. С. 474–480.
13. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния с использованием методов зондовой электрометрии / В. А. Пилипенко [и др.] // Приборы и методы измерений. 2017. Т. 8, № 4. С. 344–356.

References

1. Zee S. M. (ed.) (1986) *LSIIC Technology. In 2 Vol.* Moscow, Mir Publ. Vol. 1 (in Russian).
2. Krasnikov G. Y., Zaitsev N. A. (1999) *Physical and Technological Fundamentals of LSIIC Quality Management. Part 2.* Moscow, Micron-Print Publ. (in Russian).
3. Nalivaiko O. Yu., Solodukha V. A., Pilipenko V. A., Kolos V. V., Belous A. I., Chelyadinsky A. R., et al. (2013) *Basic Technological Processes for Production of Semiconductor Devices and Silicon Integrated Microcircuits. In 3 Vol.* Minsk, Integral-Poligraph, Publ. Vol. 1 (in Russian).
4. Zee S. M. (ed.) (1986) *LSIIC Technology. In 2 Vol.* Moscow, Mir Publ. Vol. 2 (in Russian).
5. Anishchik V. M., Gorushko V. A., Pilipenko V. A., Ponariadov V. V., Solodukha V. A. (2018) Impact Produced by Rapid Thermal Treatment on Source Silicon Wafers on the Process of Their Pyrogenic Oxidation. *Journal of Belarusian State University. Physics.* (2), 81–85 (in Russian).
6. Pilipenko V., Solodukha V., Zharin A., Gusev O., Vorobey R., Tyavlovsky A., et al. (2019) Influence of the Rapid Thermal Treatment of the Initial Silicon Wafers on the Electro-Physical Properties of Silicon Dioxide, Obtained with Pyrogenous Oxidation. *High Temperature Material Processes.* 23 (4), 283–290.
7. Pilipenko V. A., Omelchenko A. A. (2023) Mechanism of Fixed Charge Generation in SiO₂ Layer Obtained by Thermal Oxidation of Silicon. *Doklady BGUIR.* 21 (4), 28–32. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-28-32> (in Russian).
8. Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Gorushko V. A., Omelchenko A. A. (2018) Solid Phase Recrystallization of Mechanically Destroyed Silicon Layer at Rapid Thermal Treatment. *Reports at National Academy of Sciences of the Republic of Belarus.* 62 (3), 347–352 (in Russian).
9. Gorushko V., Omelchenko A., Pilipenko V., Solodukha V. (2018) Recrystallization of Silicon During Rapid Thermal Treatment. *Przegląd Elektrotechniczny.* 94 (5), 196–198.
10. Solodukha V. A., Pilipenko V. A., Omelchenko A. A., Shestovski D. V. (2022) Spectral Ellipsometry as a Method of Studying the Influence of Rapid Thermal Treatment of Silicon Wafers on Their Optical Properties. *Devices and Measurement Methods.* 13 (3), 190–207 (in Russian).

11. Dostanko A. P., Avakov S. M., Golosov D. A., Emelyanov V. V., Zavadsky S. M., Kolos V. V., et al. (2020) *Innovation Technologies and Equipment for Submicron Electronics*. Minsk, Belarussian Science Publ. (in Russian).
12. Aleksandrov O. V., Dus A. I. (2011) Model of Fixed Charge Formation in Thermal Si Dioxide. *Physics and Technology of Semiconductors*. 45 (4), 474–480 (in Russian).
13. Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Filipenya V. A., Vorobey R. I., Gusev O. K., Zharin A. L., et al. (2017) Characterization of the Electrical Properties of the Silicon-Silicon Dioxide Interface Using Probe Electrometry Methods. *Instruments and Measurement Methods*. 8 (4), 344–356 (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

Пилипенко В. А., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., зам. дир. по науч. развитию гос. центра «Белмикрoанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

Солодуха В. А., д-р техн. наук, зав. центром микро- и радиоэлектроники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси

Сергейчик А. А., вед. инж. гос. центра «Белмикрoанализ», ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Шестовский Д. В., вед. инж.-техн. отдела перспективных технологических процессов, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121а
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Тел.: +375 29 999-30-21
E-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru
Сергейчик Анна Александровна

Information about the authors

Pilipenka U. A., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Deputy Director for Scientific Development of the State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

Saladukha V. A., Dr. of Sci. (Tech.), Head of the Center of Micro- and Radioelectronics at the SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology” of the National Academy of Sciences

Siarheichyk H. A., Leading Engineer at the State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL”

Shestouski D. U., Leading Engineer-Technologist at the Advanced Technological Processes Department, JSC “INTEGRAL”

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa St., 121a
JSC “INTEGRAL” –
Manager Holding Company “INTEGRAL”
Tel.: +375 29 999-30-21
E-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru
Siarheichyk Hanna Alyaksandrayna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-28-35>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 538.945; 537.226.4; 538.956

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЕРОВСКИТОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л. А. БЛИЗНЮК, Т. П. ПЕТРОЧЕНКО, А. К. ЛЕТКО, В. И. КАСКО

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 22.12.2023

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

Аннотация. Проведены синтезы и исследования объемных образцов композиций на основе $Ba_xSr_{(1-x)}TiO_3$, $Pb(Zr, Ti)O_3$, $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_{(n+4)}$, $n = (5, 9, 12)$, которые использованы для создания гибридных структур. Разработана технология получения гибридных структур высокотемпературный сверхпроводник–сегнетоэлектрик и определены оптимальные температурно-временные режимы их получения. Изучены условия формирования структуры высокотемпературный сверхпроводник–сегнетоэлектрик, ее микро- и кристаллическая структуры, электрофизические свойства. Исследована граница перехода сегнетоэлектрик–сверхпроводник и установлено, что ее размер составляет 4 мкм. Сформированы структуры сегнетоэлектрик–сверхпроводник–электрод. Показано, что нанесение контактов из серебра на поверхность сверхпроводящего покрытия возможно в одном технологическом цикле. Установлено, что для получения композитных материалов с высокими электрофизическими параметрами следует использовать сверхпроводящие материалы $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_y$ с $n \geq 12$.

Ключевые слова: сверхпроводник, сегнетоэлектрик, композиционный материал, гибридные структуры, диэлектрические свойства, микроструктура, перовскиты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Представленные исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, договор № T21УЗБГ-015.

Для цитирования. Получение и исследование гибридных структур на основе перовскитоподобных материалов / Л. А. Близнюк [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 28–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-28-35>.

PREPARATION AND INVESTIGATION OF HYBRID PERIODIC STRUCTURES BASED ON PEROVSKITE-LIKE MATERIALS

LYUDMILA A. BLIZNYUK, TATYANA P. PETROCHENKO, ANZHELIKA K. LETKO,
VYACHESLAV I. KASKO

Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 22.12.2023

Abstract. Syntheses and investigations of bulk samples of compositions based on $Ba_xSr_{(1-x)}TiO_3$, $Pb(Zr,Ti)O_3$, $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_{(n+4)}$, $n = (5, 9, 12)$, which are used to obtain hybrid structures, have been carried out. The technology for producing high temperature superconductor–ferroelectric hybrid structures has been developed and the optimal temperature-time modes for their production have been determined. The conditions for the formation of the high temperature superconductor–ferroelectric structure have been studied. The microstructure,

crystal structure and electrical properties of the high temperature superconductor–ferroelectric hybrid structure were studied. The ferroelectric–superconductor transition boundary was studied and it was found that its size is 4 μm . The ferroelectric–superconductor–electrode structures have been formed. It has been shown that the deposition of silver contacts on the surface of a superconducting coating is possible in one technological cycle. It has been established that to obtain composite materials with high electrical parameters it is necessary to use superconducting materials $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ with $n \geq 12$.

Keywords: superconductor, ferroelectric, composite material, hybrid structures, dielectric properties, microstructure, perovskites.

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

Gratitude. The presented studies were carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, contract No T21UZBG-015.

For citation. Bliznyuk L. A., Petrochenko T. P., Letko A. K., Kasko V. I. (2024) Preparation and Investigation of Hybrid Periodic Structures Based on Perovskite-Like Materials. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 28–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-28-35> (in Russian).

Введение

Увеличение добротности СВЧ-устройств, снижение потерь и энергоёмкости, повышение управляемости и мобильности – таковы основные тенденции развития современных радиоэлектронных систем. Для реализации указанных тенденций необходимы гибридные структуры, обладающие уникальными физическими свойствами. В последние годы в радиоэлектронике интенсивно исследуются возможности применения сегнетоэлектрических управляемых структур и высокодобротных сверхпроводниковых топологий. Значительным потенциалом для разработки устройств нового поколения обладают периодические структуры и слоистые композиции на основе перовскитных плёнок и родственных оксидных слоёв. Компоненты, выполненные на их основе (антенны, фильтры, резонаторы, линии задержки, ячейки памяти и т. д.), находят широкое применение в различных СВЧ-устройствах [1, 2].

Наиболее применяемыми в электронике являются такие перовскитные сегнетоэлектрики (СЭ), как титанаты бария-стронция (BSTO). СВЧ-электроника в основном использует твердые растворы благодаря высокому значению и нелинейности диэлектрической проницаемости в широком температурном интервале, а также малому тангенсу угла диэлектрических потерь. Применение совокупности свойств сегнетоэлектрических материалов в составе многослойных структур, например, полупроводник–сверхпроводник, при непосредственном взаимном контакте существенно расширяет их функциональные возможности, поскольку параметры таких структур могут перестраиваться под воздействием импульсов поляризующего электрического поля в широком температурном диапазоне. Динамичный прикладной прогресс развития технологий создания слоистых структур затрудняется из-за малой исследованности межслойного взаимодействия переходных слоёв и эффекта близости. Использование в таких композитных структурах сверхпроводников с высокими критическими параметрами позволит выявить эти эффекты более четко, определить основные факторы, которые оказывают влияние на результирующие токовые характеристики (морфологию, текстуру, устойчивость фаз, кристаллохимические параметры и т. д.), составляющие структуру материалов.

С учетом экспериментальных данных обосновано практическое применение подобных смешанных структур. Задача исследований авторов – используя аналогии в кристаллической структуре купратных сверхпроводников и перовскитоподобных сегнетоэлектриков, сформировать композитную структуру, на основе которой можно создавать элементы с перестраиваемыми параметрами.

Экспериментальная часть

Многие подложки и высокотемпературные сверхпроводниковые (ВТСП) покрытия несовместимы вследствие взаимной диффузии материалов подложки и покрытия, что вызывает подавление сверхпроводимости [3]. SrTiO_3 (ST) относится к совместимым сверхпроводникам, так как имеет малую реакционную способность и высокое соответствие структурных характеристик параметрам наиболее распространенных сверхпроводников.

Для формирования и исследования структуры сегнетоэлектрик–сверхпроводник были получены керамика SrTiO_3 (СЭ-подложка) и сверхпроводник $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ (ВТСП-покрытие). В качестве сверхпроводников использовали: синтезированные в НПЦ НАН Беларуси по материаловедению соединения $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 5, 9, 12$), а также прекурсоры и ВТСП-керамику с $T_c = (107-181)$ К номиналов $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 5, 9, 30$), которую готовили по керамической технологии из прекурсоров, синтезированных в Институте материаловедения НПО «Физика – Солнце» АН Узбекистана (г. Ташкент).

Сверхпроводящие соединения $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 5, 9, 12$) получали по обычной керамической технологии из исходных окислов и карбонатов BaCO_3 , TiO_2 , CaCO_3 , Bi_2O_3 , CuO , взвешенных согласно стехиометрической формуле. Синтез проводили при температуре $800-850$ °С в течение 4 ч. Синтез прекурсоров и сверхпроводящих соединений ряда $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 2-30$) осуществляли по SFAQ-T (Super Fast Alloys Quenching) технологии путем плавления исходных компонентов концентрированным солнечным излучением мощностью $180-240$ Вт/см² и последующей быстрой закалки расплава [4, 5]. Для приготовления образцов использовали химические реактивы следующих квалификаций: Bi_2O_3 , PbO – «ХЧ» (химически чистый) и SrCO_3 , CaO , CuO – «ЧДА» (чистый для анализа), которые смешивали в емкостях объемом 5 л, футерованных полиуретаном. Из смесей порошков прессовали заготовки, обжигали их в печи сопротивления (SNOL) при температуре $300-600$ °С в течение 2 ч. После термообработки при 600 °С за 2 ч достигалась прочность заготовок, достаточная для их установки в солнечной печи на водоохлаждаемом поддоне. Перед плавлением заготовки примерно 5–10 мин выдерживали при плотности солнечного потока не более 200 Вт/см² в большой солнечной печи (БСП). Такая подготовка исключала выброс отдельных фрагментов прессовок под воздействием горячего воздуха. После нагрева осуществляли вывод оптико-энергетической системы БСП в режим получения плотности солнечного потока в фокальной зоне $\approx(400-480)$ Вт/см². Плавление производилось до полного расплавления массы порошка, находящегося в фокальной зоне. Затем сливали расплав на водоохлаждаемый поддон. Составы шихт с увеличенным содержанием CaO плавляли при плотностях солнечного потока $500-570$ Вт/см². Увеличения плотности солнечного потока достигали введением гелиостатов, находящихся на верхних полках гелиостатного поля. Далее получали сверхпроводящие образцы из стеклокристаллических прекурсоров по стандартной технологии: помол–прессование–отжиг. Отжиг керамики осуществляли в интервале $500-848$ °С в течение 3–120 ч.

Формирование высокотемпературных сверхпроводниковых покрытий проводилось на подложках из керамического материала SrTiO_3 . Шероховатость поверхности подложки создавали таким образом, чтобы обеспечить хорошую адгезию сверхпроводящего слоя к подложке. На СЭ-подложку из керамики толщиной 1 мм аэрозольным методом наносили слой предварительно синтезированного сверхпроводника $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 5, 9, 12$) и перетертого прекурсора и керамики $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 5, 9, 12$). Затем нанесенный слой сушили и полученную систему (подложку с нанесенным на нее сверхпроводящим слоем) обжигали при температуре окончательного формирования требуемой кристаллической структуры и сверхпроводящих свойств.

Для электрофизических исследований свойств гибридной системы на слой сверхпроводника наносился слой серебросодержащего покрытия. Температура вжигания серебряного покрытия совпадает с температурой обжига сверхпроводника, что позволяет создавать контакты из серебра на поверхности сверхпроводящего покрытия даже в одном технологическом цикле. Фазовый состав полученных образцов СЭ–ВТСП контролировали с помощью рентгенофазового анализа, который производили в CuK -монохроматическом излучении в диапазоне углов $20^\circ-60^\circ$.

Исследования намагниченности сверхпроводников на основе $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 5, 9, 12$) проводили на вибрационном магнитометре высокополевой измерительной системы Cryogenic фирмы Cryogenic Ltd (Великобритания). Точность измерения величины намагниченности составляла $1 \cdot 10^{-3}$ А·м²/кг. Диэлектрические измерения образцов выполняли с помощью измерителя иммитанса E7-20 на частотах 1 кГц и 1 МГц. Исследование микроструктуры, толщины сверхпроводящего покрытия и изучение границы перехода полученных композитных материалов проводили с помощью растрового электронного микроскопа марки EVO 10 фирмы Carl Zeiss.

Результаты исследований и их обсуждение

Рентгенофазовый анализ синтезированных составов $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 5, 9, 12$) показал, что синтезированные материалы являются многофазными, в них, наряду со сверхпроводящими фазами 2212 и 2223, присутствует незначительное количество исходных компонентов и промежуточных соединений. Из полученных материалов были изготовлены объемные керамические ВТСП-образцы, на которых проводили эксперименты для определения температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Результаты исследования свойств сверхпроводящих образцов на основе $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ представлены на рис. 1.

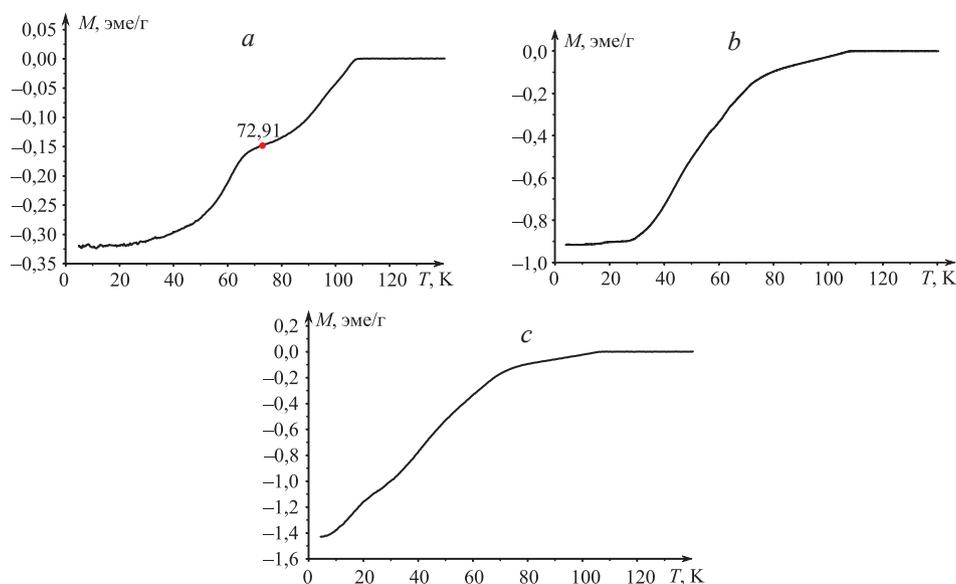


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности сверхпроводников на основе $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ для n : $a - 5$; $b - 9$; $c - 12$

Fig. 1. Temperature dependences of the magnetization of superconductors based on $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ for n : $a - 5$; $b - 9$; $c - 12$

На рис. 2 изображены рентгенограммы образцов синтезированного сверхпроводящего материала (ВТСП) и композитного материала ST+ВТСП, полученного из прекурсоров. Из графиков видно, что поверхностный слой полностью состоит из рефлексов соединений Bi-Sr-Ca-Cu-O, и рефлексы компонентов слоя подложки не наблюдаются.

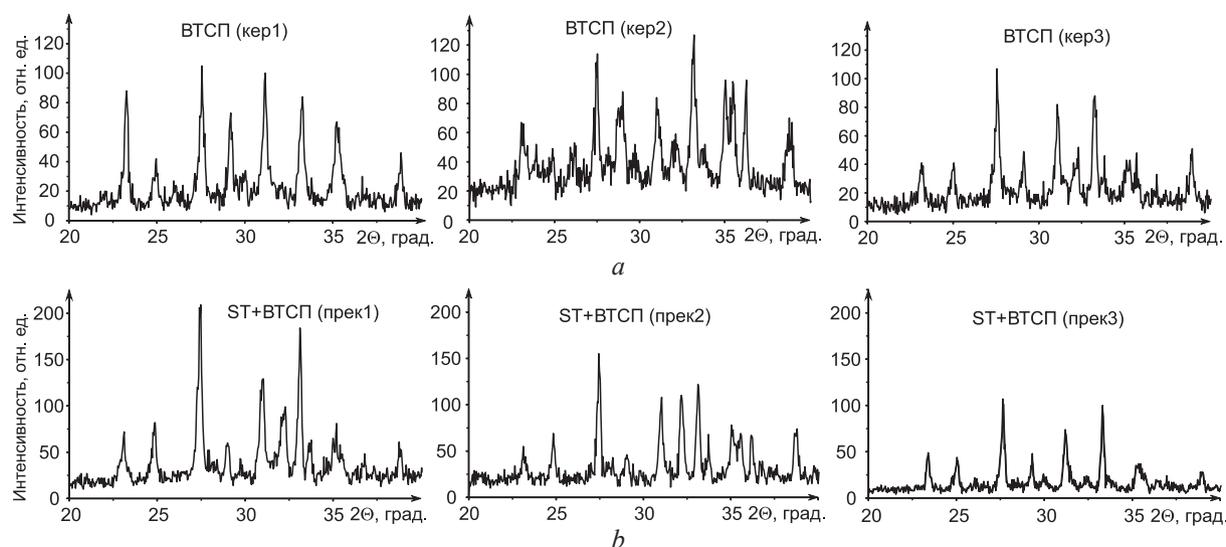


Рис. 2. Дифрактограммы образцов: a – ВТСП; b – ST+ВТСП (из прекурсоров): ВТСП – высокотемпературный сверхпроводник; ST – SrTiO_3

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of samples: a – HTSC; b – ST+HTSC (from precursors): HTSC – high temperature superconductor; ST – SrTiO_3

Данные рентгенофазового анализа показали, что основной фазой всех ВТСП-покрытий является фаза 2212. Кроме того, присутствуют фазы CuO и Ca_2CuO . Только на рентгенограмме образца с нанесенным покрытием из керамики ВТСП (рис. 2, кер. 2) с $n = 9$ присутствуют рефлексы, соответствующие фазе 2223. На рис. 3 приведены микрофотографии микроструктуры образцов СЭ–ВТСП-покрытия $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_y$ ($n = 5, 9, 12$).

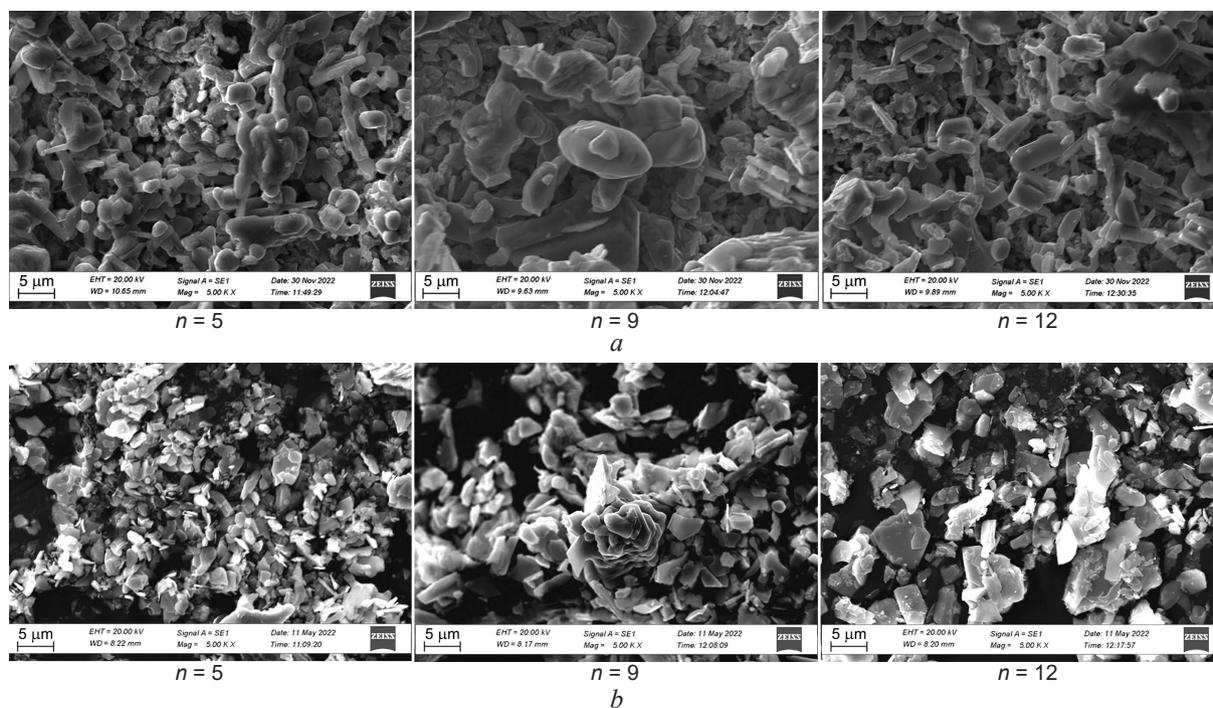


Рис. 3. Микрофотографии поверхности образцов сегнетоэлектрик–высокотемпературный сверхпроводник: *a* – из синтезированного высокотемпературного сверхпроводникового материала; *b* – из прекурсоров
Fig. 3. Microphotographs of the surface of ferroelectric samples – high-temperature superconductor: *a* – from synthesized high-temperature superconducting material; *b* – from precursors

Исследования микроструктуры образцов СЭ–ВТСП показали, что керамическая подложка SrTiO_3 имеет плотную упаковку, средний размер зерен которой 1–2 мкм. ВТСП-пленки (рис. 3) обладают неоднородной зернистой структурой и представляют конгломерат хаотически ориентированных пластинчатых кристаллитов, характерных для 2212 фазы, с существенным разбросом по размерам зерен от 2 до 5 мкм и плоских кристаллитов неправильной формы CuO - и Ca_2CuO_3 -фаз со средним размером зерен 1–3 мкм.

На рис. 4 представлен профиль поверхности, сделанный на изломе гибридной структуры сегнетоэлектрик (SrTiO_3)–сверхпроводник ($\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_y$). Из графиков видно, что на поверхности СЭ формируется слой сверхпроводника толщиной 10–12 мкм.

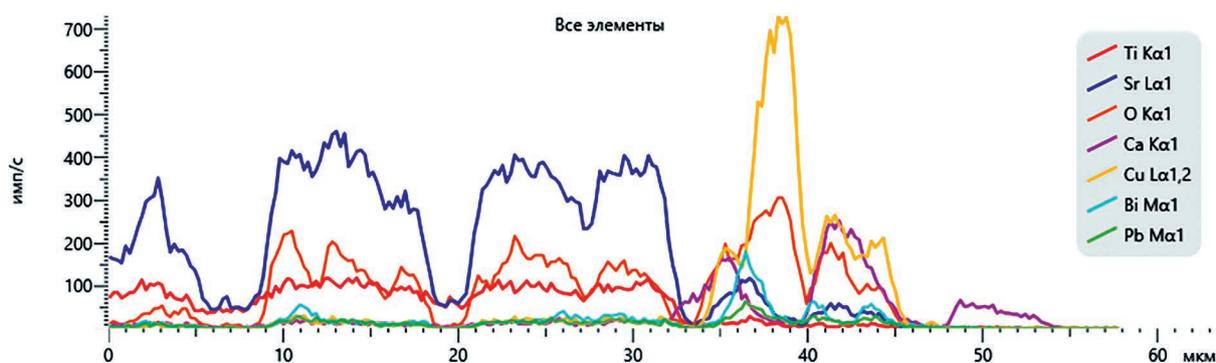


Рис. 4. Профиль поверхности гибридной структуры сегнетоэлектрик–сверхпроводник
Fig. 4. Surface profile of a ferroelectric–superconductor hybrid structure

Для исследования границы перехода изучали спектры распределения элементов Cu и Ca, входящих в состав ВТСП-керамики, и Ti, входящего в состав СЭ-подложки. Сопоставление спектров позволяет определить, что размер границы перехода ВТСП–СЭ составляет 4 мкм. Из спектров распределения элементов, приведенных на рис. 5, можно сделать вывод, что на границе перехода не происходит межфазных взаимодействий подложки и нанесенных ВТСП-слоев. В табл. 1 приведены значения сопротивления ВТСП-покрытия на подложке из SrTiO₃.

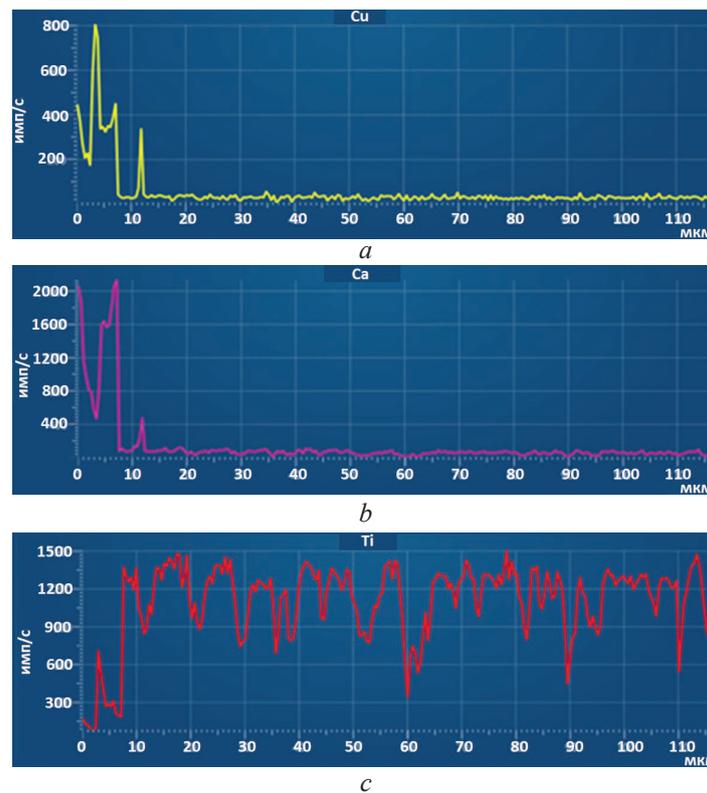


Рис. 5. Спектры распределения элементов на изломе гибридной структуры сверхпроводник (Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr₂Ca₄Cu₅O_y)–сегнетоэлектрик (SrTiO₃): *a* – Cu; *b* – Ca; *c* – Ti
Fig. 5. Distribution spectra of elements at the break of the hybrid structure superconductor (Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr₂Ca₄Cu₅O_y)–ferroelectric (SrTiO₃): *a* – Cu; *b* – Ca; *c* – Ti

Таблица 1. Сопротивление высокотемпературного сверхпроводящего покрытия на подложке из SrTiO₃
Table 1. Resistance of high temperature superconducting coating on SrTiO₃ substrate

Сопротивление, Ом / Resistance, Ω	Состав гибридной структуры / Composition of the hybrid structure		
	SrTiO ₃ + Bi _{1,7} Pb _{0,3} Sr ₂ Ca ₄ Cu ₅ O _y	SrTiO ₃ + Bi _{1,7} Pb _{0,3} Sr ₂ Ca ₈ Cu ₉ O _y	SrTiO ₃ + Bi _{1,7} Pb _{0,3} Sr ₂ Ca ₁₁ Cu ₁₂ O _y
R _{комната} при комнатной температуре	820	45 · 10 ⁶	50
R _{азот} при температуре жидкого азота	1217	Более 200 · 10 ⁶	25

Как видно из табл. 1, с понижением температуры (от комнатной температуры до температуры жидкого азота) сопротивление ВТСП-покрытия для составов Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr₂Ca_(n-1)Cu_nO_y, с *n* = 5 и *n* = 9 увеличивается, в то время как для покрытия из ВТСП с *n* = 12 – уменьшается, хотя сверхпроводимость при температуре жидкого азота не наблюдается. Температурные зависимости диэлектрических свойств (относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь) образцов составов СЭ–ВТСП с покрытием, полученным из синтезированных составов Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr₂Ca_(n-1)Cu_nO_y, (*n* = 5, 9, 12) и прекурсоров Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr₂Ca_(n-1)Cu_nO_y (*n* = 5, 9, 12), представлены на рис. 6. Все образцы СЭ–ВТСП имеют более высокие значения диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь, чем образец SrTiO₃ без ВТСП-покрытия (рис. 6). Увеличение диэлектрических потерь обусловлено неравномерностью нанесенного

слоя ВТСП по площади подложки. Как видно из графиков рис. 6, для образцов с нанесенным слоем из ВТСП-прекурсоров наблюдается сдвиг фазового сегнетоэлектрического перехода в сторону меньших температур, а для образцов СЭ–ВТСП – сдвиг в сторону отрицательных значений.

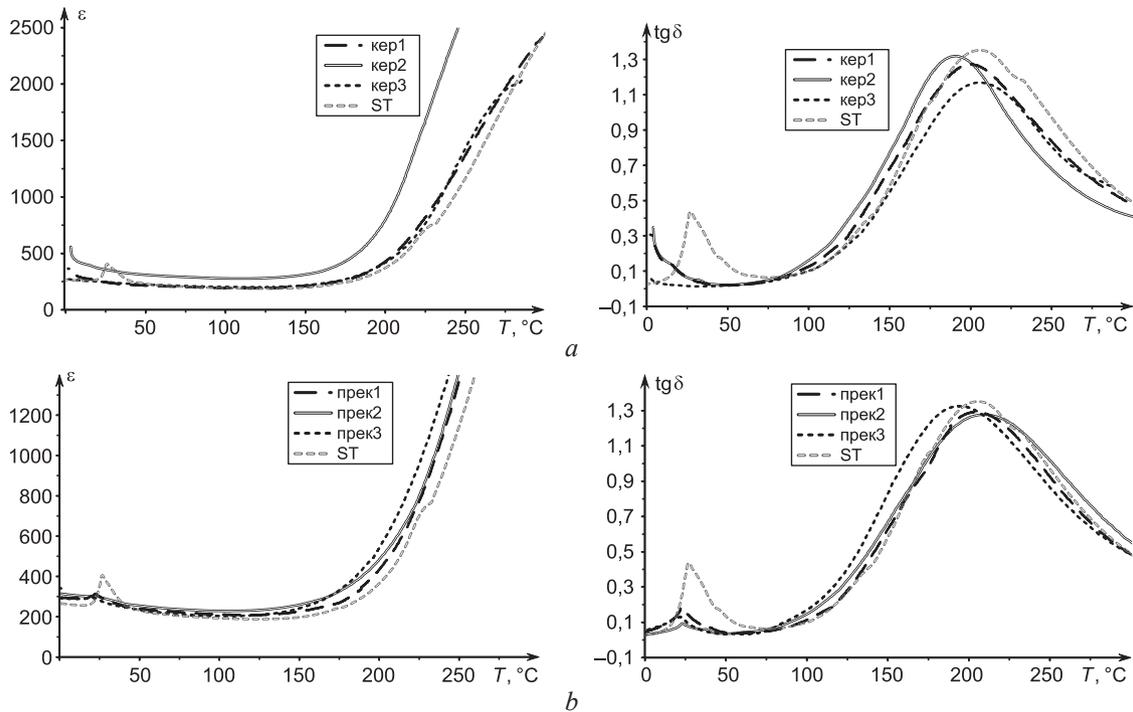


Рис. 6. Температурные зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов сегнетоэлектрик–высокотемпературный сверхпроводник: *a* – из синтезированного высокотемпературного сверхпроводникового материала; *b* – из прекурсоров
Fig. 6. Temperature dependences of relative dielectric constant and dielectric loss tangent of the samples ferroelectric–high-temperature superconductor: *a* – from a synthesized high-temperature superconducting material; *b* – from precursors

Заключение

1. В результате проведенных экспериментов получены композиционные керамические образцы, где в качестве подложки использовали сегнетоэлектрик SrTiO_3 , на который наносили слой сверхпроводника $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$. Исследована граница перехода сегнетоэлектрик–сверхпроводник и установлено, что она составляет 4 мкм.

2. Сформированы структуры электрод–сегнетоэлектрик–сверхпроводник–электрод. Исследования диэлектрических параметров и их температурных зависимостей показали, что полученные образцы композитных керамических материалов сегнетоэлектрик–высокотемпературный сверхпроводник сохраняют сегнетоэлектрические свойства, причем нанесение сверхпроводящего слоя приводит к повышению значений диэлектрической проницаемости.

3. Установлено, что свойства гибридной структуры, для создания которой использовался высокотемпературный сверхпроводник $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{11}\text{Cu}_{12}\text{O}_y$, значительно отличаются от свойств гибридной структуры, созданной с применением высокотемпературных сверхпроводников $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ с $n = 5$ и $n = 9$. То есть с возрастанием числа купратных слоев свойства гибридной структуры изменяются. Из этого можно сделать вывод, что для получения композитных материалов с высокими электрофизическими параметрами надо использовать сверхпроводящие материалы $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ с $n \geq 12$.

Список литературы

1. Ferrite-Superconductor Devices for Advanced Microwave Applications / G. F. Dionne [et al.] // IEEE Trans, on Microwave Theory and Techniques. 1996. Vol. 44, No 7. P. 1361–1368.
2. HTS Wireless Filters: Past, Present, and Future Performance / R. B. Hammond [et al.] // Microwave Journal. 1998. Vol. 41, No 10. P. 94–107.

3. Гершензон, М. Е. Итоги науки и техники / М. Е. Гершензон, М. А. Тарасов // Электроника. 1990. Т. 26. С. 38–75.
4. Фазовый состав и свойства сверхпроводящей керамики на основе прекурсоров $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, полученных закалкой расплава на солнечной печи / Д. Д. Гуламова [и др.] // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, вып. 6. С. 98–102.
5. Солнечная технология получения и исследование свойств керамики $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n = 3\div 5$) / Д. Д. Гуламова [и др.] // Новые огнеупоры. 2016. № 1. С. 35–38.

References

1. Dionne G. F., Oates D. E., Temme D. H., Weiss J. A. (1996) Ferrite-Superconductor Devices for Advanced Microwave Applications. *IEEE Trans, on Microwave Theory and Techniques*. 44 (7), 1361–1368.
2. Hammond R. B., Sclarino D. J., Schrieffer J. R., Willemsen B. A. (1998) HTS Wireless Filters: Past, Present, and Future Performance. *Microwave Journal*. 41 (10), 94–107.
3. Gershenzon M. E., Tarasov M. A. (1990) Results of Science and Technology. *Electronics*. 26, 38–75 (in Russian).
4. Gulamova D. D., Uskenbaev D. E., Fantozzi J., Chigvinadze J. G., Magradze O. V. (2009) Phase Composition and Properties of Superconducting Ceramics Based on $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ Precursors Obtained by Quenching the Melt in a Solar Furnace. *Journal of Technical Physics*. 79 (6), 98–102 (in Russian).
5. Gulamova D. D., Turdiev Zh. Sh., Bobokulov S. Kh., Bakronov Kh., Nebesny A. (2016) Solar Technology for the Production and Study of the Properties of $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ Ceramics ($n = 3\div 5$). *New Refractories*. (1), 35–38 (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

Близнюк Л. А., зав. лаб. электронной керамики, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению)

Петроченко Т. П., науч. сотр. лаб. электронной керамики, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Летко А. К., науч. сотр. лаб. электронной керамики, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Каско В. И., мл. науч. сотр. лаб. электронной керамики, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 19–5
Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению
Тел.: +375 29 756-95-97
E-mail: tanya-petr@physics.by
Петроченко Татьяна Петровна

Information about the authors

Bliznyuk L. A., Head of the Laboratory of Electronic Ceramics, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science (SPC of the NAS of Belarus for Materials Science)

Petrochenko T. P., Researcher at the Laboratory of Electronic Ceramics, SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

Letko A. K., Researcher at the Laboratory of Electronic Ceramics, SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

Kasko V. I., Junior Researcher at the Laboratory of Electronic Ceramics, SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 19–5
Scientific and Practical Center
of the National Academy of Sciences
of Belarus for Materials Science
Tel.: +375 29 756-95-97
E-mail: tanya-petr@physics.by
Petrochenko Tatyana Petrovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-36-43>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 534.6

ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ ПО КАВИТАЦИОННОМУ ШУМУ В РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНАХ

В. С. МИНЧУК, А. Ю. ПЕРХУНОВА, М. П. ФЕДОРИНЧИК, Н. В. ДЕЖКУНОВ

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

Поступила в редакцию 01.08.2023

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

Аннотация. Приведены результаты испытаний спектрально-акустического кавитометра с режимами измерений, различающимися частотными диапазонами интегрирования кавитационного шума. Для каждого из режимов $H1-H4$ нижняя частота интегрирования f_{\min} составляла соответственно 1, 70, 180 и 300 кГц, верхняя частота была одинаковой для всех режимов $-f_{\max} = 10$ МГц. В качестве приемников кавитационного шума использовали пьезоэлектрические волноводные датчики. Регистрировали распределения активности кавитации в неоднородных ультразвуковых полях: в объеме ультразвуковой ванны ($f_0 = 35$ кГц) и в поле погружного излучателя ($f_0 = 21$ кГц). Частотный диапазон интегрирования варьировался за счет изменения нижней границы. Установлено, что изменение диапазона интегрирования в довольно широких пределах не оказывает заметного качественного влияния на результат измерений активности кавитации, происходит лишь кратное изменение показаний. Этот вывод подтвержден благодаря использованию датчиков, различающихся своими спектральными характеристиками.

Ключевые слова: активность кавитации, кавитационный шум, ультразвук, кавитометр, спектрально-акустический метод.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, проект № T23M-026.

Для цитирования. Оценка активности кавитации по кавитационному шуму в различающихся частотных диапазонах / В. С. Минчук [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 36–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-36-43>.

ASSESSMENT OF CAVITATION ACTIVITY BY CAVITATION NOISE IN DIFFERENT FREQUENCY RANGES

VIACHESLAV S. MINCHUK, ALEKSANDRA Y. PERHUNOVA,
MIKHAIL P. FEDORINCHIK, NIKOLAI V. DEZHKUNOV

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

Submitted 01.08.2023

Abstract. The results of testing the spectral-acoustic cavitometer with measurement modes that differ in the frequency ranges of integration of cavitation noise are presented. For each of the $H1-H4$ modes, the lower integration frequency f_{\min} is 1, 70, 180 and 300 kHz, respectively. The upper frequency is the same for all modes and is $f_{\max} = 10$ MHz. Piezoelectric waveguide sensors were used as a cavitation noise receivers. The distributions of cavitation activity in non-uniform ultrasonic fields were recorded: in the volume of the ultrasonic bath ($f_0 = 35$ kHz) and in the field of the submersible emitter ($f_0 = 21$ kHz). The frequency range of integration was

varied by changing the lower bound. It has been established that a change in the integration range within a fairly wide range does not have a noticeable qualitative effect on the result of measurements of cavitation activity, only a multiple change in the readings occurs. This conclusion was confirmed using sensors that differ in their spectral characteristics.

Keywords: cavitation activity, cavitation noise, ultrasound, cavitometer, spectral-acoustic method.

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

Gratitude. The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research, project No T23M-026.

For citation. Minchuk V. S., Perhunova A. Y., Fedorinchik M. P., Dezhkunov N. V. (2024) Assessment of Cavitation Activity by Cavitation Noise in Different Frequency Ranges. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 36–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-36-43> (in Russian).

Введение

При воздействии ультразвуком на физико-химические процессы в жидкостях и жидкообразных средах различают два основных режима: докавитационный и кавитационный. В подавляющем большинстве ультразвуковых технологий и многих медико-биологических применениях мощного ультразвука его интенсивность обычно поддерживается выше порога кавитации [1–5]. При пульсациях и захлопывании кавитационных пузырьков генерируются ударные волны, высокие температуры и микроструи жидкости, которыми и определяются роль кавитации в упомянутых выше процессах и ее активность.

К настоящему времени предложено немало методов оценки уровня активности кавитации, основанных на регистрации эффектов, сопровождающих ее. Это такие явления, как кавитационная эрозия (разрушение твердых тел под действием кавитации), генерирование свечения в видимой области спектра – звуколюминесценция, кавитационный шум (КШ), ультразвуковой капиллярный эффект, различные звукохимические реакции [6]. Разработка приборов для исследования кавитации с использованием КШ или его спектральных составляющих – одно из наиболее перспективных направлений в данной области [6–8]. 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. Для оценки активности кавитации в [6–9] предлагалось использовать различные составляющие спектра кавитационного шума.

Интегрирование акустического сигнала в некотором диапазоне частот является одним из наиболее распространенных алгоритмов обработки спектра КШ при оценке активности кавитации [9–11]. При выборе диапазона интегрирования обычно исключают низкочастотную часть, поскольку считается, что первые гармоники основной частоты могут возникать вследствие нелинейных искажений звуковой волны, т. е. напрямую не связаны с пульсациями и захлопыванием кавитационных полостей. Естественно, исключается и основная частота f_0 , как не связанная с кавитацией.

В статье показано, что изменение диапазона интегрирования в довольно широких пределах не оказывает заметного влияния на результат исследования активности кавитации.

Методика и оборудование

Для оценки активности кавитации A_k использовали экспериментальный кавитометр ИСА-4М (БГУИР). Алгоритм обработки спектра КШ, реализованный в данном приборе, обеспечивает вычисление интегральной интенсивности КШ в четырех различающихся частотных диапазонах $H1$ – $H4$. При помощи аналоговых фильтров для каждого из режимов выделялась исследуемая область спектра. Верхняя граница диапазона для всех режимов была одинаковой – 10 МГц. Различия между режимами заключались в нижней границе. Для имеющихся режимов она составляла: $H1$ – 1 кГц, $H2$ – 70 кГц, $H3$ – 180 кГц, $H4$ – 300 кГц.

Отметим, что в соответствии с [12] граница определяется как частота, на которой интенсивность сигнала составляет 70 % от уровня насыщения. На рис. 1 приведены амплитудно-частотные характеристики для каждого из использовавшихся режимов. В качестве примера рассмотрим режим $H2$ (рис. 1, *b*).

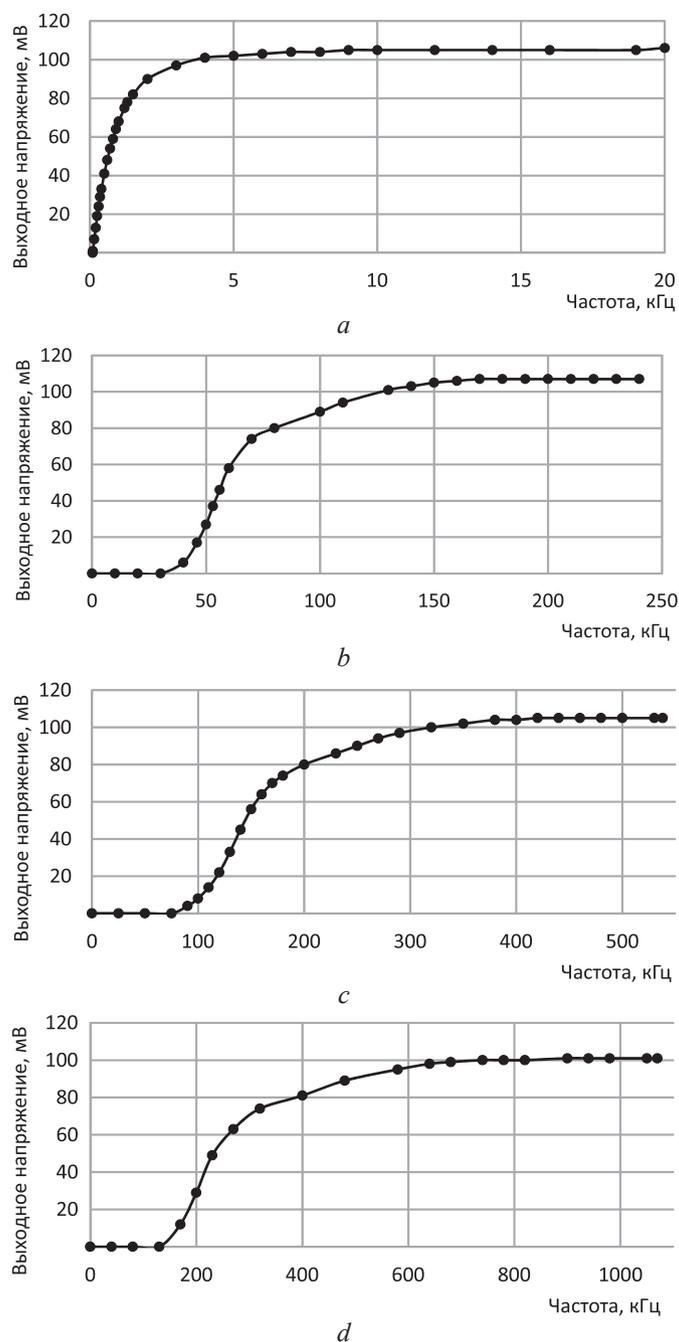


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики режимов кавитометра: *a* – *H1*; *b* – *H2*; *c* – *H3*; *d* – *H4*
Fig. 1. Amplitude-frequency characteristics of cavitometer modes: *a* – *H1*; *b* – *H2*; *c* – *H3*; *d* – *H4*

Фильтр полностью подавляет сигнал на частотах менее 30 кГц. При увеличении частоты доля пропускаемого сигнала плавно увеличивается и достигает насыщения при напряжении 105 мВ на частоте 150 кГц. 70 % от уровня насыщения (74 мВ) достигается на частоте 70 кГц, которая принимается в качестве нижней границы анализируемого диапазона. В режиме *H1* интегрированию подлежал полный выходной сигнал датчика, включавший в том числе основную частоту f_0 . В режиме *H2* частота f_0 полностью подавлялась, сигнал начинал проходить со второй гармоники $2f_0$. В режимах *H3* и *H4* (рис. 2, *c*, *d*) нижние границы используемых фильтров сдвигались в более высокочастотные области – 180 и 300 кГц соответственно.

В исследовании использовали три типа датчиков кавитации, обозначаемых далее *S1*, *P1*, *U2*. Датчики имели идентичный пьезопреобразователь (диск $\varnothing 5$ мм и толщиной 1 мм, ЦТС-19). Конструктивные различия этих приборов обуславливали соответствующие различия в регистрируемых спектрах (рис. 2). Спектры на рис. 2 получены в идентичных условиях разными датчиками.

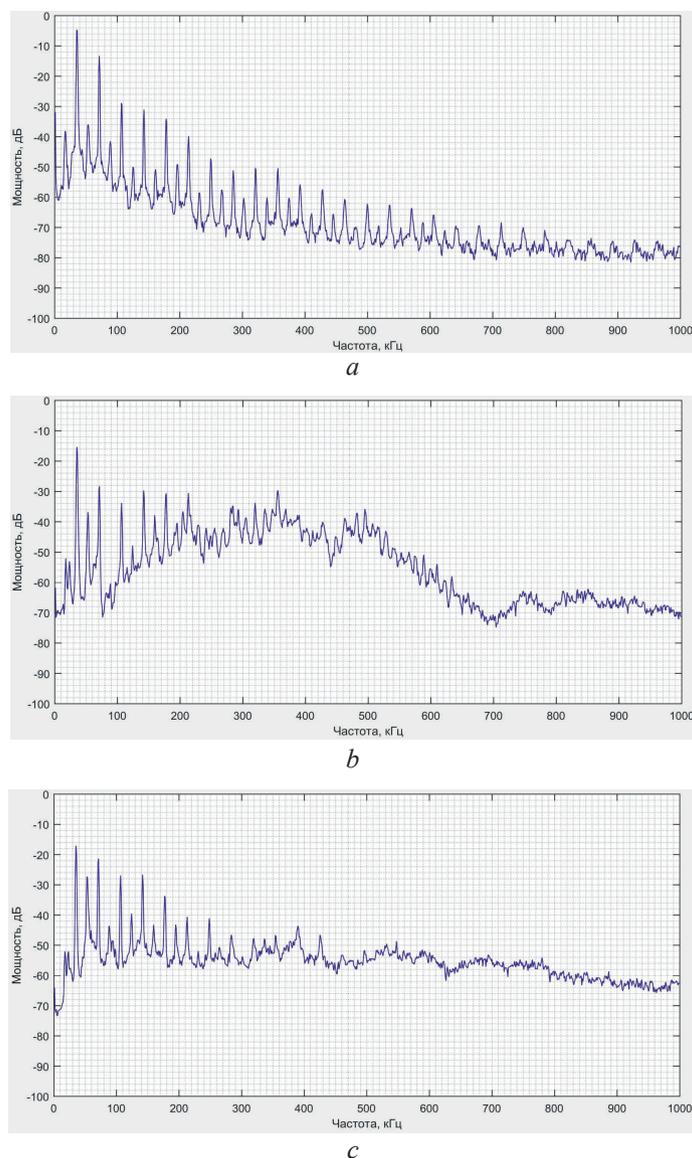


Рис. 2. Спектры выходного сигнала датчиков: *a* – *S1*; *b* – *P1*; *c* – *U2*
Fig. 2. Spectra of the sensor output signal: *a* – *S1*; *b* – *P1*; *c* – *U2*

Для генерирования кавитации использовали ультразвуковую ванну (рис. 3, *a*) или погружной излучатель с волноводом (рис. 3, *b*). В экспериментах с ванной в исходном положении датчик размещался на границе раздела жидкость–газ на оси излучателя, который был вмонтирован в дно ванны. Затем включали генератор, и датчик равномерно перемещался в направлении к излучателю. Кавитометр передавал показания на компьютер в реальном времени. Таким образом, получили зависимость оценки активности кавитации от расстояния до излучателя (дна ванны). Опыт повторяли 6–9 раз, результаты усредняли. При изменении уровня жидкости *h* в ванне вследствие изменения условий формирования стоячей волны существенно изменялись как величина активности кавитации, так и ее распределение по объему (рис. 4). Использовали следующие величины уровня жидкости в ванне: 66, 68, 70, 72, 74, 81 и 82 мм. Для опытов в ультразвуковой ванне применяли датчики *S1* и *P1*.

В экспериментах с погружным излучателем использовали датчики *U2* и *S1*. Датчик *U2* имел *U*-образный металлический волновод, его расположение показано на рис. 3, *b*. Датчик *S1* имел прямой волновод, сам датчик располагался под углом так, чтобы его торец находился на оси излучателя. Регистрировали изменение активности кавитации при удалении датчика от торца излучателя. Опыт повторяли 3–5 раз, результаты усредняли.

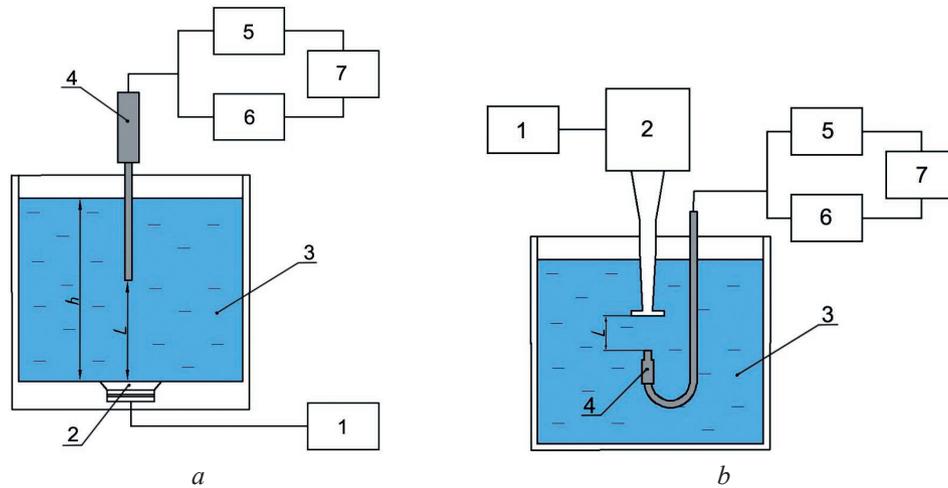


Рис. 3. Схема установки для проведения экспериментов:

a – с ультразвуковой ванной; *b* – с ультразвуковым диспергатором; 1 – ультразвуковой генератор; 2 – пьезокерамический излучатель/диспергатор; 3 – жидкость; 4 – датчик кавитации; 5 – кавитометр; 6 – анализатор спектра; 7 – компьютер

Fig. 3. Diagram of the installation for conducting experiments:

a – with an ultrasonic bath; *b* – with an ultrasonic dispersant; 1 – ultrasonic generator; 2 – piezoceramic emitter/dispersant; 3 – liquid; 4 – cavitation sensor; 5 – cavitometer; 6 – spectrum analyzer; 7 – computer

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 4 представлено изменение оценки активности кавитации при удалении от излучателя диспергатора ($f_0 = 21$ кГц). Измерения проводили в режимах *H1* и *H2* датчиками *U2* и *S1*. Полученные оценки активности кавитации обозначим A_{kH1} и A_{kH2} (или A_{kHi}). Режиму *H1* соответствует шкала слева, режиму *H2* – справа. Полученные распределения имеют вид быстро убывающих логарифмических кривых.

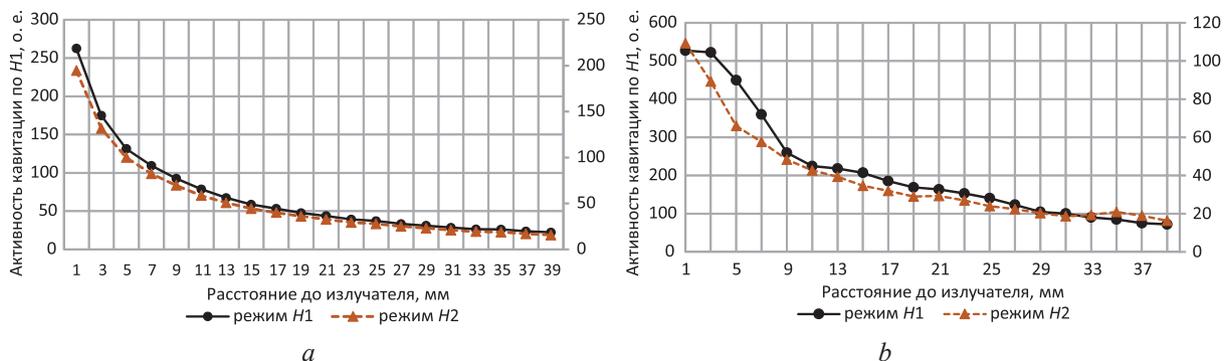


Рис. 4. Распределение активности кавитации под излучателем диспергатора при измерении датчиком: *a* – *U2*; *b* – *S1*

Fig. 4. Distribution of cavitation activity under the dispersant emitter when measured by a sensor: *a* – *U2*; *b* – *S1*

Распределения A_{kH1} и A_{kH2} на рис. 4, *a* являются линейно зависимыми между собой, т. е. имеют идентичную форму. Оценка A_{kH1} (режим *H1*) в 1,34 раза выше A_{kH2} на всем исследуемом промежутке. При использовании датчика *S1* заметно небольшое расхождение в форме полученных распределений (рис. 4, *b*). При небольших расстояниях до излучателя (1–9 мм) показания различаются от 5 до 7 раз, при расстоянии 10–31 мм – в 5,7 раза, при наибольшем удалении от излучателя – до 4 раз. Отметим, что режим *H2* отличается от *H1* тем, что из спектра вырезана низкочастотная часть (до 70 кГц), включая f_0 . Однако это не вызвало существенных отклонений вида зависимостей, полученных для данных режимов датчиками *U2* и *S1*. Различия в отношениях A_{kH1}/A_{kH2} для разных датчиков обусловлены различиями их спектральной чувствительности.

Результаты сканирования объема ультразвуковой ванны ($f_0 = 35,5$ кГц) датчиком $S1$ представлены рис. 5. Получены распределения A_{kH1} и A_{kH2} вдоль оси излучателя для шести различных уровней жидкости h в ванне: 66, 68, 70, 72, 74 и 81 мм. Уровень жидкости сильно влияет как на величину активности кавитации, так и на ее распределение по объему. В четырех экспериментах формы распределений A_{kH1} и A_{kH2} совпали с точностью не менее точности измерений (т. е. данные распределения линейно зависимы), в двух отмечены расхождения. Формы распределений A_{kH1} и A_{kH2} совпадали при $h = 74$ мм (рис. 5, *a*), наибольшие расхождения наблюдались при $h = 68$ мм (рис. 5, *b*). Каждая кривая является результатом усреднения шести–девяти сканирований. Представленные зависимости имеют вид кривых с чередующимися максимумами и минимумами, что обусловлено наличием компоненты стоячей волны в результирующем ультразвуковом поле.

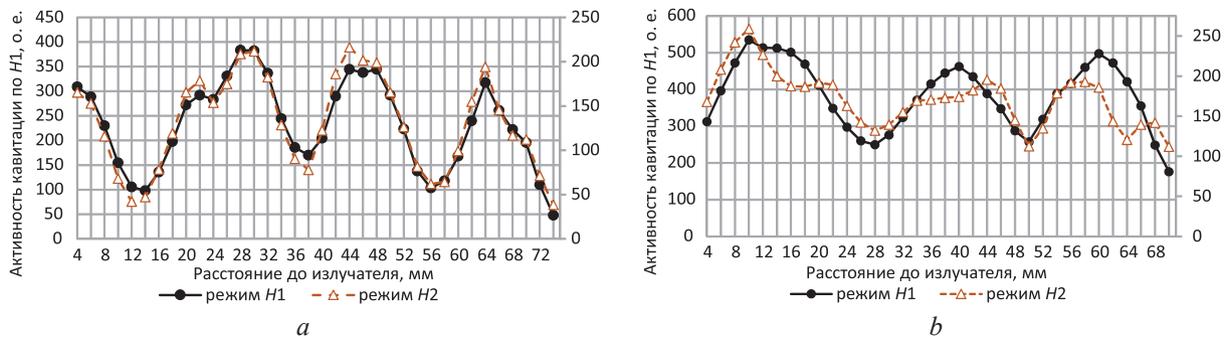


Рис. 5. Распределение активности кавитации в ультразвуковой ванне, полученное датчиком $S1$, при уровне жидкости: *a* – 74 мм; *b* – 68 мм

Fig. 5. Distribution of cavitation activity in an ultrasonic bath, obtained by sensor $S1$, at liquid level: *a* – 74 мм; *b* – 68 мм

Датчиками $S1$ и $U2$ измерения проводили только для режимов $H1$ и $H2$. В более высокочастотных диапазонах ($H3$ и $H4$) значения A_{kH3} и A_{kH4} этих датчиков незначительно превышали уровень фонового шума, что не позволяло обеспечить достаточный уровень воспроизводимости измерений. Приборы $S1$ и $U2$ характеризуются более низкой спектральной чувствительностью в диапазоне частот 300–500 кГц (рис. 2, *a, c*) по сравнению с датчиком $P1$ (рис. 2, *b*), чем, вероятно, и обусловлен низкий уровень генерируемых этими датчиками сигналов для режимов $H3$ и $H4$.

Датчик $P1$ позволяет получить распределения активности кавитации для всех четырех частотных диапазонов. На рис. 6 приведены результаты сканирования ультразвуковой ванны (вдоль оси излучателя) этим датчиком при уровне жидкости над излучателем 68 мм.

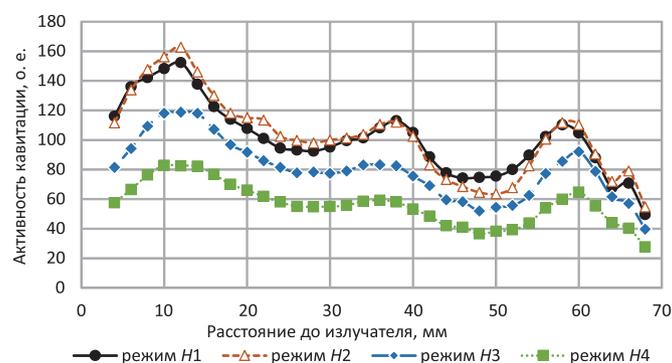


Рис. 6. Распределение активности кавитации в ультразвуковой ванне, полученное датчиком $P1$ при уровне жидкости 68 мм

Fig. 6. Distribution of cavitation activity in an ultrasonic bath, obtained by sensor $P1$ at a liquid level of 68 мм

Полученные оценки активности кавитации A_{kHi} в разных режимах являются линейно зависимыми между собой, т. е. изменяются пропорционально друг другу с точностью, не менее точности измерений. Аналогичные опыты были проведены для уровней жидкости h в ванне 70, 74 и 82 мм. Во всех случаях разницы в форме распределения A_{kHi} обнаружено не было. Таким образом,

исключение низкочастотной области вплоть до 300 кГц никак не изменило форму получаемых распределений. Из этого можно сделать вывод, что исследованные части спектра взаимосвязаны и изменяются пропорционально при изменении кавитационной активности, что открывает новые возможности для совершенствования методов измерения активности кавитации.

Заключение

1. По результатам проведенных исследований разработан прибор, позволяющий оценивать активность кавитации по кавитационному шуму в четырех различных частотных диапазонах. При этом выходной сигнал формируется как результат интегрирования кавитационного шума в некотором диапазоне частот от f_{\min} до f_{\max} . Верхняя граница интегрирования f_{\max} для всех использованных диапазонов одинакова и равна 10 МГц. В нижней границе f_{\min} значения различались и составляли 1, 70, 180 и 300 кГц соответственно для каждого из режимов работы.

2. Установлено, что изменение диапазона интегрирования в довольно широких пределах за счет изменения нижней границы интегрирования не оказывает заметного влияния на результат измерений активности кавитации, происходит лишь кратное изменение показаний. Этот вывод подтвержден благодаря использованию датчиков, различающихся своими спектральными характеристиками для условий генерирования кавитации погружным излучателем с волноводом и ультразвуковой ванной.

3. Исследованы распределения кавитационного поля в объеме ультразвуковой ванны (частота 35 кГц) и в поле погружного излучателя (21 кГц). В ванне зависимости активности кавитации от расстояния до излучателя имеют вид кривых с чередующимися максимумами и минимумами, что обусловлено наличием компоненты стоячей волны в результирующем ультразвуковом поле. В поле погружного излучателя активность кавитации быстро затухает по мере удаления от него.

Список литературы

1. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.]. Бийск: Изд-во Алтайского госуд. технич. ун-та им. И. И. Ползунова, 2010. 250 с.
2. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / В. О. Абрамов [и др.]. М.: Русавиа, 2006. 687 с.
3. Жулай, Ю. А. Кавитация как средство интенсификации технологических процессов. Опыт применения и перспективы (обзор) / Ю. А. Жулай, В. Ю. Скосарь // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. Т. 105, № 8. С. 7–15.
4. Characterization of Transient Cavitation Activity During Sonochemical Modification of Magnesium Particles / N. Brezhneva [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 70, No 3–4. P. 105315–105327.
5. Gogate, P. R. Design and Scale-Up of Sonochemical Reactors for Food Processing and Other Applications / P. R. Gogate, A. B. Pandit, A. P. Bhat // Power Ultrasonics. 2023. P. 639–663. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00001-4.
6. Скворцов, С. П. Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации / С. П. Скворцов // Наука и образование. 2015. № 2. С. 83–100. DOI: 10.7463/0215.0759806.
7. Hodnett, M. Measurement Techniques in Power Ultrasonics / M. Hodnett, P. Prentice // Power Ultrasonics, 2nd ed. 2023. P. 131–146. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00001-4.
8. Комбинированный метод исследования акустической кавитации / А. В. Котухов [и др.] // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 4. С. 80–88.
9. Pengfei, W. Acoustic Characterization of Cavitation Intensity: A Review / W. Pengfei // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 70. 105878 p.
10. Measurement of Cavitation Noise in Ultrasonic Baths and Ultrasonic Reactors: IEC TS 63001:2019. 29 p.
11. Cavitation. Исследования, технологии, приборы, оборудование [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cavitation.bsuir.by/ru/kavitometr>. Дата доступа: 15.02.2023.
12. Соколов, Н. М. Лабораторный практикум по радиоэлектронике. Ч. 2. Колебательные контуры с сосредоточенными постоянными / Н. М. Соколов, С. С. Фефелов. Ярославль: Ярослав. госуд. педаг. ун-т им. К. Д. Ушинского, 2017.

References

1. Hmelev V. N., Slivin A. N., Barsukov R. V., Tsiganok S. N., Shalunov A. V. (2010) *Application of High-Intensity Ultrasound in Industry*. Biysk, Polzunov Altai State Technical University Publ. 250 (in Russian).
2. Abramov V. O., Abramov O. V., Artemiev V. V. et al. (2006) *Powerful Ultrasound in Metallurgy and Mechanical Engineering*. Moscow, Rusavia Publ. 687 (in Russian).

3. Zhulay Yu. A., Skosar V. Yu. (2013) Cavitation as a Means of Intensification of Technological Processes. Application Experience and Prospects (Review). *Aerospace Engineering and Technology*. 105 (8), 7–15 (in Russian).
4. 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), 105315–105327.
5. Gogate P. R., Pandit A. B., Bhat A. P. (2023) Design and Scale-Up of Sonochemical Reactors for Food Processing and Other Applications. *Power Ultrasonics*. 639–663. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00001-4.
6. Skvortsov S. P. (2015) Techniques of Ultrasound Cavitation Control. *Science and Education*. (2), 83–100. DOI: 10.7463/0215.0759806 (in Russian).
7. Hodnett M., Prentice P. (2023) Measurement Techniques in Power Ultrasonics. *Power Ultrasonics*. 131–146. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00001-4.
8. Kotukhov A. V., Gavrilyuk V. S., Minchuk V. S., Dezhkunov N. V. (2020) Combined Method for Acoustic Cavitation Research. *Doklady BGUIR*. 18 (4), 80–88 (in Russian).
9. Pengfei W. (2022) Acoustic Characterization of Cavitation Intensity: A Review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 70, 105878.
10. IEC TS 63001:2019. *Measurement of Cavitation Noise in Ultrasonic Baths and Ultrasonic Reactors*. 29.
11. *Cavitation. Research, Technology, Devices, Equipment*. Available: <https://cavitation.bsuir.by/ru/kavitometr> (Accessed 15 February 2023) (in Russian).
12. Sokolov N. M., Fefelov S. S. (2017) *Laboratory Practice on Radioelectronics. Part 2. Oscillatory Circuits with Concentrated Constants*. Yaroslavl, Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky Publ. (in Russian).

Вклад авторов

Минчук В. С. разработал концепцию исследования, проанализировал полученные данные, подготовил текст статьи.

Перхунова А. Ю. выполнила исследования, оформила статью для публикации.

Федоринчик М. П. разработал прибор для измерения активности кавитации.

Дежкунов Н. В. интерпретировал результаты исследований, выполнил редактирование статьи.

Authors' contribution

Minchuk V. S. developed the concept of the study, analyzed the data obtained, prepared the text of the article.

Perhunova A. Y. completed the research, designed the article for publication.

Fedorinchik M. P. developed a device for measuring the activity of cavitation.

Dezhkunov N. V. interpreted the research results, edited the article.

Сведения об авторах

Минчук В. С., мл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Ультразвуковые технологии и оборудование» (НИЛ 5.2), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Перхунова А. Ю., стажер, мл. науч. сотр. НИЛ 5.2, БГУИР

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

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

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-35
E-mail: slava.minchuk@bk.ru
Минчук Вячеслав Сергеевич

Information about the authors

Minchuk V. S., Junior Researcher at the Scientific Research Laboratory of Ultrasonic Technologies and Equipment (Lab. 5.2), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Perhunova A. Y., Intern, Junior Researcher at the Lab. 5.2, BSUIR

Fedorinchik M. P., Researcher at the Lab. 5.2, BSUIR

Dezhkunov N. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Lab. 5.2, 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: slava.minchuk@bk.ru
Minchuk Viacheslav Sergheevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-44-51>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.385

ГИРО-ЛБВ-УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

С. В. КОЛОСОВ, О. О. ШАТИЛОВА

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

Поступила в редакцию 24.11.2023

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

Аннотация. Усилители гиротронного типа разрабатываются для различных приложений, требующих высокой мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Расчеты оптимальных конструкций гиротронных ламп бегущей волны (гирос-ЛБВ), представленные в статье, проведены с использованием компьютерной программы Gyro-K с помощью методики преобразования координат, позволяющей существенно сократить время расчетов гирорезонансных приборов за счет сведения трехмерной задачи возбуждения нерегулярного волновода к одномерной. Рассмотрены два варианта создания гирос-ЛБВ на моде волны TE_{02} : первый – работающий на первой гармонике гирочастоты, второй – умножитель частоты. Приведены достижимые характеристики приборов в терагерцевом диапазоне частот – такие как полосы усиления, КПД, коэффициенты усиления и распределения высокочастотных полей в продольном и поперечном сечениях. Гирос-ЛБВ-умножитель частоты обладает полосой усиления 7,2 %, КПД – 17 % и коэффициентом усиления 30 Дб.

Ключевые слова: гиротронная лампа бегущей волны, миллиметровый диапазон, длина волны, умножитель частоты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Колосов, С. В. Гирос-ЛБВ-умножитель частоты / С. В. Колосов, О. О. Шатилова // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 44–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-44-51>.

GYRO-TWT FREQUENCY MULTIPLIER

STANISLAV V. KOLOSOV, OLGA O. SHATILOVA

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

Submitted 24.11.2023

Abstract. Gyrotron-type amplifiers are being developed for various applications requiring high power in the millimeter wavelength range. Calculations of the optimal designs of gyrotron traveling wave tubes (gyro-TWTs), presented in the article, were carried out using the Gyro-K computer program using a coordinate transformation technique, which made it possible to significantly reduce the calculation time of gyroresonance devices by reducing the three-dimensional problem of excitation of an irregular waveguide to a one-dimensional one. Two options for creating a gyro-TWT using the TE_{02} wave mode are considered: the first one is operating at the first harmonic of the gyrofrequency, the second is a frequency multiplier. The achievable characteristics of devices in the terahertz frequency range are presented, such as gain bands, efficiency, gain factors and distributions of high-frequency fields in longitudinal and transverse sections. The gyro-TWT frequency multiplier has a gain bandwidth of 7.2 %, an efficiency of 17 %, and a gain of 30 dB.

Keywords: traveling wave gyrotron tube, millimeter wave, wavelength, frequency multiplier.

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

For citation. Kolosov S. V., Shatilova O. O. (2024) Gyro-TWT Frequency Multiplier. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 44–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-44-51> (in Russian).

Введение

Создание широкополосных усилителей в диапазоне частот, близких к терагерцевому, – актуальная задача. Наиболее перспективные в этом смысле гиротронные лампы бегущей волны (гирос-ЛБВ). Они могут использоваться в качестве широкополосных усилителей большой мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн [1–7].

В статье выполнен анализ характеристик широкополосной гирос-ЛБВ при работе на моде волны TE_{02} , где азимутальный индекс волны равен нулю, а радиальный – двум. В качестве прототипа рассматривался вариант гирос-ЛБВ, приведенный в [8], где принимались следующие данные: ускоряющее напряжение $U = 70$ кВ, электронный ток $I_0 = 9$ А, питч-фактор $q = V_{\perp} / V_{\parallel} = 1,0$, коэффициент усиления $K_{yc} = 40$ дБ, полоса усиления $\Delta f/f = 8$ ГГц. Для расчетов использовали программу Gyro-K [9]. Математическая модель программы Gyro-K процессов, происходящих в гирорезонансных приборах, основывалась на двух взаимосвязанных системах дифференциальных уравнений [9, 10]:

1) возбуждения электромагнитных волн в осесимметричном продольно-нерегулярном волноводе релятивистским электронным пучком;

2) движения электронов в заданных электромагнитных полях.

Уравнения возбуждения нерегулярного волновода построены на основе метода преобразования координат А. Г. Свешникова [11, 12], заключающегося в замене задачи о возбуждении нерегулярного волновода одномерной задачей о возбуждении собственных волн регулярного волновода с единичным радиусом. Процесс самосогласования уравнений движения электронов и возбуждения ими собственных волн регулярного волновода производится на основе метода Галеркина [13]. Такой подход к решению электродинамической задачи позволяет сократить время компьютерных расчетов в 10 и даже в 100 раз, по сравнению с решением подобных задач с использованием PIC-технологий.^{1,2,3,4,5}

В программе Gyro-K можно учитывать одновременно любое множество типов мод (как TE -, так и TM -типов) для различных номеров гармоник основной рабочей частоты. Параметры приборов гирос-ЛБВ задаются в нормированном виде. Например, все длины определяются в радианах ($z = 2\pi Z/\lambda_0$, где λ_0 – рабочая длина волны), скорости нормируются к скорости света. Это позволяет не привязывать результаты расчетов к конкретной рабочей частоте, что обеспечивает применимость полученных значений к любой частоте, за исключением учета омических потерь в стенках волновода, который осуществляется согласно методу Щукина–Леонтовича.

Проведение исследований и их результаты

Расчеты проводили в соответствии с [8] для рабочей частоты 95 ГГц и моды волны TE_{02} . В результате получены следующие результаты: ток электронного потока 13 А $\left(\sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{A} I_0 = 0,73723 \cdot 10^{-3} I_0 [A] = 0,09584 \right)$; ускоряющее напряжение 64 кВ $\left(\beta_0 = \frac{v_0}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{(1,957 \cdot 10^{-6} V_0 + 1)^2}} = 0,4585 \right)$; питч-фактор $q = V_{\perp} / V_{\parallel} = 1,0$; нормированный радиус волновода $g = \frac{2\pi R_w}{\lambda_0} = 7,43$; нормированная длина прибора $l = \frac{2\pi L_w}{\lambda_0} = 288,38$ рад.; число электронных траекторий 48; число шагов 8000.

¹ Ludeking L., Bettenhausen M., Smithe D., Yayas S. (1999) MAGIC, User's Manual. *Mission Research Corporation*.

² MAFIA, User's Guide, Version 4.0, CST GmbH. Darmstadt, Germany.

³ Tarakanov V. P. (1992) User's Manual for Code KARAT. USA, Berkley Research Associates.

⁴ Betton M., Antonsen T., Levush B., Nquyen K., Vlasov A. (1998) MAGY: A Time-Dependent Code for Simulation of Slow and Fast Microwave Devices. *IEEE, Trans. Plasma Sci.* 26 (3), 882–892.

⁵ CST Studio Suite Charged Particle Simulation. *Dassault Systemes Deutschland GmbH Version 2020.0*.

Все параметры на приведенных в статье рисунках представлены в нормированном виде. На рис. 1 изображены интегральные характеристики для рассчитанного варианта gyro-ЛБВ. В данной gyro-ЛБВ достаточно эффективно происходит поперечная группировка электронного потока на второй гармонике гирочастоты (кривая 3).

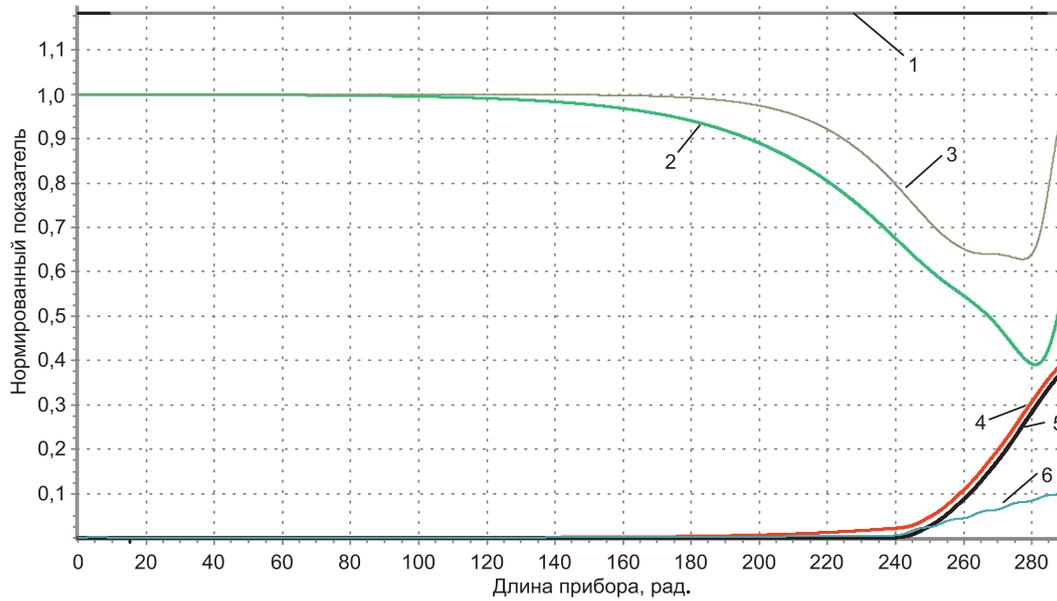


Рис. 1. Интегральные характеристики рассчитанного варианта gyro-ЛБВ:

1 – профиль волновода; 2, 3 – функция поперечной группировки электронов по первой и второй гармоникам гирочастоты соответственно;

4, 5 – электронный и волновой КПД соответственно; 6 – нормированная амплитуда моды волны TE_{02}

Fig. 1. Integral characteristics of the calculated version of the gyro-TWT: 1 – waveguide profile;

2, 3 – function of transverse grouping of electrons at the first and second harmonics of the gyrofrequency, respectively; 4, 5 – electronic and wave efficiency, respectively;

6 – normalized amplitude of the TE_{02} wave mode

Электронный КПД – это относительная энергия, отданная электронным потоком электромагнитным волнам, на рис. 1 он составляет 37 %. Волновой КПД – относительная энергия, переносимая электромагнитным полем. Разница между электронным и волновым КПД – это потери энергии в стенках волновода. На рис. 2 представлены частотные характеристики gyro-ЛБВ для обоих КПД, где в процессе расчетов при коэффициенте усиления 41,7 дБ полоса усиления составила 12,6 %.

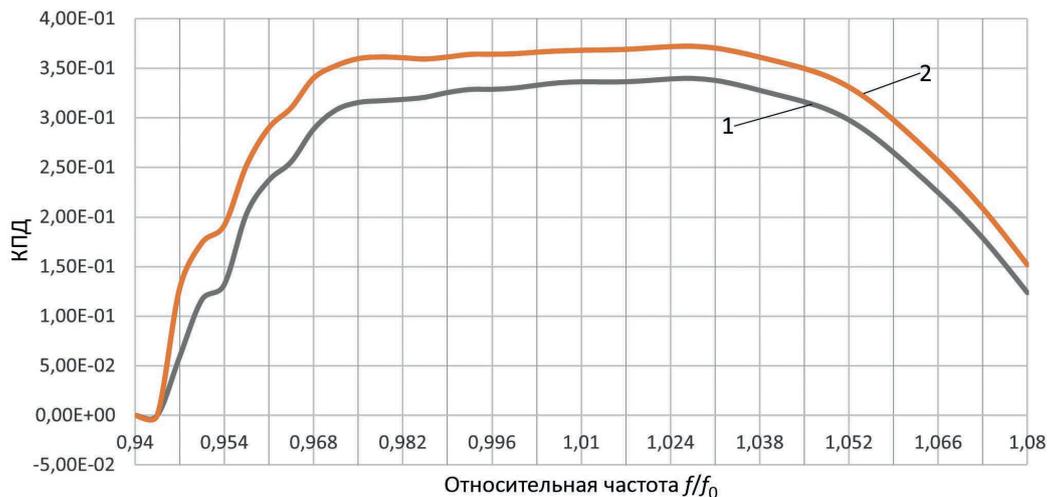


Рис. 2. Частотная характеристика gyro-ЛБВ для КПД: 1 – волнового; 2 – электронного

Fig. 2. Frequency response of the gyro-TWT for efficiency: 1 – wave; 2 – electronic

На рис. 3 показаны распределения модуля высокочастотного поля в продольном и поперечном сечениях волновода.

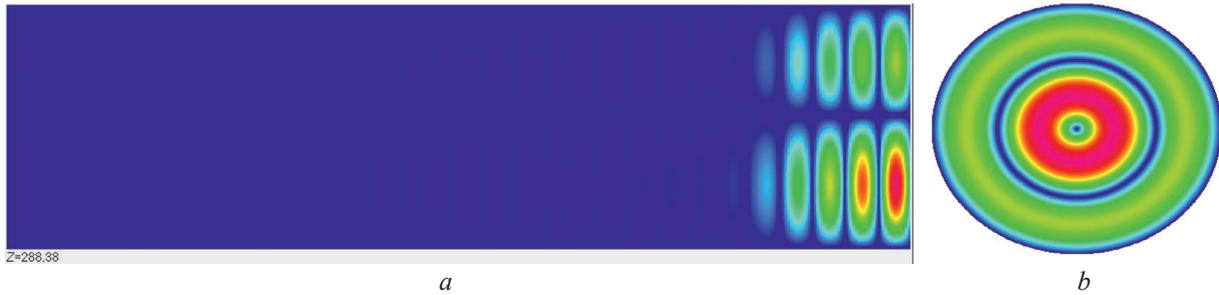


Рис. 3. Распределения модуля высокочастотного поля в продольном (а) и поперечном (b) сечениях волновода

Fig. 3. Distributions of the modulus of the high-frequency field in the longitudinal (a) and transverse (b) sections of the waveguide

В гирорезонансных приборах функции поперечной группировки электронного потока определяются следующим образом:

– по первой гармонике:

$$F_1 = 1 - \left\{ \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos(\alpha_{is}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \sin(\alpha_{is}) \right) \right]^2 \right\};$$

– по второй гармонике:

$$F_2 = 1 - \left\{ \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} 2\cos(\alpha_{is})\sin(\alpha_{is}) \right) \right]^2 + \left[\sum_{s=1}^{N_s} G_s \left(\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (2\cos^2(\alpha_{is}) - 1) \right) \right]^2 \right\},$$

где s – параметр, определяющий номер слоя электронного потока; i – номер электронной траектории в s -м слое; α_{is} – относительная фаза вращения электрона на ларморовской орбите.

Если отсутствует поперечная группировка электронов на ларморовской орбите, то функции F_1 и F_2 равны единице, а группировка приводит к уменьшению этих величин вплоть до нуля. Поэтому был исследован вариант умножителя частоты на gyro-ЛБВ на моде волны TE_{02} . Результаты оптимизационных расчетов представлены на рис. 4–6.

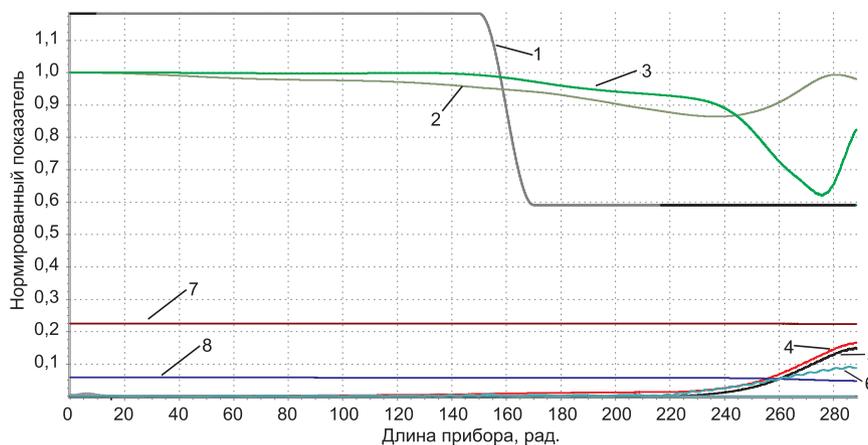


Рис. 4. Интегральные характеристики умножителя частоты на gyro-ЛБВ на моде волны TE_{02} :

1–6 – то же, что на рис. 1; 7 – радиус ведущего центра вращения электронов;

8 – средний радиус вращения электронов на ларморовской орбите

Fig. 4. Integral characteristics of a frequency multiplier on a gyro-TWT on the TE_{02} wave mode:

1–6 – the same as in Fig. 1; 7 – radius of the leading center of electron rotation;

8 – average radius of rotation of electrons in the Larmor orbit



Рис. 5. Распределение модуля напряженности электромагнитного поля в продольном сечении волновода
Fig. 5. Distribution of the electromagnetic field intensity modulus in the longitudinal section of the waveguide

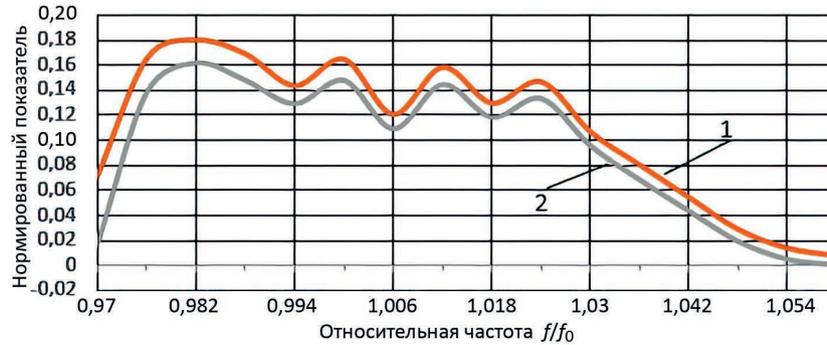


Рис. 6. Частотная характеристика gyro-ЛБВ-умножителя частоты: 1 – КПД-E; 2 – КПД-V
Fig. 6. Frequency response of gyro-TWT frequency multiplier: 1 – efficiency-E; 2 – efficiency-V

Для эффективной работы рассматриваемой gyro-ЛБВ пришлось увеличить значения электронного тока в 1,4 раза и входной мощности в 12 раз. Электронный КПД достиг 17 %, а полоса усиления 7,2 %.

Расчеты gyro-ЛБВ, работающей на первой гармонике гирочастоты, проводили с учетом только моды волны TE_{02} . Следует отметить, что и расчеты gyro-умножителя частоты тоже проводили с учетом мод данной волны на ее первой и второй гармониках. Распределение поперечной скорости электронов, нормированной к скорости света (ось ординат), по длине gyro-ЛБВ (ось абсцисс) показано на рис. 7.

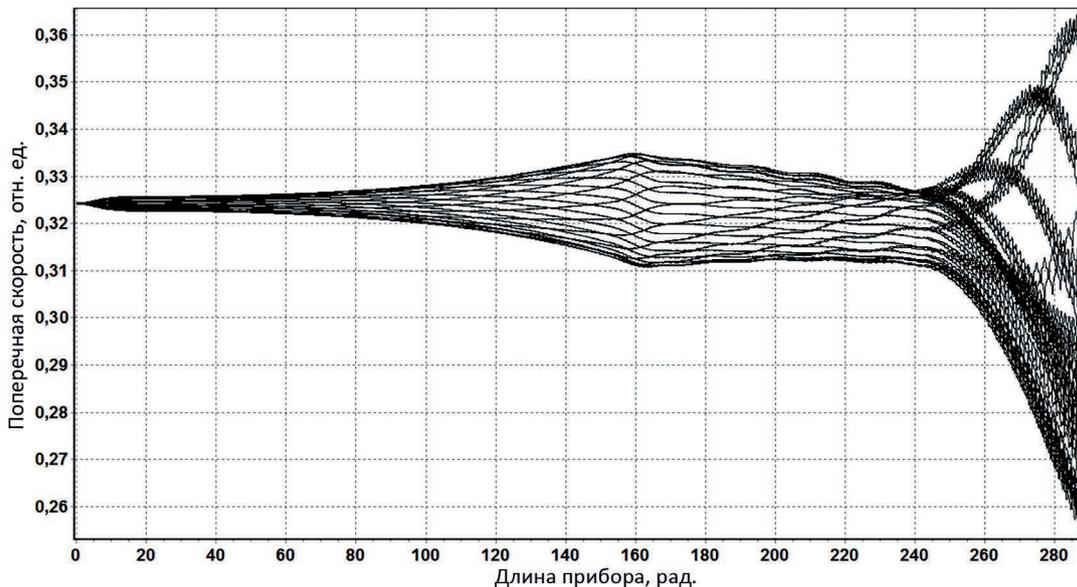


Рис. 7. Распределение поперечных скоростей электронов по длине лампы бегущей волны
Fig. 7. Distribution of transverse electron velocities along the length of a traveling wave lamp

Согласно рис. 7, начиная с длины прибора 160 рад., траектории скоростей имеют излом. Это можно объяснить тем, что при резком сужении волновода следует учитывать большее число вол-

новых мод. Провели расчеты с учетом трех мод TE_{02} , TE_{03} и TE_{04} для первой и второй волновых гармоник. В этом случае распределение поперечных скоростей электронов стало более гладким – без изломов скоростей (рис. 8).

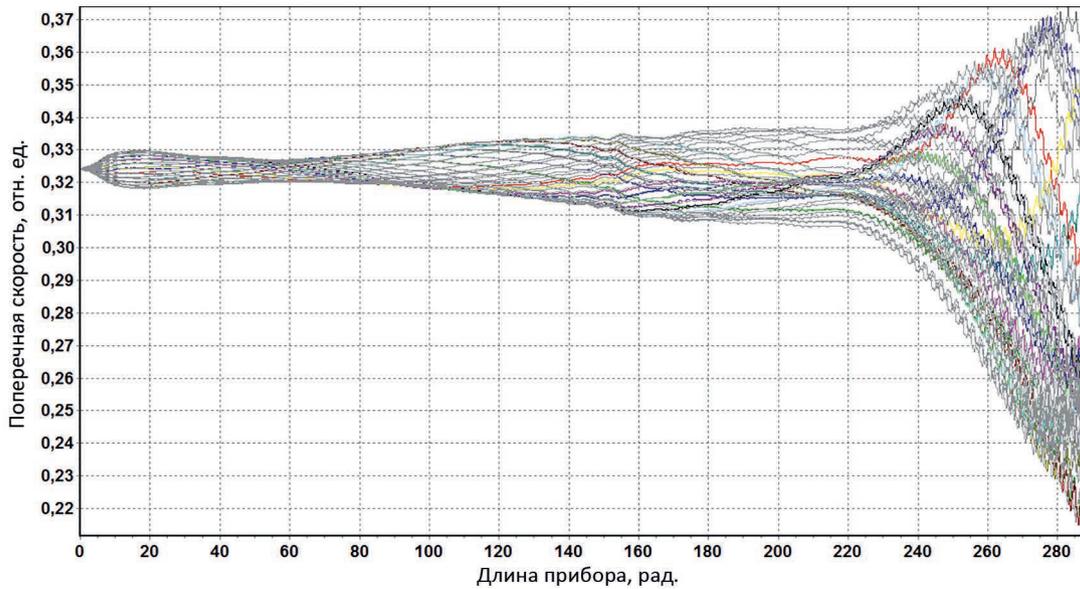


Рис. 8. Распределение продольных скоростей электронов с учетом трех волновых мод
Fig. 8. Distribution of longitudinal electron velocities taking into account three wave modes

Исследовали влияние начального поперечного разброса скоростей электронов на эффективность работы ЛБВ. На рис. 9 показана зависимость КПД giro-ЛБВ от питч-фактора.

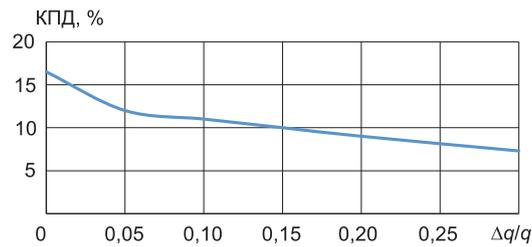


Рис. 9. Зависимость КПД giro-ЛБВ от питч-фактора
Fig. 9. The dependence of efficiency of the gyro-TWT on the pitch factor

Согласно рис. 9, КПД giro-ЛБВ изменяется от 17,0 до 7,5 % при увеличении углового разброса поперечных скоростей электронов до 30 %, что указывает на достаточную устойчивость giro-ЛБВ к начальному угловому разбросу электронов, который определяется конструкцией электронной магнетронной пушки. Распределение поперечных скоростей электронов по длине прибора при наличии начального углового их разброса показано на рис. 10.

Заключение

1. Гиро-ЛБВ на моде волны TE_{02} обеспечивает хорошие характеристики прибора по КПД (37 %), по полосе усиления (12,6 %) и коэффициенту усиления (41,7 дБ) при рабочей частоте 95 ГГц. Гиро-ЛБВ-умножитель частоты позволяет продвинуться в более высокий диапазон частот 190 ГГц при вполне приемлемых параметрах электронного потока, волновода и магнитостатического поля (КПД = 17 %, полоса усиления $\Delta f/f = 7,2$ %, коэффициент усиления 30 дБ).

2. Нормированный радиус волновода на входе в усилитель составлял 7,430 рад., а на выходе – 3,716 рад. Основные потери энергии высокочастотного поля в стенках волновода наблюдались в последней трети волновода, а диаметр волновода здесь был почти в два раза меньше, чем на входе усилителя. Это позволяет упростить систему охлаждения и реализовать ее только в последней секции волновода.

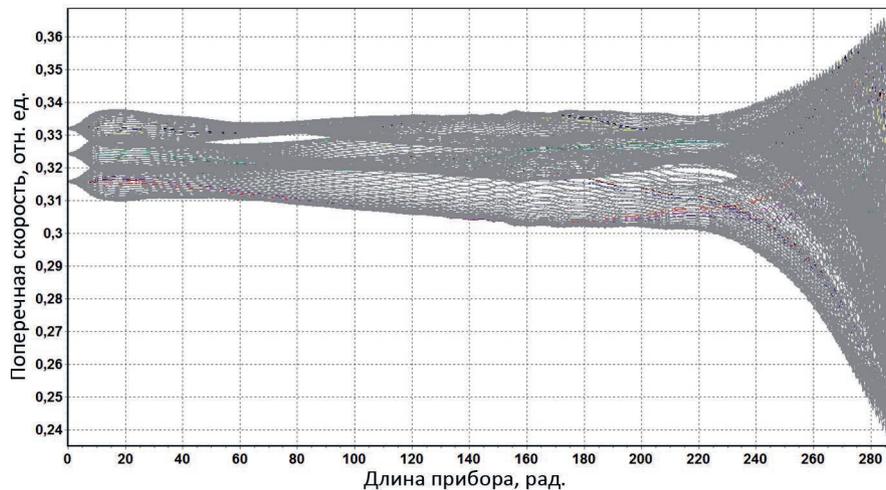


Рис. 10. Распределение поперечных скоростей электронов по длине прибора при наличии их начального углового разброса

Fig. 10. Distribution of transverse electron velocities along the length of the device in the presence of their initial angular distribution

Список литературы

1. Thumm, M. State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices / M. Thumm // *KIT Scientific Reports* 7761. 2021.
2. Kartikeyan, M. V. Gyrotrons: High Power Microwave and Millimeter Wave Technology / M. V. Kartikeyan, E. Borie, M. Thumm // *Gyrotrons*. Berlin/Heidelberg, Germany; NY, USA, 2003. P. 23–25.
3. Vacuum Electronic High Powerterahertz Sources / J. H. Booske [et al.] // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1. P. 54–75.
4. Nusinovich, G. S. The Gyrotron at 50: Historical Overview / G. S. Nusinovich, M. K. A. Thumm, M. I. Petelin // *J. Infr. Milli. Terahz. Waves*. 2014. Vol. 35. P. 325–381.
5. Characteristics and Applications of Fast-Wavegyrodevices / K. L. Felch [et al.] // *Proc. IEEE*. 1999. Vol. 87. P. 752–781.
6. A Quartercentury of Gyrotron Research and Development / V. L. Granatstein [et al.] // *IEEE Trans. PlasmaSci.* 1997. Vol. 25. P. 1322–1335.
7. Zapevalov, V. E. Evolution of the Gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics* / V. E. Zapevalov. 2012. Vol. 54, No 8–9. P. 507–518.
8. Design and Preliminary Experiment of W-Band Broadband TE₀₂ Mode Gyro-TWT / Xu Zeng [et al.] // *Electronics*. 2021. Vol. 10, No 16. P. 1950–1964.
9. Колосов, С. В. Компьютерная программа GYRO-K для разработки и проектирования гирорезонансных приборов СВЧ / С. В. Колосов, И. Е. Зайцева // *СВЧ-электроника*. 2017. № 2. С. 46–48.
10. Колосов, С. В. Оптимизация электронных приборов СВЧ с нерегулярными волноводами / С. В. Колосов // LAP LAMPERT Academic Publishing RU. 2018.
11. Свешников, А. Г. Возбуждение нерегулярных волноводов / А. Г. Свешников // *Научные доклады высшей школы. Серия: Физико-математические науки*. 1959. № 2. С. 162–165.
12. Свешников, А. Г. Нерегулярные волноводы / А. Г. Свешников // *Известия вузов СССР. Серия: Радиофизика*. 1959. Т. 2, № 5. С. 720–723.
13. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина / К. Флетчер. М.: Мир, 1988.

References

1. Thumm M. (2021) State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices. *KIT Scientific Reports* 7761.
2. Kartikeyan M. V., Borie E., Thumm M. (2003) *Gyrotrons: High Power Microwave and Millimeter Wave Technology*. Springer Berlin/Heidelberg, Germany; NY, USA. 23–25.
3. Booske J. H., Dobbs R. J., Joye C. D., Kory C. L., Neil G. R., Park G. S., et al. (2011) Vacuum Electronic High Powerterahertz Sources. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 1, 54–75.
4. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A., Petelin M. I. (2014) The Gyrotron at 50: Historical Overview. *J. Infr. Milli. Terahz. Waves*. 35, 325–381.
5. Felch K. L., Danly B. G., Jory H. R., Kreischer K. E., Lawson W., Levush B., et al. (1999) Characteristics and Applications of Fast-Wavegyrodevices. *Proc. IEEE*. 87, 752–781.

6. Granatstein V. L., Levush B., Danly B. G., Parker R. K. (1997) A Quartercentury of Gyrotron Research and Development. *IEEE Trans. PlasmaSci.* 25, 1322–1335.
7. Zapevalov V. E. (2012) Evolution of the Gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 54 (8–9), 507–518.
8. Xu Zeng, Chaohai Du, An Li, Shang Gao, Zheyuan Wang, Yichi Zhang, et al. (2021) Design and Preliminary Experiment of W-Band Broadband TE₀₂ Mode Gyro-TWT. *Electronics.* 10 (16), 1950–1964.
9. Kolosov S. V., Zaitseva I. E. (2017) Computer Program GYRO-K for the Development and Design of Gyroresonant Microwave Devices. *SHF-Electronics.* (2), 46–48 (in Russian).
10. Kolosov S. V. (2018) Optimization of Microwave Electronic Devices with Irregular Waveguides. *LAP LAMPERT Academic Publishing RU* (in Russian).
11. Sveshnikov A. G. (1959) Excitation of Irregular Waveguides. *Scientific Reports of Higher School, Ser. Physical and Mathematical Sciences.* (2), 162–165 (in Russian).
12. Sveshnikov A. G. (1959) Irregular Waveguides. *News of Universities of the USSR. Series: Radiophysics.* 2 (5), 720–723 (in Russian).
13. Fletcher K. (1988) *Numerical Methods Based on the Galerkin Method.* Moscow, Mir Publ. (in Russian).

Вклад авторов

Колосов С. В. поставил задачу по расчету оптимальной конструкции gyro-ЛБВ-умножителя частоты в области миллиметрового диапазона длин волн.

Шатилова О. О. произвела расчеты оптимальной конструкции gyro-ЛБВ-умножителя частоты в области миллиметрового диапазона длин волн, которые позволили достичь следующих параметров усилителя: КПД = 17 %, полоса усиления $\Delta f/f = 7,2$ %, коэффициент усиления 30 дБ.

Authors' contribution

Kolosov S. V. set the task of calculating the optimal design of a gyro-TWT – a frequency multiplier in the millimeter wavelength range.

Shatilova O. O. made calculations of the optimal design of a gyro-TWT – a frequency multiplier in the millimeter wavelength range, which made it possible to achieve the following amplifier parameters: efficiency 17 %, gain band $\Delta f/f = 7.2$ %, gain 30 dB.

Сведения об авторах

Колосов С. В., д-р физ.-мат. наук, проф. каф. вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Шатилова О. О., ст. преп. каф. вычислительных методов и программирования, 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 29 571-25-30
E-mail: kolosov@bsuir.by
Колосов Станислав Васильевич

Information about the authors

Kolosov S. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Shatilova O. O., Senior Lecturer at the Department of Computational Methods and Programming, 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 29 571-25-30
E-mail: kolosov@bsuir.by
Kolosov Stanislav Vasil'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-52-60>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ РАЗЛИЧИЙ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ САМОЛЕТА, И ИМИТИРУЮЩЕЙ ПОМЕХИ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАЩИТЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

С. Р. ГЕЙСТЕР¹, ЦЯНЬЛАНЬ ХУАН²

¹ОАО «АЛЕВКУРП» (г. Минск, Республика Беларусь)

²Национальный университет оборонных технологий (г. Чанша, Китайская Народная Республика)

Поступила в редакцию 27.11.2023

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

Аннотация. Создание технологии DRFM (Digital Radio Frequency Memory) является революционным шагом в развитии техники постановки имитирующих помех. Технология позволила с высоким качеством выполнять преобразования принятого сигнала, вносить в него необходимые изменения и излучать в виде имитирующей помехи. Сегодня достигнут высокий уровень имитации радиолокационных сигналов, отраженных от реальных объектов. В основе противодействия таким помехам лежит детальный анализ различий реального отраженного сигнала и имитирующих помех. В связи с этим рассматривается математическая модель сигнала, отраженного от пространственно распределенного объекта, до и после частотного преобразования на видеочастоту. С учетом анализа типовых вариантов формирования помех рассматриваются математические модели имитирующих помех, обеспечивающих различные степени схожести с отраженным сигналом. Результаты анализа моделей являются основой для построения алгоритмов защиты радиолокационных станций от имитирующих помех.

Ключевые слова: защита радиолокатора, отраженный сигнал, математическая модель имитирующей помехи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гейстер, С. Р. Анализ различий сигнала, отраженного от самолета, и имитирующей помехи в приложении к защите радиолокационных станций / С. Р. Гейстер, Цяньлань Хуан // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 52–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-52-60>.

ANALYSIS OF DIFFERENCES IN THE SIGNAL REFLECTED FROM AN AIRCRAFT AND SIMULATED INTERFERENCE IN AN APPLICATION TO RADAR PROTECTION

SERGEY R. HEISTER, QIANLAN HUANG

¹JSC “ALEVKURP” (Minsk, Republic of Belarus)

²National University of Defense Technology (Changsha, People’s Republic of China)

Submitted 27.11.2023

Abstract. The creation of DRFM (Digital Radio Frequency Memory) technology is a revolutionary step in the development of simulating interference techniques. The technology made it possible to transform the received signal with high quality, make the necessary changes to it and emit it in the form of simulating interference. Currently, a high level of imitation of radar signals reflected from real objects has been achieved. The basis for counteracting such interference is a detailed analysis of the differences between the real reflected signal and simulating interference.

rence. In this regard, a mathematical model of a signal reflected from a spatially distributed object is considered before and after frequency conversion to video frequency. Based on the analysis of typical variants of interference generation, mathematical models of simulating interference are considered, providing various degrees of similarity to the reflected signal. The results of the model analysis are the basis for constructing algorithms for protecting radar stations from simulating interference.

Keywords: radar protection, reflected signal, mathematical model of simulating interference.

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

For citation. Heister S. R., Qianlan Huang (2024) Analysis of Differences in the Signal Reflected from an Aircraft and Simulated Interference in an Application to Radar Protection. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 52–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-52-60> (in Russian).

Введение

Средства бортовой защиты летательных аппаратов (ЛА) широко применяются в военной сфере. В настоящее время все пилотируемые летательные аппараты военного назначения имеют индивидуальные средства противодействия радиолокационным системам наведения оружия, обеспечивающие постановку комбинированных помех. Такие помехи представляют собой сочетание активных шумовых помех, уводящих и многократных по дальности – доплеровской частоте. Кроме того, в пространственной области возможен увод по угловым координатам. Для снижения вероятности поражения ЛА при наведении ракеты на бортовой источник помех в последние 20–30 лет активно применяют буксируемые радиолокационные ловушки.

Защита радиолокационных станций (РЛС) от помех – первостепенная задача, которая решалась на протяжении всего времени от момента появления РЛС. Сегодня актуальность этой задачи определяется ростом технических возможностей по формированию имитирующих помех, параметры которых максимально приближаются к параметрам сигнала, отраженного от ЛА. Для повышения эффективности имитирующих помех должны быть приняты меры по обеспечению их схожести с сигналами, отраженными от различных летательных аппаратов, отличающихся в первую очередь по размерам (большой, средний, малый) и классу двигательной установки (реактивные, винтовые).

В периодике встречается много публикаций, посвященных описанию и анализу отдельных вопросов радиоэлектронного подавления (РЭП). Детальное издание энциклопедического уровня, сочетающее вопросы технического построения средств РЭП и их тактического применения, – это [1]. На более современном уровне, но кратко, данные вопросы изложены в [2]. Математическое представление принятых сигналов в приложении к современной технике запоминания и воспроизведения сигналов и полей для формирования помех РЛС приведено в [3]. Однако в основной массе существующих публикаций отсутствуют ясно изложенные математические модели имитирующих радиолокационных помех на уровне когерентной междупериодной структуры. В то же время именно эти математические модели, учитывающие все особенности законов внутривнутриодной и междупериодной модуляции зондирующих сигналов, позволяют сформировать радиолокационные портреты объекта и помехи с высоким разрешением. Этот пробел и восполняет данная статья.

Математическая модель сигнала, отраженного от самолета

В общем случае любой летательный аппарат, облучаемый электромагнитной волной сантиметрового диапазона, в приложении к задаче описания отраженного сигнала можно представить [4] в виде совокупности областей локального отражения. С учетом этого представим ЛА, наблюдаемый под определенными ракурсами по азимуту ϕ_β и углу места ϕ_ϵ , набором из B_{LRA} областей локального отражения. В центре каждой области расположен изотропный отражатель, который в произвольной b -й области (отражатель с номером b) характеризуется собственной эффективной отражающей поверхностью $\sigma_i(b)$ и координатами относительно центра ЛА. Самолет в целом является относительно жесткой конструкцией, в которой отражатели, расположенные на поверхности с облучаемой стороны, движутся упорядоченно в соответствии с линией его полета.

Будем полагать, что зондирующий сигнал представляет собой когерентную последовательность из N_{Tr} зондирующих сигналов с постоянным (для принципиального упрощения описания) периодом повторения T_r и законом внутривнутриодной модуляции $U_0(t)$

$$u_0(t) = E_0 \exp[i(2\pi f_0 t + \varphi_0)] \sum_{n=0}^{N_r-1} U_0(t - nT_r),$$

где f_0 , φ_0 – несущая частота и начальная фаза зондирующего сигнала соответственно.

С учетом принятых обозначений последовательность сигналов, отраженных от отражателя с номером b , в течение L периодов зондирования на выходе приемной антенны РЛС описывается выражением

$$u_s(t, b) = E_s(t, b) \exp[i(2\pi f_0(t - t_r(t, b)) + \varphi_s(b) + \varphi_0)] \sum_{l=0}^{L-1} U_0(t - lT_r - t_r(t, b)), \quad (1)$$

где $E_s(t, b)$, $\varphi_s(b)$, $t_r(t, b)$ – амплитуда, начальная фаза и время задержки сигнала, отраженного от отражателя с номером b ; $t_r(t, b) = \frac{2r(t, b)}{c}$ – время задержки сигнала, связанное с радиальной дальностью $r(t, b)$ до b -го отражателя; c – скорость распространения электромагнитной волны.

Удобно рассматривать комплексную амплитуду отраженного сигнала на видеочастоте после частотного преобразования с использованием сигнала гетеродина $u_G(t) = E_{0G} \exp[i(2\pi f_0 t + \varphi_0)]$:

$$U_{s_Rc}(t, b) = u_s(t, b) u_G^*(t) = E_s(t, b) \exp[i(-2\pi f_0 t_r(t, b) + \varphi_s(b))] \sum_{l=0}^{L-1} U_0(t - lT_r - t_r(t, b)), \quad (2)$$

где $u_G^*(t) = E_{0G} \exp[-i(2\pi f_0 t + \varphi_0)]$ – комплексно-сопряженный сигнал гетеродина, для упрощения выражений принимаем $E_{0G} = 1$ В.

Соответственно доплеровский набег по фазе $\varphi_{ds}(t, b)$ и доплеровская частота $\omega_{ds}(t, b)$ сигнала, отраженного от b -го отражателя, определяются выражениями:

$$\varphi_{ds}(t, b) = -\frac{2\pi}{\lambda} 2r(t, b); \quad \omega_{ds}(t, b) = \frac{\varphi_{ds}(t, b)}{\partial t} = -\frac{2\pi}{\lambda} 2 \frac{\partial r(t, b)}{\partial t}. \quad (3)$$

Из (3) следует выражение, связывающее доплеровскую частоту и ее знак с радиальной скоростью перемещения отражателя $v(t, b)$ и ее знаком относительно РЛС на выходе устройства преобразования принятого сигнала на видеочастоту:

$$f_{ds}(t, b) = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{\partial r(t, b)}{\partial t} = -\frac{2}{\lambda} v_r(t, b). \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что при приближении отражателя к РЛС (радиальная дальность уменьшается и, следовательно, радиальная скорость отрицательна) доплеровская частота имеет положительное значение, а при удалении отражателя от РЛС (радиальная дальность увеличивается и, следовательно, радиальная скорость положительна) – отрицательное. На основе (2) можно записать уравнение для комплексной амплитуды сигнала, отраженного от ЛА, на выходе устройства преобразования принятого сигнала на видеочастоту

$$U_{s\Sigma_Rc}(t) = \sum_{b=1}^{B_{LRA}} \left(E_s(t, b) \exp\left[i\left(-\frac{2\pi}{\lambda} 2r(t, b) + \varphi_s(b)\right)\right] \sum_{l=0}^{L-1} U_0(t - lT_r - t_r(t, b)) \right). \quad (5)$$

Выражение (5) является наиболее универсальным для описания отраженного сигнала после преобразования на видеочастоту и построения алгоритмов обработки, поскольку позволяет напрямую использовать координаты ЛА и отражателей в ее конструкции для определения расстояний $r(t, b)$, $b = \overline{1, B_{LRA}}$, и соответствующих фазовых сдвигов $\varphi_{ds}(t, b)$, $b = \overline{1, B_{LRA}}$, а также начальные фазы $\varphi_s(b)$, $b = \overline{1, B_{LRA}}$.

Краткая характеристика имитирующих помех и ограничения

Имитирующие помехи (ИП) могут создаваться для противодействия обзору пространства (для РЛС-обзора) и наведению ракет (для станций наведения ракет (СНР) и головок самонаведения (ГСН) ракет). Методы защиты от ИП для этих вариантов различаются.

Рассмотрим ИП в приложении к противодействию наведению ракеты на ЛА. На рис. 1 представлены основные варианты наведения ракеты на самолет. Для сокращения математических выкладок ограничимся рассмотрением ИП для ракеты с активной ГСН, которые применимы также для однопозиционной РЛС.



Рис. 1. Основные варианты наведения ракеты на самолет
Fig. 1. The main options for pointing a missile at an aircraft

Имитирующие помехи можно характеризовать по месту формирования и излучения, а также по уровню приближения к реальному отраженному сигналу. По месту формирования и излучения ИП могут формироваться:

- на борту ЛА и излучаться бортовыми антеннами ЛА. Этот вариант является наиболее старым и распространенным;
- на борту ЛА, передаваться на буксируемую ловушку и излучаться антенной буксируемой ловушки. Этот вариант используется для защиты самолетов;
- на борту ЛА, излучаться в сторону дополнительного пассивного отражателя (поверхности земли, облака дипольных отражателей) и отражаться в сторону РЛС этим дополнительным отражателем [1]. Этот вариант возможен, но ограничивается необходимостью иметь дополнительный пассивный отражатель;
- в ловушке (буксируемой или отстреливаемой) и излучаться антенной буксируемой ловушки. Этот вариант наименее реалистичен из-за ограниченных возможностей по реализации полноценного разведприемника на борту недорогой ловушки.

По уровню приближения к реальному отраженному сигналу ИП можно характеризовать следующим образом:

- по наличию флуктуаций: не флуктуирующие и флуктуирующие по амплитуде и фазе. Современные ИП должны иметь междупериодные флуктуации по амплитуде (имитация изменений эффективной отражающей поверхности (ЭОП)) и фазе (имитация взаимных перемещений элементов конструкции ЛА);
- по формированию дополнительного доплеровского сдвига частоты: без формирования и с формированием;
- по формированию пространственной структуры, соответствующей размерам ЛА: без формирования и с формированием.

Имитация пространственной структуры предполагает создание распределенности ИП по времени задержки (дальности), по доплеровской частоте (имитация модуляции винтами, компрессорами, турбинами и проч.), в картинной плоскости. Менее сложно, а, следовательно, более реалистично, формирование распределенности ИП по времени задержки и доплеровской частоте. Имитацию распределенности в картинной плоскости реализовать сложнее, так как излучение ИП обычно осуществляется одной антенной (рупорный излучатель, антенная решетка).

На рис. 2 представлена иллюстрация традиционного варианта постановки ИП с борта самолета при индивидуальной защите от атакующей ракеты с активной ГСН. В этом варианте все процедуры (прием электромагнитной волны (ЭМВ), преобразование зондирующего сигнала, формирование ИП и излучение ИП) осуществляются на борту ЛА. Недостатком такого варианта является размещение передающей антенны на борту ЛА, что позволяет ГСН наводиться на источник излучения – самолет. Достоинства данного варианта – удобство реализации и отсутствие дополнительных временных задержек.

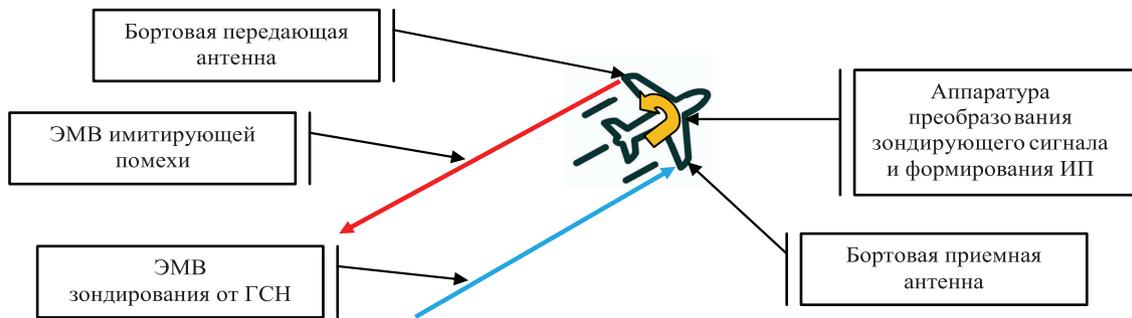


Рис. 2. Вариант постановки имитирующих помех с борта самолета
Fig. 2. Option for setting up simulating interference from an aircraft

На рис. 3 представлена иллюстрация другого варианта защиты – формирование ИП на борту самолета и постановка ИП с буксируемой ловушки. В этом способе прием и преобразование сигнала, формирование ИП осуществляются на борту ЛА, а затем сформированная ИП преобразуется на несущую частоту оптического диапазона, по оптоволоконному кабелю длиной L_{TD} передается на буксируемую ловушку, где преобразуется на радиочастоту, усиливается и излучается антенной ловушки. Достоинство данного варианта – вынос излучающей антенны за пределы ЛА, а принципиальный недостаток – внесение в ИП дополнительной задержки τ_{TD} при передаче сигнала в оптоволоконном кабеле. Эту задержку можно оценить, используя выражение:

$$\tau_{TD} = \frac{L_{TD}}{v_{oc}} - \frac{L_{TD}}{c}, \quad (6)$$

где $v_{oc} = \frac{c}{n_{oc}}$ – скорость распространения ЭМВ в оптическом кабеле; n_{oc} – коэффициент преломления оптического сердечника кабеля.

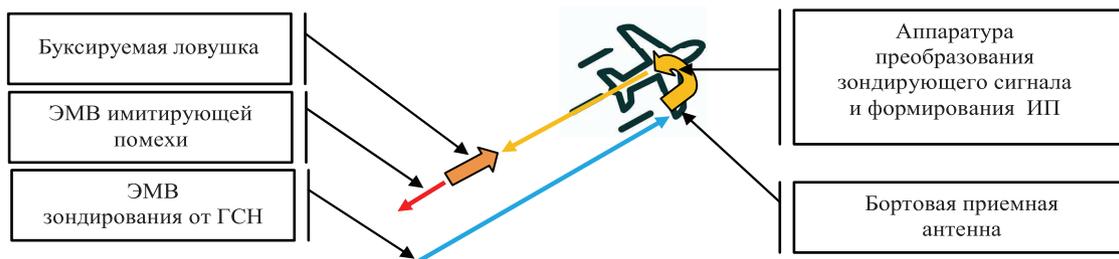


Рис. 3. Вариант формирования помехи на самолете и постановки помехи с буксируемой ловушки
Fig. 3. Option for creating jamming on an airplane and setting up jamming from a towed decoy

Например, для типовых значений $L_{TD} = 150$ м и $n_{oc} = 1,49$ скорость распространения и задержка будут соответственно равны: $v_{oc} \cong 2,013 \cdot 10^8$ м/с и $\tau_{TD} = 0,245$ мкс. Такая задержка является существенной и создаст проблему в защите ЛА при использовании в ГСН простых прямоугольных радиоимпульсов длительностью $T_0 \leq \frac{\tau_{TD}}{2}$.

Модель имитирующих помех в активной головке самонаведения

Перед рассмотрением математической модели ИП целесообразно определить технические возможности бортовой аппаратуры ЛА, определяющие способ формирования дополнительного доплеровского сдвига $\Delta\omega_{ds_IP}$ по частоте:

способ 1 – на основе управления поимпульсной задержкой сигналов ИП, который фактически соответствует процессу появления доплеровского сдвига по частоте в сигнале, отраженном от движущегося объекта;

способ 2 – на основе частотного преобразования с использованием опорного сигнала, частота которого сдвинута на необходимое значение $\Delta\omega_{ds_IP}$. Для реализации этого способа требуется синтезатор СВЧ-сигнала с управлением частотой от единиц до сотен герц.

До появления технологии DRFM (Digital Radio Frequency Memory) в постановщике когерентных помех для создания дополнительного доплеровского сдвига по частоте использовались лам-

пы бегущей волны, в которых фазовая модуляция обеспечивалась путем управления задержкой электронного потока (способ 1). В технологии DRFM сложно реализовать способ 1, поскольку для этого требуется использование частоты дискретизации в десятки гигагерц, при которой обеспечивается требуемый минимальный интервал поимпульсного временного сдвига для имитации доплеровских сдвигов в сантиметровом диапазоне длин волн. Гораздо проще реализовать способ 2:

– сформировать ИП без дополнительного частотного сдвига на промежуточной частоте $U_{IP_N}(t) \exp[i2\pi f_{pr} t]$, где $U_{IP_N}(t)$ – комплексный закон модуляции ИП. В этом сигнале, сформированном из принятого зондирующего сигнала, уже содержится доплеровский сдвиг по частоте на прием $f_{ds_1/2} = -\frac{v_r}{\lambda}$, где v_r – радиальная скорость ЛА относительно ГСН (с учетом (4));

– сформировать дополнительный доплеровский сдвиг в сигнале синтезатора гетеродинных частот, который используется для преобразования ИП на несущую частоту. Формируемый сигнал синтезатора имеет вид $u_{G_IP}(t) = E_{0G_IP} \exp[i(2\pi(f_G + \Delta f_{ds_IP})t)]$, где f_G – опорная частота; $\Delta f_{ds_IP} = \frac{\Delta\omega_{ds_IP}}{2\pi}$ – дополнительный доплеровский сдвиг; E_{0G_IP} – несущественная для анализа амплитуда сигнала (примем $E_{0G_IP} = 1$ В);

– преобразовать имитирующие помехи на несущую частоту путем перемножения $U_{IP_N}(t) \exp[i2\pi f_{pr} t] u_{G_IP}(t)$ и частотной фильтрации с выделением искомой имитирующей помехи $u_{IP}(t) = U_{IP_N}(t) \exp[i(2\pi((f_{pr} + f_G + \Delta f_{ds_IP})t))]$. Заметим, что в приведенных выражениях не рассматриваются несущественные для анализа начальные фазы сигналов.

Рассмотрим типовую ИП, которая не имитирует распределенную пространственную структуру ЛА. Ее математическая модель на выходе антенны активной ГСН описывается выражением

$$u_{IP}(t) = M_{IP}(t) \exp\left[i\left(2\pi f_0 \left(t - (t_r(t) + \Delta t_{r_IP}(t)) - \tau_{Z\ Form} - \tau_{TD} \right) + \varphi_{ds_IP}(t) + \varphi_0 \right) \right] \times \sum_{l=0}^{L-1} U_0 \left(t - lT_r - (t_r(t) + \Delta t_{r_IP}(t)) - \tau_{Z\ Form} - \tau_{TD} \right), \quad (7)$$

где $M_{IP}(t) = E_{IP}(t) \exp[i\varphi_{IP}(t)]$ – комплексная огибающая ИП, включающая законы флуктуаций амплитуды $E_{IP}(t)$ и фазы $\varphi_{IP}(t)$; $t_r(t)$ – время распространения ЭМВ от ГСН до приемной бортовой антенны (корпуса ЛА) и обратно в ГСН; $\Delta t_{r_IP}(t)$ – закон изменения дополнительной временной задержки закона модуляции зондирующего сигнала в составе ИП; $\varphi_{ds_IP}(t)$ – закон фазовой модуляции ИП для имитации дополнительного доплеровского сдвига по частоте $\Delta\omega_{ds_IP}(t) = \frac{\varphi_{ds_IP}(t)}{t}$; $\tau_{Z\ Form}$ – время задержки принятого зондирующего сигнала в бортовой аппаратуре преобразования зондирующего сигнала и формирования ИП.

Выражение (7) является общим для вариантов, представленных на рис. 2, 3, причем для варианта на рис. 2 задержка $\tau_{TD} = 0$. Целесообразно акцентировать внимание на том, что для рассматриваемого способа формирования ИП в формуле (7) составляющую $\Delta t_{r_IP}(t)$ в экспоненциальном сомножителе можно исключить или полагать значение $\Delta t_{r_IP}(t)$ в течение интервала наблюдения $T_H = LT_r$ практически неизменным, так как любые изменения $\Delta t_{r_IP}(t)$ в этом интервале вызовут соответствующую фазовую модуляцию, которая, возможно, является нежелательной. В связи с этим необходимо отметить, что формирование опорного сигнала и создание временных сдвигов закона модуляции ИП в постановщике помех являются в общем случае независимыми процессами.

Имитирующая помеха в ГСН после преобразования на видеочастоту вида $u_{IP_Rc}(t) = u_{IP}(t) u_G^*(t)$ (по аналогии с (2)) представляется выражением

$$u_{IP_Rc}(t) = M_{IP}(t) \exp\left[i\left(2\pi f_0 \left(-(t_r(t) + \Delta t_{r_IP}(t)) - \tau_{Z\ Form} - \tau_{TD} \right) + \varphi_{ds_IP}(t) + \varphi_0 \right) \right] \times \sum_{l=0}^{L-1} U_0 \left(t - lT_r - (t_r(t) + \Delta t_{r_IP}(t)) - \tau_{Z\ Form} - \tau_{TD} \right). \quad (8)$$

Рассмотрим ИП, которая имитирует распределенную пространственную структуру ЛА. Такая помеха представляет собой сумму из B_{IP} сигналов, имитирующих отражения от летательного аппарата, на корпусе которого имеется B_{IP} областей локального отражения. Математическая модель сигнала, имитирующего b -ю область локального отражения, на выходе приемной антенны РЛС описывается выражением

$$u_{IP_L}(t, b) = M_{IP}(t, b) \sum_{l=0}^{L-1} U_0 \left(t - lT_r - (t_r(t) + \Delta t_{r_IP}(t, b)) - \tau_{Z\ Form} - \tau_{TD} \right) \times \exp \left[i \left(2\pi f_0 \left(t - (t_r(t) + \Delta t_{r_IP}(t, b)) - \tau_{Z\ Form} - \tau_{TD} \right) + \varphi_{ds_IP}(t) + \varphi_0 \right) \right], \quad (9)$$

где $M_{IP}(t, b) = E_{IP}(t, b) \exp[i\varphi_{IP}(t, b)]$ – комплексная огибающая b -й составляющей ИП, включающая законы флуктуаций амплитуды $E_{IP}(t, b)$ и фазы $\varphi_{IP}(t, b)$; $\Delta t_{r_IP}(t, b)$ – закон изменения дополнительной временной задержки закона модуляции зондирующего сигнала для b -й составляющей ИП.

Использование комплексной огибающей $M_{IP}(t, b)$ может быть как минимум в трех вариантах:

вариант 1 – индивидуальные флуктуации для каждой составляющей с номером $b = \overline{1; B_{IP}}$ не используются, а применяется общая имитация флуктуаций в виде общего множителя $M_{IP}(t)$ суммы составляющих. Такой вариант является рациональным;

вариант 2 – индивидуальные флуктуации используются для одной составляющей с номером $b = b_M$. В этой составляющей создается регулярная поимпульсная амплитудно-фазовая или только амплитудная (формирование существенно проще) модуляция $M_{IP}(t, b_M)$, имитирующая отражения от вращающихся элементов двигательной установки (от винтов, компрессоров, турбин). Кроме того, применяется общая имитация флуктуаций в виде общего множителя $M_{IP}(t)$ суммы составляющих. Такой вариант является рациональным и обладает расширенными возможностями (обеспечивает имитацию индивидуальных признаков ЛА);

вариант 3 – индивидуальные флуктуации создаются независимо для каждой составляющей, т. е. используются множители $M_{IP}(t, b)$, $b = \overline{1; B_{IP}}$. Такой вариант является нерациональным.

Обобщенное выражение для математической модели ИП, имитирующей пространственно распределенный объект, на выходе приемной антенны ГСН (РЛС) имеет вид

$$u_{IP}(t) = \sum_{b=1}^{B_{IP}} M_{IP}(t, b) \sum_{l=0}^{L-1} U_0 \left(t - lT_r - (t_r(t) + \Delta t_{r_IP}(t, b)) - \tau_{Z\ Form} - \tau_{TD} \right) \times \exp \left[i \left(2\pi f_0 \left(t - (t_r(t) + \Delta t_{r_IP}(t, b)) - \tau_{Z\ Form} - \tau_{TD} \right) + \varphi_{ds_IP}(t) + \varphi_0 \right) \right]. \quad (10)$$

Из (10) можно получить более рациональное выражение, которое основано на следующем: индивидуальные флуктуации используются только для одной составляющей с номером $b = b_M$. Данная составляющая имитирует вторичную модуляцию [5] отраженного сигнала. Для этого модуляция должна быть поимпульсная, т. е. $M_{IP}(t, b_M) = \sum_{l=0}^{L-1} E_{IP}(t - lT_r, b_M) \exp[i\varphi_{IP}(t - lT_r, b_M)]$.

С учетом сложности реализации синхронной фазовой модуляции можно ограничиться амплитудной модуляцией, при которой $M_{IP}(t, b_M) = \sum_{l=0}^{L-1} E_{IP}(t - lT_r, b_M)$. Поскольку пространственно распределенный имитируемый объект должен двигаться как единое целое, дополнительные задержки $\Delta t_{r_IP}(t, b)$, $b = \overline{1; B_{IP}}$, преобразуются к виду $\Delta t_{r_IP}(t, b) = \overline{\Delta t_{r_IP}(t)} + \delta t_{r_IP}(t, b)$, $b = \overline{1; B_{IP}}$, где $\overline{\Delta t_{r_IP}(t)}$ – среднее значение дополнительной задержки; $\delta t_{r_IP}(t, b)$ – дополнительная индивидуальная задержка для b -й составляющей.

Формирование индивидуальных смещений $\delta t_{r_IP}(t, b)$, $b = \overline{1; B_{IP}}$, которые имитируют взаимные перемещения областей отражения в пространстве, сравнительно сложное. Поэтому более рациональным вариантом является формирование дополнительной задержки в виде $\Delta t_{r_IP}(t, b) = \overline{\Delta t_{r_IP}(t)} + \delta t_{r_IP}(b)$, $b = \overline{1; B_{IP}}$, где $\delta t_{r_IP}(b)$ – индивидуальная относительная задержка для b -й составляющей. С учетом этого математическую модель рациональной ИП, имитирующей пространственно распределенную структуру ЛА, можно представить в виде

$$\begin{aligned}
 u_{IP}(t) = & \sum_{b \neq b_M=1}^{B_{IP}} M_{IP}(t, b) \sum_{l=0}^{L-1} U_0 \left(t - lT_r - \left(t_r(t) + \overline{\Delta t_{r_IP}}(t) + \delta t_{r_IP}(b) \right) - \tau_{Z_Form} - \tau_{TD} \right) \times \\
 & \times \exp \left[i \left(2\pi f_0 \left(t - \left(t_r(t) + \overline{\Delta t_{r_IP}}(t) + \delta t_{r_IP}(b) \right) - \tau_{Z_Form} - \tau_{TD} \right) + \varphi_{ds_IP}(t) + \varphi_0 \right) \right] + \\
 & + M_{IP}(t, b_M) \sum_{l=0}^{L-1} U_0 \left(t - lT_r - \left(t_r(t) + \overline{\Delta t_{r_IP}}(t) + \delta t_{r_IP}(b_M) \right) - \tau_{Z_Form} - \tau_{TD} \right) \times \\
 & \times \exp \left[i \left(2\pi f_0 \left(t - \left(t_r(t) + \overline{\Delta t_{r_IP}}(t) + \delta t_{r_IP}(b_M) \right) - \tau_{Z_Form} - \tau_{TD} \right) + \varphi_{ds_IP}(t) + \varphi_0 \right) \right]. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Имитирующая помеха, описываемая выражением (11), после преобразования в ГСН на видеочастоту представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 u_{IP}(t) = & M_{IP}(t) \sum_{b \neq b_M=1}^{B_{IP}} \sum_{l=0}^{L-1} U_0 \left(t - lT_r - \left(t_r(t) + \overline{\Delta t_{r_IP}}(t) + \delta t_{r_IP}(b) \right) - \tau_{Z_Form} - \tau_{TD} \right) \times \\
 & \times \exp \left[i \left(2\pi f_0 \left(- \left(t_r(t) + \overline{\Delta t_{r_IP}}(t) + \delta t_{r_IP}(b) \right) - \tau_{Z_Form} - \tau_{TD} \right) + \varphi_{ds_IP}(t) \right) \right] + \\
 & + M_{IP}(t, b_M) \sum_{l=0}^{L-1} U_0 \left(t - lT_r - \left(t_r(t) + \overline{\Delta t_{r_IP}}(t) + \delta t_{r_IP}(b_M) \right) - \tau_{Z_Form} - \tau_{TD} \right) \times \\
 & \times \exp \left[i \left(2\pi f_0 \left(- \left(t_r(t) + \overline{\Delta t_{r_IP}}(t) + \delta t_{r_IP}(b_M) \right) - \tau_{Z_Form} - \tau_{TD} \right) + \varphi_{ds_IP}(t) \right) \right]. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Заключение

1. Детальное рассмотрение математической модели отраженного сигнала актуально в двух основных приложениях:

- селекция летательного аппарата на фоне многократных имитирующих помех;
- создание имитирующих помех, структура и параметры которых максимально приближаются к структуре и параметрам сигнала, отраженного от летательного аппарата.

2. Технология DRFM обеспечивает максимальное приближение имитирующих помех по структуре и параметрам к реальному сигналу, отраженному от летательного аппарата. Однако всегда имеются технические ограничения, связанные с быстродействием и производительностью (в данном случае – со способностью выполнять одновременное формирование имитирующих помех) аппаратуры формирования имитирующих помех на основе технологии DRFM.

3. Разработанные модели имитирующих помех являются основой для системного представления об их формировании. Такое представление позволяет разработчику радиолокационных станций правильно определить подходы к защите от имитирующих помех и принять соответствующее техническое решение, обеспечивающее защиту от них.

4. Поскольку постановщики имитирующих помех ориентированы на подавление классов радиолокационных станций (радиолокационные станции обзора, радиолокационные станции наведения оружия, головки самонаведения), формирование имитирующих помех предполагает некоторую универсальность, которая ведет к определенным упрощениям. Именно эти упрощения, возникающие как следствие универсальности в построении и функционировании формирователей помех, должен использовать разработчик конкретной радиолокационной станции для ее защиты. В частности, широкий простор в защите радиолокационных станций от имитирующих помех открывают динамичное управление параметрами зондирующих сигналов и обработка принятого сигнала с обеспечением сверхразрешения по координате или параметру сигнала.

Список литературы

1. Leroy, B. Van Brunt. Applied ECM / B. Van Brunt Leroy // EW Engineering Inc., USA. 1978 (1987, 1995). Vol. 1–3.
2. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Под ред. Ю. М. Перунова. Изд. 2-е, испр. и дополн. М.: Радиотехника, 2008.

3. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн / В. Д. Добыкин [и др.]; под общ. ред. А. И. Куприянова. М.: Вузовская книга, 2009.
4. Штагер, А. Е. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы / А. Е. Штагер. М.: Радио и связь, 1986.
5. Гейстер, С. Р. Адаптивное обнаружение-распознавание с селекцией помех по спектральным портретам / С. Р. Гейстер. Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2000.

References

1. Leroy V. Van Brunt (1978, 1987, 1995) Applied ECM. *EW Engineering Inc., USA*. 1–3.
2. Perunov Yu. M. (ed.) (2008) *Electronic Jamming of Information Channels of Weapon Control Systems*. Moscow, Radiotekhnika Publ. (in Russian).
3. Dobykin V. D., Kupriyanov A. I., Ponomarev V. G., Shustov L. N. (2009) *Electronic Warfare. Digital Storage and Reproduction of Radio Signals and Electromagnetic Waves*. Moscow, University Book (in Russian).
4. Shtager A. E. (1986) *Scattering of Radio Waves on Bodies of Complex Shape*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. (in Russian).
5. Heister S. R. (2000) *Adaptive Detection-Recognition with Interference Selection Based on Spectral Portraits*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus Publ. (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

Гейстер С. Р., д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.
ОАО «АЛЕВКУРП»

Цяньлань Хуан, асп. Национального университета
оборонных технологий

Адрес для корреспонденции

223050, Республика Беларусь,
Минская обл., Минский р-н, Боровлянский с/с,
д. Королев Стан, ул. Московская, 1а, ком. 17
ОАО «АЛЕВКУРП»
Тел.: +375 29 760-86-71
E-mail: hsr_aero1960@mail.ru
Гейстер Сергей Романович

Information about the authors

Heister S. R., Dr. of. Sci. (Tech.), Professor, Chief
Researcher at JSC “ALEVKURP”

Qianlan Huang, Postgraduate at National University
of Defense Technology

Address for correspondence

223050, Republic of Belarus,
Minsk Region, Minsk District, Borovlyansky S/S,
Korolev Stan Village, Moscow St., 1a, room 17
JSC “ALEVKURP”
Tel.: +375 29 760-86-71
E-mail: hsr_aero1960@mail.ru
Heister Sergey Romanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-61-68>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАДИОЛОКАТОРУ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ОБЪЕКТОВ

А. В. ГРИНКЕВИЧ, В. В. ИВАНЕЦ, М. С. ОРАБЕЙ, А. А. ДЕНИС

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

Поступила в редакцию 13.10.2023

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

Аннотация. Показано применение адаптивных методов обработки принимаемого сигнала для формирования радиолокационного изображения подповерхностных слоев зондируемого участка поверхности. Описана структурная схема радиолокатора подповерхностного зондирования, используемого для неразрушающего контроля. Представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований. Их использование позволяет разработать радиолокатор подповерхностного зондирования, обладающий возможностью эффективно выявлять скрытые объекты в бетонных стенах, а также обнаруживать трещины, пустоты и дефекты в стенах зданий и сооружений, снежные завалы и лавины, подземные коммуникации и органические тела в грунте.

Ключевые слова: радиолокатор подповерхностного зондирования, обнаружение скрытых объектов, радиолокационное изображение, адаптивные методы обработки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Анализ методов сверхразрешения применительно к радиолокатору подповерхностного зондирования для обнаружения скрытых объектов / А. В. Гринкевич [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-61-68>.

ANALYSIS OF SUPERRESOLUTION METHODS IN THE APPLICATION TO THE SUBSURFACE SOUNDING RADAR FOR DETECTING HIDDEN OBJECTS

ANTON V. GRINKEVICH, VALERY V. IVANETS, MAKSIM S. ORABEL,
ANASTASIA A. DENIS

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

Submitted 13.10.2023

Abstract. Adaptive methods have been developed for generating a radar image of a probed surface area. A block diagram of a subsurface sounding radar is described. The results of modeling and experimental studies are presented. Their use makes it possible to develop a subsurface sensing radar capable of effectively identifying hidden objects in concrete walls, as well as detecting cracks, voids and defects in the walls of buildings and structures, snow debris and avalanches, underground communications and organic bodies in the ground.

Keywords: subsurface sounding radar, detection of hidden objects, radar image, adaptive processing methods.

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

For citation. Grinkevich A. V., Ivanets V. V., Orabei M. S., Denis A. A. (2024) Analysis of Superresolution Methods in the Application to the Subsurface Sounding Radar for Detecting Hidden Objects. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-61-68> (in Russian).

Введение

Сегодня как в мире, так и в Республике Беларусь, актуальной задачей является необходимость обнаружения объектов в грунте и в стенах зданий (сооружений). В настоящее время не существует единого универсального подхода, позволяющего с высокой эффективностью обнаруживать и классифицировать скрытые объекты. Вместе с тем проведенные ранее исследования показывают эффективность применения радиолокационных методов зондирования [1–5]. Поэтому в статье рассматривается радиолокатор подповерхностного зондирования с непрерывным зондирующим сигналом, реализующий частотный метод измерения расстояния, поскольку непрерывный зондирующий сигнал (с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) или с дискретной перестройкой частоты (ДПЧ)) применяется для формирования одномерного радиолокационного изображения.

Принцип формирования одномерного радиолокационного изображения зондируемого участка поверхности

Работа радиолокатора подповерхностного зондирования основана на принципе отражения электромагнитного излучения от границ слоев с различными значениями диэлектрической проницаемости. Амплитуда и фаза отраженного сигнала зависят от коэффициента отражения R_i , который определяется следующим выражением [2]:

$$R_i = \frac{\sqrt{\varepsilon_{i-1}} - \sqrt{\varepsilon_i}}{\sqrt{\varepsilon_{i-1}} + \sqrt{\varepsilon_i}}, \quad (1)$$

где ε_i – диэлектрическая проницаемость i -го слоя (отражающей поверхности); ε_{i-1} – диэлектрическая проницаемость $(i - 1)$ -го слоя.

Разрешающая способность по дальности (глубине) определяется шириной спектра зондирующего сигнала

$$\Delta r = \frac{c_i}{2\Delta f}, \quad (2)$$

где Δf – ширина спектра зондирующего сигнала; c_i – скорость распространения электромагнитной волны в i -м слое, зависящая от ее диэлектрической проницаемости:

$$c_i = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_i}}, \quad (3)$$

c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Для обнаружения и разрешения малоразмерных скрытых объектов необходимо применять широкополосные сигналы, позволяющие получить высокое разрешение по глубине. Один из таких сигналов – ДПЧ-сигнал, который состоит из совокупности примыкающих друг к другу импульсов с разной несущей частотой. Законом модуляции ДПЧ-сигнала является следующее выражение

$$X(t) = \sum_{n=0}^N \vartheta(t - nT) e^{j2\pi\delta f n(t - nT)}, \quad (4)$$

где $\vartheta = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases}$; N – количество дискретов ДПЧ-сигнала; n – порядковый номер дискрета;

T – длительность дискрета; $\delta f = f_n - f_{n-1}$ – шаг по частоте.

Принятый сигнал будет иметь вид

$$y(t) = \sum_{l=1}^L a_l \sum_{n=-N}^N \vartheta(t - nT - \delta_l) e^{j2\pi\delta f n(t - nT - \delta_l)} e^{j2\pi f_0(t - nT - \delta_l)} + N(t) + N_0(t), \quad (5)$$

где a_l – амплитуда отраженного сигнала от l -й отражающей поверхности с учетом коэффициентов отражения и ослабления сигнала при распространении в прямом и обратном направлениях; $\delta_l = 2r_l / c_c$ – время запаздывания сигнала от l -й отражающей поверхности; r_l – расстояние от фазового центра антенны до l -й отражающей поверхности; f_0 – несущая частота ВЧ-колеба-

ния; $N(t)$ – помеха, обусловленная «просачиванием» зондирующего сигнала в приемный тракт; $N_0(t)$ – внутренние шумы каналов приема.

Получение одномерного радиолокационного изображения основано на оценке времени задержки отраженного сигнала δ_l , которое определяет глубину (дальность) до l -й отражающей поверхности.

Классический метод формирования одномерного радиолокационного изображения

Классический метод предполагает перемножение принятого и опорного сигналов с последующим выполнением преобразования Фурье. Результатом такого преобразования является одномерное радиолокационное изображение подповерхностных слоев облучаемого участка поверхности

$$P(f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j2\pi ft} dt \right|, \quad (6)$$

где $u(t)$ – результат перемножения принятого и опорного сигналов, который определяется как $u(t) = y(t)x_r(t)$; $x_r(t) = \sum_{n=0}^N \mathfrak{G}(t - nT) e^{-j2\pi[f_0 + \delta_l n](t - nT)}$ – опорный сигнал.

Положение максимума на оси частот f полученного одномерного радиолокационного изображения характеризует разностную частоту \tilde{f} , которая прямо пропорциональна времени запаздывания отраженного сигнала и определяется выражением [4, 5]

$$\tilde{f} = \frac{\delta_l N}{T_0}, \quad (7)$$

где δ_l – время запаздывания сигнала, отраженного от l -й отражающей поверхности; T_0 – длительность зондирующего сигнала.

В матричном виде классический алгоритм формирования одномерного радиолокационного изображения записывается следующим образом [4, 5]:

$$\hat{P}(f) = \mathbf{S}^H(f) \hat{\Phi} \mathbf{S}(f), \quad (8)$$

где $\mathbf{S}(f) = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(j2\pi\delta_l f T) \\ \vdots \\ \exp(j2\pi\delta_l f N T) \end{pmatrix}$ – вектор обзора по частоте, определяющий n -ю частоту наблюдения;

H – операция эрмитова сопряжения; $\hat{\Phi} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{U}_k \mathbf{U}_k^H$ – оценка корреляционной матрицы на выходе смесителя; K – количество временных выборок; \mathbf{U} – вектор-столбец сигнала $u(t)$ [4, 5].

Пересчет в координату глубины r осуществляется при помощи выражения

$$r = \frac{\tilde{f} c T_0}{2\delta_l N}. \quad (9)$$

С учетом (9) формула (8) в координатах глубины примет вид

$$\hat{P}(r) = \mathbf{S}^H(r) \hat{\Phi} \mathbf{S}(r). \quad (10)$$

Выражение (10) описывает классический метод формирования радиолокационного изображения.

Формирование одномерного радиолокационного изображения

Формирование одномерного радиолокационного изображения может осуществляться методами максимального правдоподобия и теплового шума, а также комбинированным методом.

Метод максимального правдоподобия

Метод максимального правдоподобия (ММП) обеспечивает «сверхразрешение» коррелированных сигналов, отраженных от различных поверхностей, причем результат оценки определяется путем нахождения вектора опорной частоты $\mathbf{A}(f)$, при котором результат обработки $\mathbf{A}^H(f)\Phi\mathbf{A}(f)$ имеет максимальную мощность при соблюдении следующего ограничения [4, 5]:

$$\mathbf{A}^H(f)\mathbf{S}(f)=1. \quad (11)$$

Смысл этого ограничения заключается в том, чтобы сигнал, соответствующий частоте наблюдения, проходил на выход устройства обработки неискаженным, а спектральные составляющие, удаленные от частоты наблюдения, режектировались. Выбор весового вектора опорной частоты $\mathbf{A}(f)$ имеет вид

$$\mathbf{A}(f)=\frac{\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)}{\mathbf{S}^H(f)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)}. \quad (12)$$

Условие (11) обеспечивает получение алгоритма формирования одномерного радиолокационного изображения зондируемого участка поверхности ММП [4, 5]

$$\hat{P}_A(f)=[\mathbf{S}^H(f)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)]^{-1}. \quad (13)$$

С учетом (9) формула (13) в координатах глубины примет вид

$$\hat{P}_A(r)=[\mathbf{S}^H(r)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(r)]^{-1}. \quad (14)$$

Выражение (14) описывает способ формирования одномерного радиолокационного изображения ММП.

Метод теплового шума

Данный метод основан на анализе свойств собственного шума на выходе системы и определяется выражением [6]

$$\hat{P}_B(f)=[\mathbf{S}^H(f)\hat{\Phi}^{-2}\mathbf{S}(f)]^{-1}. \quad (15)$$

Отличие метода теплового шума от ММП состоит в том, что здесь используется обратная оценка корреляционной матрицы сигнала, возведенная в квадрат. Оценка радиолокационного изображения по методу теплового шума имеет более высокую разрешающую способность, чем оценка по методу максимального правдоподобия [6].

С учетом (9) формула (15) в координатах глубины примет вид

$$\hat{P}_B(r)=[\mathbf{S}^H(r)\hat{\Phi}^{-2}\mathbf{S}(r)]^{-1}. \quad (16)$$

Выражение (16) описывает способ формирования одномерного радиолокационного изображения методом теплового шума.

Комбинированный метод

Данный метод предполагает перемножение результатов, полученных ММП и методом теплового шума, и описывается следующим выражением:

$$\hat{P}_C(f)=[\mathbf{S}^H(f)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)\hat{\mathbf{R}}^H(f)\hat{\mathbf{R}}(f)]^{-1}, \quad (17)$$

где $\hat{\mathbf{R}}(f)=\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(f)$.

С учетом (9) формула (17) в координатах глубины примет вид

$$\hat{P}_C(r)=[\mathbf{S}^H(r)\hat{\Phi}^{-1}\mathbf{S}(r)\hat{\mathbf{R}}^H(r)\hat{\mathbf{R}}(r)]^{-1}. \quad (18)$$

Выражение (18) описывает комбинированный метод формирования одномерного радиолокационного изображения.

Принцип работы радиолокатора подповерхностного зондирования

Принцип работы заключается в следующем. Сформированный генератором и усиленный по мощности зондирующий сигнал подается на передающую антенну и излучается в пространство. Принятый сигнал, являющийся совокупностью сигналов, отраженных от различных поверхностей, и шума, поступает на вход приемной антенны. Смеситель (перемножитель) перемножает опорный и принятый сигналы и выдает сигнал с разностной частотой \tilde{f} . В блоке обработки формирование одномерного радиолокационного изображения осуществляется классическим методом на основе преобразований Фурье, с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) процессора или одним из адаптивных методов, реализуемых устройством адаптивной обработки. Устройство адаптивной обработки, реализующее метод максимального правдоподобия, метод теплового шума, метод непосредственного оценивания весового вектора и (или) комбинированный метод, изображено на рис. 1 серым цветом.

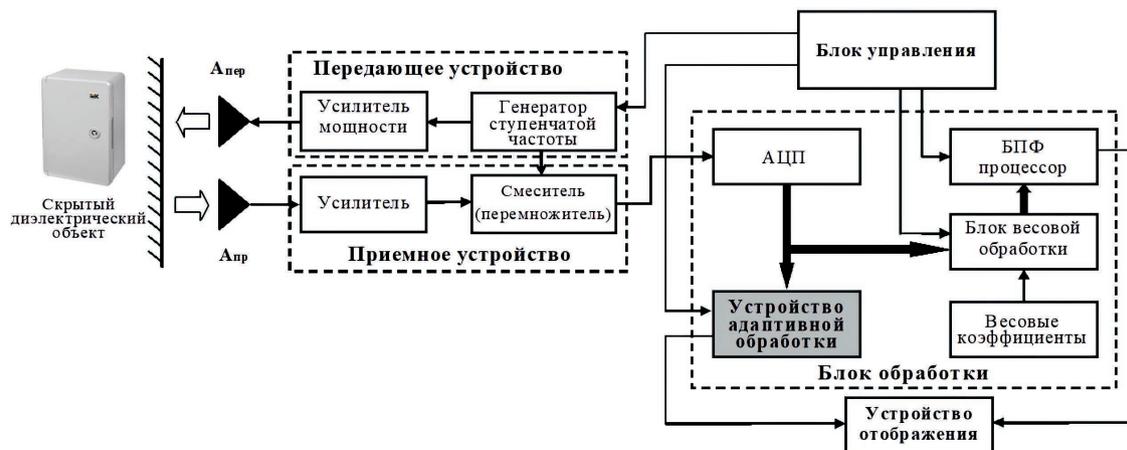


Рис. 1. Структурная схема радиолокатора подповерхностного зондирования с дискретной перестройкой частоты

Fig. 1. Structural diagram of a subsurface sounding radar with discrete frequency tuning

Одномерное радиолокационное изображение с выхода блока обработки поступает на устройство отображения для визуального наблюдения оператором. Синхронизация работы всех устройств радиолокатора подповерхностного зондирования осуществляется блоком управления.

Анализ методов формирования одномерного радиолокационного изображения

Для сравнительного анализа рассмотренных методов, описываемых выражениями (10), (14), (16) и (18), проведено моделирование ситуации формирования одномерного радиолокационного изображения скрытого диэлектрического объекта толщиной 15 см, установленного на глубину 25 см в бетонную стену, при расположении антенны радиолокатора на расстоянии 10 см от стены для $\Delta f = 4$ ГГц, $T_0 = 2$ мс, $N = 256$ (рис. 2). В процессе моделирования были приняты следующие ограничения:

- диаграммы направленности передающей и приемной антенн согласованы, электромагнитные волны являются плоскими и распространяются перпендикулярно рассматриваемой поверхности;

- паразитный сигнал «просачивания» из передающей в приемную антенну отсутствует [7];

- отсутствуют краевые волны (отражения от боковых поверхностей скрытого объекта);

- диэлектрическая проницаемость среды и скрытых объектов постоянна во всей полосе частот.

Результаты моделирования показывают, что рассмотренные адаптивные методы формирования одномерного радиолокационного изображения позволяют разрешать глубину и толщину скрытого объекта с лучшим качеством, чем классический метод. Также достоинством адаптивных методов является то, что уровень боковых лепестков значительно ниже по сравнению с классическим методом. Однако определить наличие нескольких слоев по глубине невозможно, поскольку их более слабые сигналы на выходе системы обработки маскируются боковыми лепестками сильного сигнала от самой поверхности.

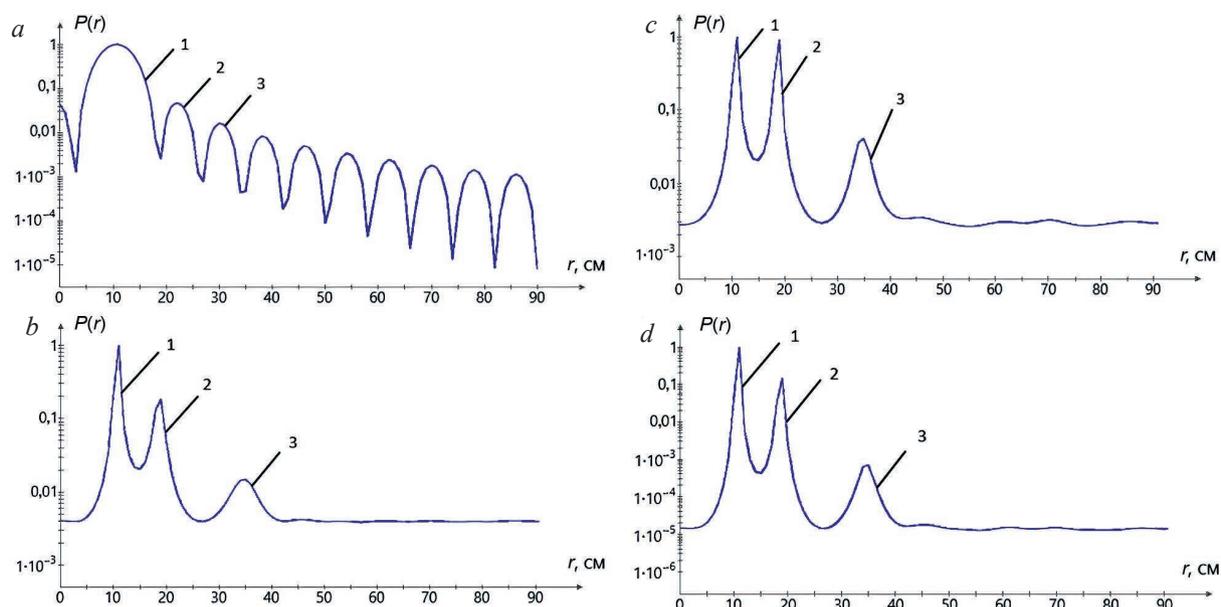


Рис. 2. Нормированные одномерные радиолокационные изображения, полученные для скрытого диэлектрического объекта в бетонной стене методами: *a* – классическим; *b* – максимального правдоподобия; *c* – теплового шума; *d* – комбинированным; 1, 2, 3 – отражение от исследуемой, фронтальной и тыльной поверхностей скрытого диэлектрического объекта соответственно

Fig. 2. Normalized one-dimensional radar images, obtained for a hidden dielectric object in a concrete wall using the following methods: *a* – classical; *b* – maximum likelihood; *c* – thermal noise; *d* – combined; 1, 2, 3 – reflection from the test, front and back surfaces hidden dielectric object, respectively

Результаты экспериментальных исследований

Для подтверждения основных положений, выдвинутых при разработке адаптивных методов формирования одномерного радиолокационного изображения, провели экспериментальные исследования. В качестве скрытого объекта использовали пластиковый короб с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,1$. Объект был установлен в бетонной стене с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4,5$.

Основой для проведения экспериментов послужил макет радиолокатора подповерхностного зондирования, включающий антенную систему, векторный анализатор спектра E5071B и персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ) с моделями методов формирования радиолокационного изображения (рис. 3). Зондирующий сигнал, представляющий ДПЧ-сигнал с диапазоном перестройки частоты в пределах 1–5 ГГц, формировался в блоке E5071B и передавался на передающую антенну, откуда излучался на исследуемую поверхность. Передающая и приемная антенны размещались на расстоянии 10 см от исследуемой поверхности. Сигнал, принятый приемной антенной, поступал на векторный анализатор спектра E5071B, который умножал принятый и опорный сигналы. Полученный сигнал поступал на ПЭВМ, где обрабатывался при помощи разработанных моделей.

На рис. 4 показаны подповерхностные профили участка исследуемой поверхности при проходе по полосе с установленным на глубину 25 см скрытым диэлектрическим объектом толщиной 15 см при расположении антенны радиолокатора на расстоянии 10 см от исследуемой поверхности для $\Delta f = 4$ ГГц, $T_0 = 2$ мс, $N = 256$ – число точек БПФ.

В подповерхностном профиле, полученном классическим способом, трудно обнаружить лицевую сторону скрытого объекта, поскольку она маскируется мощным сигналом, отраженным от поверхности земли. А в подповерхностном профиле, полученном при помощи адаптивного алгоритма, можно точно определить глубину залегания и габариты скрытого объекта.

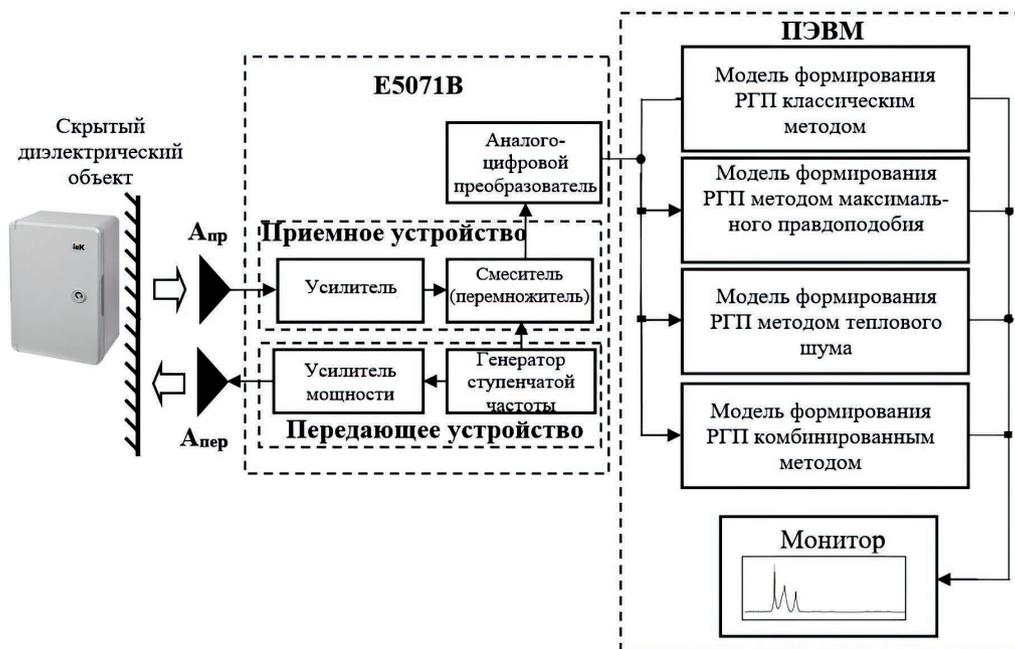


Рис. 3. Макет подповерхностного радиолокатора: РГП – радиолокационный глубинный портрет
Fig. 3. Layout of a subsurface radar: RGP – radar depth portrait

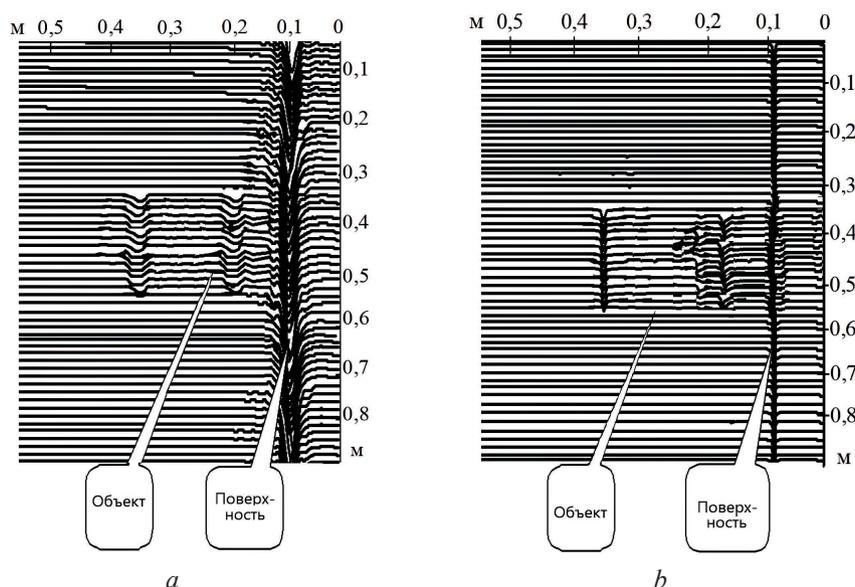


Рис. 4. Подповерхностный профиль (в виде скан-линий) при проходе по полосе с установленным на глубине 25 см скрытым диэлектрическим объектом толщиной 15 см, полученный методами: *a* – классическим; *b* – непосредственного оценивания весового вектора
Fig. 4. Subsurface profile (in the form of scan lines) when passing through a strip with a hidden dielectric object 15 cm thick installed at a depth of 25 cm, obtained by the following methods: *a* – classical; *b* – direct estimation of the weight vector

Заключение

1. По результатам моделирования и экспериментальных исследований установлено, что можно существенно повысить разрешающую способность подповерхностного радиолокатора добавлением в него устройства адаптивной обработки, реализующего один из описанных адаптивных методов. Это снижает требования к ширине спектра зондирующего сигнала, антенно-фидерному тракту, приемному и передающему устройствам.

2. Результаты математического моделирования подтвердили, что при использовании адаптивных алгоритмов, в отличие от классической обработки, можно с высокой точностью определить глубину установки и габариты скрытого объекта.

Список литературы

1. Гринев, А. Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации / А. Ю. Гринев. М.: Радиотехника, 2005.
2. Подповерхностная радиолокация / М. И. Финкельштейн [и др.]. М.: Радио и связь, 1994.
3. Брякин, И. В. Методы подповерхностного зондирования и разработка устройства для локализации скрытых объектов / И. В. Брякин, И. В. Бочкарев // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2021. № 6.
4. Какора, В. А. Комбинированный метод спектрального оценивания при получении сверхразрешения по частоте / В. А. Какора, А. В. Гринкевич // Доклады БГУИР. 2018. № 8. С. 63–70.
5. Какора, В. А. Сравнительный анализ разрешающей способности алгоритмов спектрального оценивания / В. А. Какора, А. В. Гринкевич // Доклады БГУИР. 2017. № 3. С. 20–24.
6. Ермолаев, В. Т. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой / В. Т. Ермолаев, А. Г. Флакман. Н. Новгород, 2007.
7. Марпл-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл мл. М.: Мир, 1990.

References

1. Grinev A. Yu. (2005) *Issues of Subsurface Radar*. Moscow, Radio Engineering Publ. (in Russian).
2. Finkelshtein M. I., Karpukhin V. I., Kuteev V. A., Metelkin V. N. (1994) *Subsurface Radar*. Moscow, Radio i Svyaz Publ. (in Russian).
3. Bryakin I. V., Bochkarev I. V. (2021) Methods of Subsurface Sounding and Development of a Device for Localization of Hidden Objects. *Instrumentation and Automation: Maintenance and Repair*. (6) (in Russian).
4. Kakora V. A., Grinkevich A. V. (2018) Combined Method of Spectral Estimation when Receiving of Superpermissions on Frequency. *Doklady BGUIR*. (8), 63–70 (in Russian).
5. Kakora V. A., Grinkevich A. V. (2017) Mathematical Analysis of Spectral Estimation Algorithms Resolution. *Doklady BGUIR*. (3), 20–24 (in Russian).
6. Ermolaev V. T., Flaksman A. G. (2007) *Methods for Estimating the Parameters of Signal Sources and Noise Received by an Antenna Array*. Nizhny Novgorod (in Russian).
7. Marple-Jr. S. L. (1990) *Digital Spectral Analysis and its Applications*. Moscow, Mir Publ. (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

Гринкевич А. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Иванец В. В., магистрант, БГУИР

Орабей М. С., магистрант, БГУИР

Денис А. А., асп., БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-20-86
E-mail: grinkevich@bsuir.by
Гринкевич Антон Витальевич

Information about the authors

Grinkevich A. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Ivanets V. V., Master's Student, BSUIR

Orabei M. S., Master's Student, BSUIR

Denis A. A., Postgraduate, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-20-86
E-mail: grinkevich@bsuir.by
Grinkevich Anton Vitalievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-69-75>

Original paper

UDC 621.383.525

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AN INFRARED PHOTODETECTOR USING INTERSUBBAND JUNCTIONS IN QUANTUM WELLS BASED ON GALLIUM NITRIDE

VLADISLAV S. VOLCHECK, VIKTOR R. STEMPIISKY

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

Submitted 22.12.2023

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024

Abstract. A simulation procedure for analyzing the electrical and optical characteristics of an AlGaIn/GaN intersubband quantum well middle-wavelength infrared photodetector is presented. The photoconductive gain spectrum was simulated by coupling the drift-diffusion and capture-escape models in the active region of the device structure and by ignoring the contribution of radiative emission. It was shown that the photodetector at zero bias is sensitive over a spectral range from 4 to 6 μm , with the peak absorption occurring at 4.64 μm . The dependence of the available photocurrent on both the wavelength and the angle of incidence of an unpolarized monochromatic beam of light was also evaluated. An assessment of the dark current characteristics was estimated at various temperatures.

Keywords: infrared radiation, quantum well, intersubband transition, simulation, capture-escape model, gallium nitride, optical gain, optoelectronics, absorption, photodetector.

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

Gratitude. This work is supported by the grant 1.4.4 of Belarusian National Scientific Research Program “Digital and Space Technologies, Human and Public Safety and National Security”.

For citation. Volcheck V. S., Stempitsky V. R. (2024) Performance Characteristics of an Infrared Photodetector Using Intersubband Junctions in Quantum Wells Based on Gallium Nitride. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 69–75. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-69-75>.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАКРАСНОГО ФОТОДЕТЕКТОРА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО МЕЖПОДЗОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ В КВАНТОВЫХ ЯМАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

В. С. ВОЛЧЁК, В. Р. СТЕМПИЦКИЙ

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

Поступила в редакцию 22.12.2023

Аннотация. Представлен метод моделирования электрических и оптических характеристик инфракрасного фотодетектора, использующего межподзонные переходы в квантовых ямах на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN. Рассчитан спектр коэффициента усиления прибора, полученный в результате численного моделирования в рамках диффузионно-дрейфовой модели и модели захвата-рассасывания носителей с игнорированием вклада радиационной эмиссии. Показано, что диапазон поглощения фотодетектора при нулевом смещении находится в пределах от 4 до 6 мкм, при этом пик поглощения наблюдается

при 4,64 мкм. Произведен расчет зависимости доступного фототока от длины волны и угла падения неполяризованного монохроматического светового луча. Выполнена оценка темного тока при различных температурах.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, квантовая яма, межподзонный переход, моделирование, модель захвата-рассасывания, нитрид галлия, оптическое усиление, оптоэлектроника, поглощение, фотодетектор.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнялась в рамках задания 1.4.4 Государственной программы научных исследований «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства».

Для цитирования. Волчѣк, В. С. Эксплуатационные характеристики инфракрасного фотодетектора, использующего межподзонные переходы в квантовых ямах на основе нитрида галлия / В. С. Волчѣк, В. Р. Стемпицкий // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 69–75. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-69-75>.

Introduction

The development of infrared optoelectronic devices has been progressing steadily for many decades. Infrared photodetectors are now actively employed in many technologically important applications such as night vision, thermal imaging, environmental sensing and space object detection. Early infrared photodetectors were primarily fabricated from InSb and HgCdTe [1] and utilized intraband transitions. These two materials are suitable for devices operating in the middle-wavelength regime, with wavelengths in a range from 2 to 5 μm . The long-wavelength regime can be accessed only by HgCdTe photodetectors, as their energy levels can be adjusted to absorb electromagnetic radiation in a range from 1 to 30 μm . Although this technology is considered well-established, poor material uniformity and low yield continue to be its major obstacles [2] on account of the naturally weak bond between mercury and tellurium leading to various material instabilities. Moreover, the extreme toxicity of the constituent compounds of HgCdTe photodetectors has recently become of growing concern [3]. These limiting factors provide a strong motivation for exploring novel infrared technologies.

Quantum well infrared photodetectors (QWIPs) based on GaAs are promising optoelectronic devices due to the mature growth and processing technology. These photodetectors have demonstrated consistent results in comparison with HgCdTe devices at low temperatures in the long- and very long-wavelength regimes [4–6]. In later years, GaN technology has also been seen as a potential candidate for developing QWIPs. Due to the large longitudinal optical phonon frequencies, GaN photodetectors are capable to operate at terahertz frequencies that are fundamentally inaccessible to their GaAs-based counterparts [7, 8].

The operation of QWIPs is based on the phenomenon of a quantum particle in a box. The geometry and composition parameters for an alternate array of quantum wells and barriers can be set in such a way that each well contains only one bound state and the sandwich-like device structure forms a superlattice with a quasi-continuum of extended states that carry finite momentum. Electrons from bound states are excited by photons and transferred onto extended states where they generate a photocurrent. The bound-to-extended state transitions are the basic absorption mechanism in QWIP systems and determine both the photoconductive gain spectrum and the quantum efficiency. Among the most appealing features of QWIPs is the possibility to tune the absorption spectrum by adjusting the thickness of quantum wells and the alloy composition of barriers. However, a practical device structure should consist of several tens of wells. This is quite challenging, since the ability to grow epitaxial films over large thicknesses is still limited.

In this work, we present a simulation technique for analyzing the electrical and optical characteristics of an AlGaIn/GaN intersubband quantum well middle-wavelength infrared photodetector using a well-known semiconductor device simulator.

Device structure

The two-dimensional AlGaIn/GaN QWIP is schematically drawn in Fig. 1. The active region of the device structure is composed of alternate GaN quantum wells and wide band gap $\text{Al}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{N}$ barriers. Each well is doped with a donor concentration of $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, while each barrier, which should ideally be intrinsic, are realistically doped with a donor concentration of $1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. The quantum

well thickness is equal to 3 nm, a value determined by reducing the thickness until only one bound state is available. A reasonably large thickness of 0.1 μm is chosen for the barriers to decrease the interaction between the bound states in adjacent quantum wells, thus allowing to regard them as independent of each other. The top and bottom contact regions – emitter and collector, respectively – complete the device structure and are mainly added to bias the active region. The thickness of each contact region is 0.1 μm . The emitter is doped with a donor concentration of $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, while a donor concentration of $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ is introduced to the collector. The width of the device structure is 0.2 μm .



Fig. 1. Device structure

The spatial distribution of both the conduction band edge and the electron quasi-Fermi level of the QWIP at a bias voltage of 0.4 V is shown in Fig 2, *a*. The bound states that play the role of the initial states for electrons in each quantum well are presented in Fig. 2, *b*. The affinity values are set in accordance with the 0.7 rule [9].

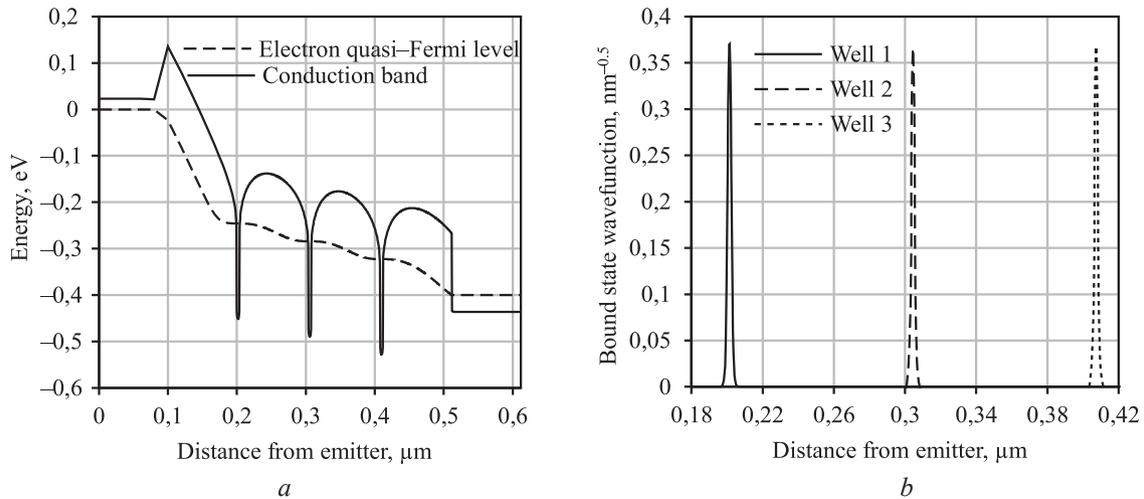


Fig. 2. Band diagram: *a* – conduction band edge and electron quasi-Fermi level; *b* – electron bound state wavefunctions

Since electron bound states oscillate with high magnitude, a mesh resolution of at least one tenth of a micrometer is required to accurately depict their wavefunction profiles. Under such strict conditions, simulation time becomes limited by computational capability. For that reason, instead of simulating the full device structure consisting of several tens of quantum wells, we reduced the active region to only three wells. This is utterly reasonable, assuming that the quantum wells do not affect each other to a sufficiently good approximation. As a consequence, the total optical response of the wells can be obtained simply by addition. The scaling down of the active region also leads to the replacement of the quasi-continuum of extended states by a discrete spectrum. Since extended states also oscillate with high magnitude, the convergence of optical transition matrix elements is heavily dependent on the mesh resolution. However, this has an effect only on the magnitude of the spectral response, as the convergence

of its shape is fast at a much larger mesh spacing. Thus, the mesh plays a critical part in the accurate evaluation of both the spectral range of detection and the wavelength of peak detection.

Simulation details

To simulate the optical characteristics of the photodetector, a physical model discretizing the Schrödinger equation along the direction from the emitter to collector is assigned for the quantum wells. A finite difference method is employed to solve this discretized equation.

To calculate the extended states over the active region, a superlattice model is activated. This model also discretizes the Schrödinger equation, but the solutions at each energy must now satisfy the boundary conditions of a plane wave with the same energy penetrating the contact regions.

A three-dimensional semi-classical photocurrent is constituted by the electrons with energy above the barrier band edge. However, some of them are captured by bound states and then escape through phonon emission and absorption, respectively. These two oppositely directed processes are simulated by supplementing the drift-diffusion model with a capture-escape model, which uses the electron capture time as a parameter. With the introduction of this model, the three-dimensional semi-classical and two-dimensional quantum-mechanical bound state densities become more balanced. The ultimate set of Poisson, Schrödinger and drift-diffusion equations is solved until a self-consistent solution is reached.

The device structure is illuminated at room temperature by a black body source placed at a distance of 0.4 μm from the emitter. The energy distribution in terms of the wavelength λ of the electromagnetic radiation emitted by a black body at a given temperature T is fully described by the Planck radiation law. This light is absorbed in each quantum well through bound-to-extended state transitions. To simulate the intersubband absorption of infrared radiation, the electromagnetic field is modelled as a plane wave with a frequency $\omega = 2\pi c/\lambda$, where c is the speed of light. The transverse-magnetic gain coefficient, which gives the quantity of photons with transverse-magnetic polarization produced by intersubband transitions per unit length, is derived using Fermi's golden rule:

$$g = \frac{e^2 \pi}{c} \frac{\omega}{n \varepsilon} \sum_{m,n} |d_{m,n}|^2 \rho \frac{\Gamma / (2\pi)}{(E_{mn} - \hbar\omega)^2 + (\Gamma / 2)^2} \int (f_n - f_m) dE, \quad (1)$$

where n is the real part of refractive index; ε is the high-frequency permittivity; $d_{m,n}$ is the dipole moment between the initial n and final m intersubband states; ρ is the two-dimensional density of transverse states; Γ is the line width due to Lorentzian broadening; E_{mn} is the difference between energies of the initial E_n and final E_m intersubband states; \hbar is the reduced Planck constant; f_n, f_m are the Fermi-Dirac distribution functions for the initial and final intersubband states integrated over the full transverse energy range E .

The real part of refractive index for GaN is set to 2.38 [10] and is considered independent of the wavelength. The imaginary part is assumed to be zero to exclude the background absorption of light with transverse-electric polarization.

Results and discussion

The transverse-magnetic gain for each quantum well as a function of the wavelength is given in Fig. 3, *a*. Since the gain is the negative of absorption (hence the minus sign in the ordinate axis), it can be seen from the figure that the photodetector is sensitive over a spectral range from 4 to 6 μm . The absorption bandwidth approximately equals to 0.5 μm and the absorption maximum is observed at around 5.2 μm .

At room temperature, the extended states are expected to be almost empty of electrons due to weak thermal excitation, thus resulting in a small dark current. The capture-escape transitions between these states and the bound states are governed by multiple-phonon processes with a time constant of $1 \cdot 10^{-12}$ s. A very small contribution to the dark current is also made by photon emission – the reverse mechanism of photocurrent generation. The spectral resolution of the radiative capture rate is presented in Fig. 3, *b*. The integration of this value with respect to energy gives a time constant of $8 \cdot 10^{-12}$ s. Thus, we can conclude that the radiative intersubband transitions are negligible in QWIPs.

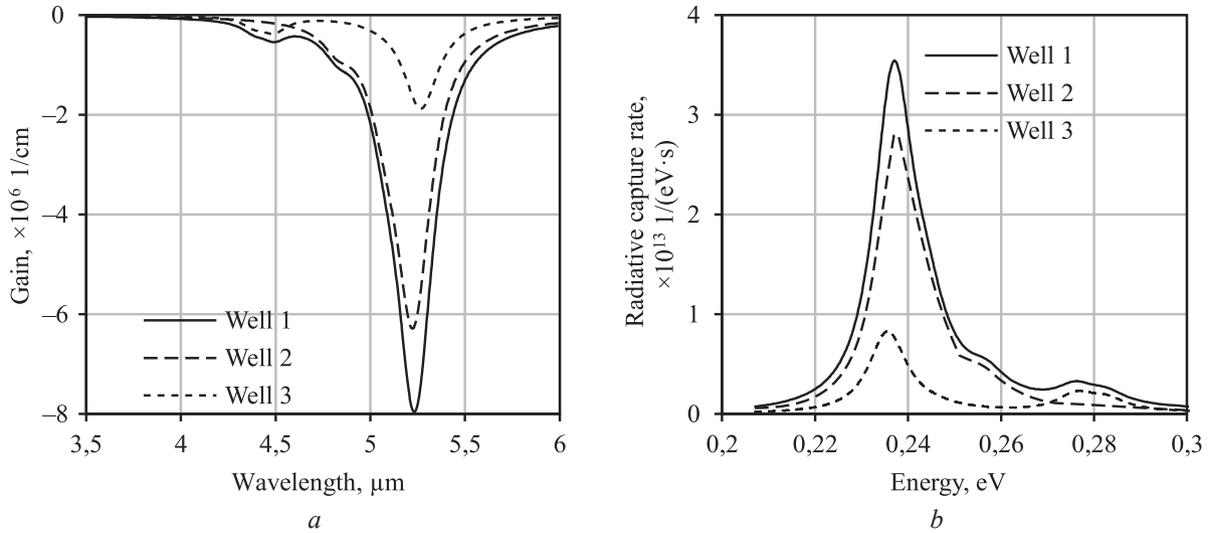


Fig. 3. Intersubband transitions: *a* – transverse-magnetic gain vs. wavelength; *b* – radiative capture rate vs. energy

The dark current of the QWIP as a function of the bias voltage at temperatures from 77 to 300 K is shown in Fig. 4. The characteristics are plotted on a logarithmic scale to demonstrate their distinctive form. As seen from the figure, the dark current is estimated at 10^{-18} – 10^{-14} A/mm when no voltage is applied and exhibits close to linear variation under all temperature conditions when the voltage is raised. As the temperature grows from 77 to 300 K, the curves go up very rapidly due to intensifying thermal excitation. For example, at a voltage of 0.4 V, the dark current increases from $3.4 \cdot 10^{-15}$ to $5.4 \cdot 10^{-6}$ A/mm.

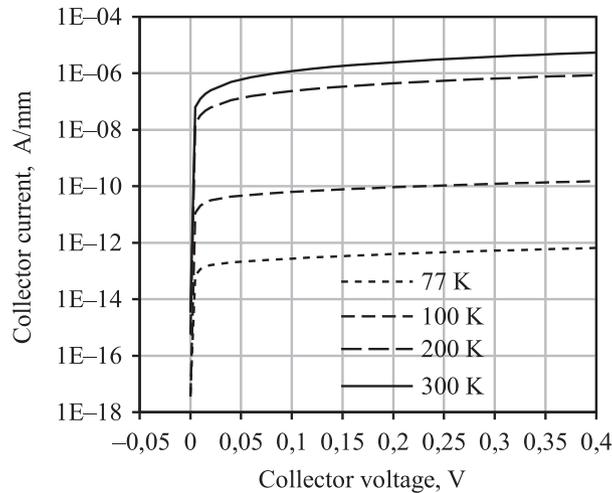


Fig. 4. Dark current at various temperatures

The simulation results obtained when the wavelength of an unpolarized monochromatic beam of light is varied while keeping its angle of incidence constant at 60° with respect to the normal are given in Fig. 5, *a*. The QWIP is zero biased. As expected, the available photocurrent – the hypothetical photocurrent that would be observed if all the electromagnetic radiation absorbed were completely converted into the electric current – has the form equivalent to that of the transverse-magnetic gain, since the only absorption mechanism in the spectral range considered is the intersubband transitions. The maximum available photocurrent of $8.48 \cdot 10^{-7}$ A/mm is observed at 4.64 μm . It should be noted that this maximum point is negatively shifted in the spectrum with respect to the peaks of the gain characteristics because of the applied voltage in the latter case. Since the illuminating black body is closer to the first quantum well, this well generates the bulk of the photocurrent. The available photocurrent as a function of the angle of incidence calculated at a constant wavelength of 4.64 μm is given in Fig. 5, *b*. It is interesting that the maximum of $8.87 \cdot 10^{-7}$ A/mm occurs at 56° and not at right angle, in contrast to what

could be intuitively expected. However, if all the reflections are simulated properly, it may turn out that the beam of light travelling at some acute angle will propagate a shorter path inside the substance before it interacts with the quantum well.

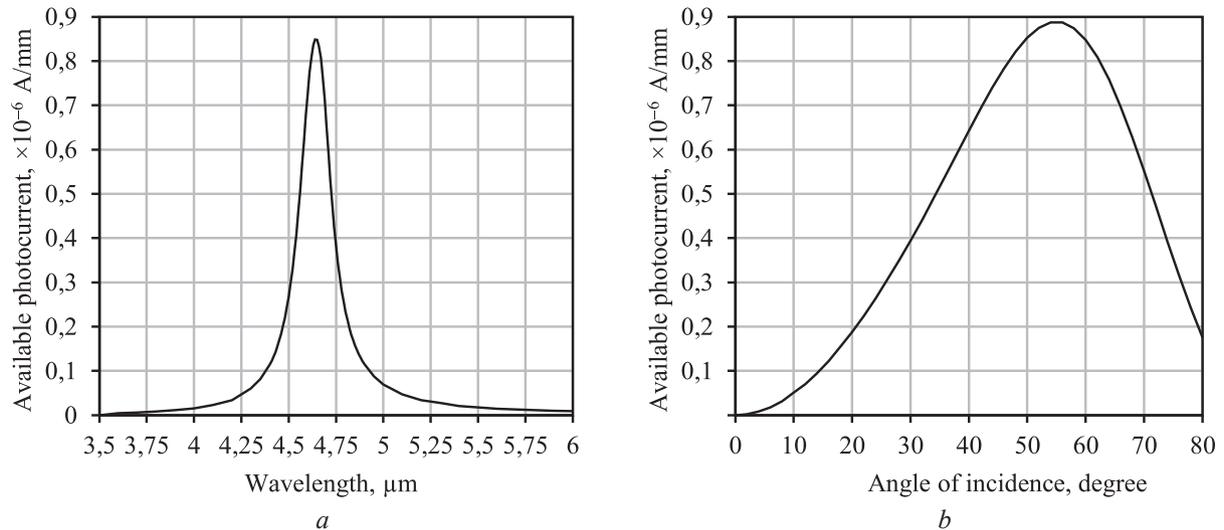


Fig. 5. Spectral and angular response: *a* – available photocurrent vs. wavelength; *b* – available photocurrent vs. angle of incidence

Conclusion

A simulation procedure for analyzing the electrical and optical characteristics of an AlGaIn/GaN intersubband QWIP operating in the middle-wavelength regime is presented in the article. The photoconductive gain spectrum was simulated by coupling the drift-diffusion and capture-escape models in the active region and by excluding the contribution of radiative intersubband transitions. The simulation results showed that the photodetector at zero bias is sensitive over a spectral range from 4 to 6 μm , with the maximum absorption being observed at 4.64 μm . The spectral response of the available photocurrent allowed to conclude that the bound-to-extended state transitions are the only absorption mechanism in QWIPs. The angular response of the available photocurrent showed that the maximum absorption can be achieved if the beam of light impinges on the quantum wells at some acute angle.

References

1. Li H., Yang Z. (2023) Recent Progress in Mid-Infrared Photodetection Devices Using 2D/nD ($n = 0, 1, 2, 3$) Heterostructures. *Materials & Design*. 225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111446>.
2. Rogalski A. (2005) HgCdTe Infrared Detector Material: History, Status and Outlook. *Reports on Progress in Physics*. 68, 2267–2336. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/10/R01>.
3. Rogalski A., Kopytko M., Hu W., Martyniuk P. (2023) Infrared HOT Photodetectors: Status and Outlook. *Sensors*. 23 (17). DOI: <https://doi.org/10.3390/s23177564>.
4. Levine B. F., Hasnain G., Bethea C. G., Chand N. (1989) Broadband 8–12 μm High-Sensitivity GaAs Quantum Well Infrared Photodetector. *Applied Physics Letters*. 54 (26), 2704–2706. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.101002>.
5. Bethea C. G., Levine B. F., Shen V. O., Abbott R. R., Hsieh S. J. (1991) 10- μm GaAs/AlGaAs Multiquantum Well Scanned Array Infrared Imaging Camera. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 38 (5), 1118–1123. DOI: <https://doi.org/10.1109/16.78387>.
6. Patrashin M., Hosako I. (2008) Terahertz Frontside-Illuminated Quantum-Well Photodetector. *Optics Letters*. 33 (2), 168–170. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.33.000168>.
7. Sudradjat F. F., Zhang W., Woodward J., Durmaz H., Moustakas T. D., Paiella R. (2012) Far-Infrared Intersubband Photodetectors Based on Double-Step III-Nitride Quantum Wells. *Applied Physics Letters*. 100. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4729470>.
8. Durmaz H., Nothorn D., Brummer G., Moustakas T. D., Paiella R. (2016) Terahertz Intersubband Photodetectors Based on Semi-Polar GaN/AlGaIn Heterostructures. *Applied Physics Letters*. 108. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4950852>.

9. Martin G., Botchkarev A., Rockett A., Morkoc H. (1996) Valence-Band Discontinuities of Wurtzite GaN, AlN, and InN Heterojunctions Measured by X-Ray Photoemission Spectroscopy. *Applied Physics Letters*. 68 (18), 2541–2543. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.116177>.
10. Barker A. S., Ilegems M. (1973) Infrared Lattice Vibrations and Free-Electron Dispersion in GaN. *Physical Review B*. 7 (2), 743–750. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.7.743>.

Authors' contribution

Volcheck V. S. adapted the physical models, simulated the electrical and optical characteristics of the AlGaIn/GaN QWIP, prepared the manuscript of the article.

Stempitsky V. R. formulated the purpose of the work, made corrections in the manuscript.

Information about the authors

Volcheck V. S., Junior Researcher at the Scientific Research Laboratory “Computer-Aided Design of Micro- and Nanoelectronic Systems” (Lab. 4.4) of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Stempitsky V. R., Cand. of Sci., Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Adviser of the Lab. 4.4 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 17 293-84-09
E-mail: vlad.volchek@bsuir.by
Volcheck Vladislav Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-76-83>

Original paper

UDC 615.47:616-073.5

IT PARKINSON'S DISEASE DIAGNOSTICS BASED ON THE FREEZING OF GAIT ANALYSIS USING LONG SHORT TERM MEMORY NEURAL NETWORK

ULADZIMIR A. VISHNIAKOU, YIWEI XIA

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

Submitted 19.10.2023

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024

Abstract. An analysis of methods for processing data from gait deceleration sensors for detecting Parkinson's disease and a description of the development of a Parkinson's recognition system based on neural networks with long short term memory (LSTM) are performed. The data used was a publicly available dataset of gait deceleration scores of patients with Parkinson's disease, obtained using three wearable sensors to collect data from different parts of the body. The research was carried out using machine learning using an LSTM neural network. First, the DAPHNet datasets were segmented using a fixed sliding window algorithm. The wavelet algorithm was then used to extract features from the data set: wavelet entropy and energy, wavelet waveform length, variance and standard deviation of wavelet coefficient. Next, a data enhancement algorithm was used to balance the number of samples in the data sets. To train the model, an LSTM neural network was built with a six-layer network structure: input layer, LSTM layer, reLU layer, fully connected layer, Softmax layer and output layer. After training the model for 1000 iterations, the LSTM neural network algorithm achieved 96.3 % accuracy, 96.05 % precision, 96.5 % sensitivity, and 96.24 % average F1 score for recognizing Parkinson's disease based on test datasets. Similar studies conducted by other scientific organizations achieved a maximum accuracy of 91.9 % for the same data sets.

Keywords: deep learning, acceleration sensor, time series data, long short term memory neural network, wavelet feature.

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

For citation. Vishniakou U. A., YiWei Xia (2024) IT Parkinson's Disease Diagnostics Based on the Freezing of Gait Analysis Using Long Short Term Memory Neural Network. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-76-83>.

IT-ДИАГНОСТИКА БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА, ОСНОВАННАЯ НА АНАЛИЗЕ ЗАМЕДЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ ПАЦИЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ LSTM НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Ю. А. ВИШНЯКОВ, ИВЭЙ СЯ

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

Поступила в редакцию 19.10.2023

Аннотация. Выполнены анализ методов обработки данных датчиков замедления походки для выявления болезни Паркинсона и описание разработки системы распознавания Паркинсона на основе нейронных сетей с долговременной кратковременной памятью (LSTM). Используемые данные представляли обще-

доступные наборы показателей замедления походки пациентов с болезнью Паркинсона, полученных с помощью трех носимых датчиков для сбора данных с различных частей тела. Исследования проводили посредством машинного обучения с применением нейронной сети LSTM. Сначала наборы данных DAPHNet сегментировали с помощью алгоритма фиксированного скользящего окна. Затем алгоритм вейвлета применяли для извлечения признаков из набора данных: энтропии и энергии вейвлета, длины формы вейвлет-сигнала, дисперсии и стандартного отклонения вейвлет-коэффициента. Далее алгоритм улучшения данных использовался для балансировки количества выборок в наборах данных. Для обучения модели была построена нейронная сеть LSTM с шестислойной сетевой структурой: входной слой, слой LSTM, слой ReLU, полностью подключенный слой, слой Softmax и выходной слой. После обучения модели в течение 1000 итераций алгоритм нейронной сети LSTM достиг 96,3 % точности, 96,05 % прецизионности, 96,5 % чувствительности и 96,24 % среднего значения F1 для распознавания болезни Паркинсона на основе тестовых наборов данных. Аналогичные исследования, проведенные другими научными организациями, позволили достичь максимальной точности 91,9 % для тех же наборов данных.

Ключевые слова: глубокое обучение, датчик ускорения, данные временных рядов, нейронная сеть с длительной кратковременной памятью, вейвлет-функция.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Вишняков, В. А. ИТ-диагностика болезни Паркинсона, основанная на анализе замедления движений пациента с использованием LSTM нейронной сети / В. А. Вишняков, Ивэй Ся // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-76-83>.

Introduction

Parkinson's disease [1] is a chronic neurodegenerative disease in which patients may present with a variety of clinical manifestations including resting tremor, muscle tonus, and bradykinesia. Freezing of gait (FoG) is defined as a brief, sudden suspension or significant reduction in the patient's pace when attempting to walk or in the process of moving forward. It usually lasts for a few seconds, and occasionally for up to 30 s. In the most severe cases, FoG can occur at any time when the patient is walking, and is accompanied by a certain degree of leg tremors.

FoG [2] often occurs when starting, turning or passing through narrow aisles or doors, and is more likely to occur when patients are stressed. 81 % of patients develop FoG after 20 years of disease, and it becomes more frequent as the disease progresses. The patient's quality of life decreases dramatically. Therefore, one of the main goals of Parkinson's disease treatment is to recognize FoG behavior and then use medical treatment to improve patient condition with Parkinson's disease.

The new approach to human gait recognition is proposed, based on the quarterly deviation of the normal distribution to determine the state of human movement and on a Bayesian model with binomial distribution to identify signs and select the best ones [3]. To realize FoG detection with high performance [4] the methods to build FoG detection models using deep convolutional and recurrent networks were proposed. These alarming figures make Parkinson's disease an important focus of attention. In [5] presented contributions that suggest wavelet techniques as a useful tool to perform a gait and arm swing analysis; this represents an important approximation that can contribute to describe and differentiate people with Parkinson's disease in early stages of the disease. In [6] authors proposed a novel intelligent Parkinson detection system based on deep learning techniques to analyze gait information. In [7] presented continuous monitoring activity of daily living (ADLs) and classification freezing of gait episodes using Wi-Fi and radar imaging. The objective of [8] was to test the success of the data set obtained by a wearable health assistant developed for the symptom of freezing in gait of Parkinson's patients and to increase the success of the system. In [9] aimed to identify trends, challenges and opportunities in the development of FoG detection and prediction systems. Inspired by state-of-art deep learning techniques [10] aimed to improve the detection model by proposing a feature learning deep denoising auto encoder to learn the salient characteristics of Parkinsonian gait data that is applicable to different walking styles for the elimination of manually handcrafted features. The proposed model achieved a generalization accuracy of 89.2 % and a geometric mean of 88.8 % [11]. The growing popularity and success of Transformer networks in natural language processing and image recognition motivated the authors to develop a novel method for the problem based on an automatic features extraction via Transformers. The use of Transformers in 1D signal is not really widespread yet, but in [12] shown that they are effective in extracting relevant features from 1D signals. This work used the LSTM neural network algorithm to recognize the FoG in Parkinson's disease.

Methodology

In this paper, the model is trained and tested on the DAPHNet datasets. The issue of gait freezing in Parkinson's disease was studied in a study by [13]. The dataset was recorded in the lab with emphasis on generating many freeze events. Users performed three kinds of tasks: straight line walking, walking with numerous turns, and finally a more realistic ADL task, where users went into different rooms while fetching coffee, opening doors, etc. The dataset comprises 3 wearable wireless acceleration sensors – recording 3D acceleration at 64 Hz. The sensors are placed at the ankle (shank), on the thigh just above the knee, and on the hip. The Fig. 1 shows the position of the sensor on the experimenter.

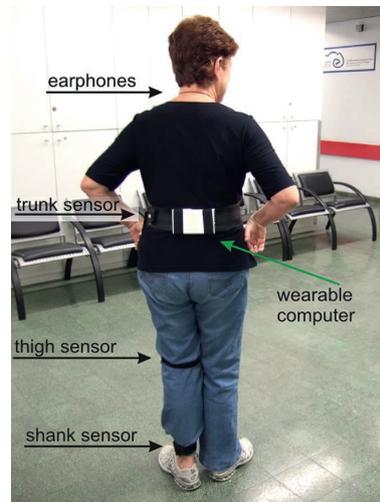


Fig. 1. The position of the sensor on the experimenter

These datasets are multivariate time series datasets. There many records in total, each records contains 1 time stamp, 9 acceleration (each sensor has x , y , z axis acceleration) and 1 label. The data used in this work has a total of 1 917 887 data records, but it only contains 237 FoG events. The FoG duration is very short, so the number of FoG records is far less than the number of non-FoG records in the datasets, so the datasets have a serious data imbalance problem. There are two ways to deal with the data imbalance, the one is to overcome the imbalance of sample size at the sample level, for example, to reduce or increase the sample size of one type in the classification by oversampling and under sampling, so as to achieve the sample balance. The another one is to overcome the imbalance of sample size at the level of model algorithm, such as assigning higher weights to a few classes by using the class weights parameter. In this work, the new approach was to first extract features from the original dataset and then randomly reduce the number of non-FoG feature data samples to achieve a 1:1 ratio between the number of feature data of the two classes in the dataset.

The original data is a continuous stream of time series data, so the features cannot be extracted directly and the data needs to be segmented. In the current research work, action data segmentation algorithm generally uses a sliding window with fixed window size. In this work, window length is 32, the overlap coverage is 50 %, and the window period is 0.5 s. Since the FoG signal is a non-stationary signal, the relevant statistical features, such as maximum, minimum and average, are directly extracted, which do not show the actual characteristics of the FoG signal. However, the transformation of the FoG signal is slow and can be considered as short-time smooth, which means it is smooth in a short period of time (20–30 ms), so it is more appropriate to use the wavelet transform method to extract the features of the signal.

The method used for this experiment is to decompose four layers of wavelet coefficients using db6 wavelet, and then calculate the statistical features of each layer of wavelet coefficients. Five wavelet features are extracted from each layer of wavelet coefficients, and they are wavelet entropy, wavelet energy, wavelet waveform length, wavelet coefficient variance, and wavelet coefficient standard deviation. There are three axes on each sensor, so there are 75 wavelet features in total.

Long short term memory (LSTM) network [14] is a modified recurrent neural network, mainly by introducing a gating mechanism to control the accumulation rate of information, including selec-

tively adding new information and selectively forgetting previously accumulated information, thus improving the long-range dependency problem of recurrent neural networks (RNNs) and alleviating the gradient disappearance problem during the training of long sequences. The idea of LSTM is that the hidden layer of the original RNNs has only one state, which cannot handle long-range data. So the LSTM adds a storage unit to store the long-term state, called cell state. Finally, a gate unit is added to control the input, output or forgetting of information. The Fig. 2 shows the structure of LSTM neural networks.

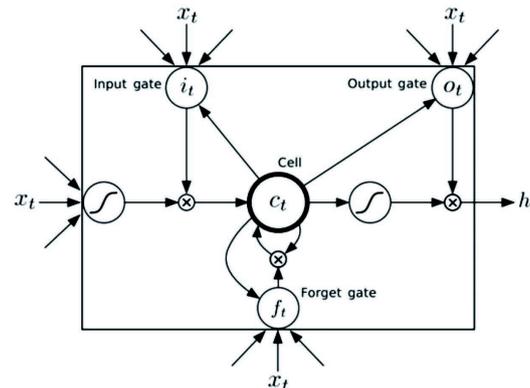


Fig. 2. The structure of long short-term memory neural networks

Three gates are placed in a cell, called the input gate, the forget gate and the output gate. A message enters the LSTM network and can be judged as useful or not according to the rules. Only information that meets the algorithm's certification is left behind, while information that does not meet the criteria is forgotten through the forgetting gate. The function of the three LSTM gates:

- 1) forgetting gate: determines how much information needs to be forgotten in the previous moment's memory cell state and how much information is retained in the current memory cell state;
- 2) input gate controls information which should be added to the current memory cell state;
- 3) output gate controls information from the current memory cell state should be output.

This work is conducted under the widows 11 platform, with MATLAB R2022b software under i7-10750H CPU. MATLAB is a combination of the word's matrix laboratory, which is a high-tech computing environment for scientific computing, visualization and interactive programming. It integrates many powerful functions such as numerical analysis, matrix computation, visualization of scientific data, and modeling and simulation of nonlinear dynamic systems in an easy-to-use window environment, providing a comprehensive solution for scientific research, engineering design, and many scientific fields where effective numerical computation must be performed, and largely free from the editing mode of traditional non-interactive programming languages. The following are the main MATLAB toolboxes that are used in the work.

1. Classification learner toolbox. This toolbox is integrated with machine learning algorithms, we use the machine learning algorithms contained in it to do experiments to compare the effect of LSTM algorithm.
2. Deep network designer toolbox. This toolbox provides a visual way to build a network model, we use this toolbox to build LSTM neural network model.

Experiments and results

Since the data in the publicly available DAPHNet dataset was labeled, the experiments conducted in this work were limited to studying the results of binary classification. The steps of this experiment were as follows.

1. The data were cleaned and the abnormal data and missing data were removed.
2. Executed segmenting the data through a time window of size 32, with an overlap of 50 %.
3. Executed extracting features from the data in each window. The authors used db6 wavelet to decompose four layers of wavelet coefficients, and then calculated the statistical features of each layer of wavelet coefficients. Five wavelet features were extracted from each layer of wavelet coefficients: wavelet entropy, wavelet energy, wavelet waveform length, wavelet coefficient variance and wavelet coefficient standard deviation. There are three axes on each sensor, so there are 75 wavelet features in total.

4. The data augmentation method was used to equalize the amount of data in both categories in the datasets.
 5. The feature datasets were divided into training datasets and testing datasets according to 9:1.
 6. The training datasets were inputted into the LSTM model for 1000 epochs to optimize the LSTM model, and the fivefold cross-validation method was used.
 7. The recognition accuracy of the LSTM model was tested on the testing datasets.
- The Fig. 3 illustrates the process of training and testing the dataset in this experiment.

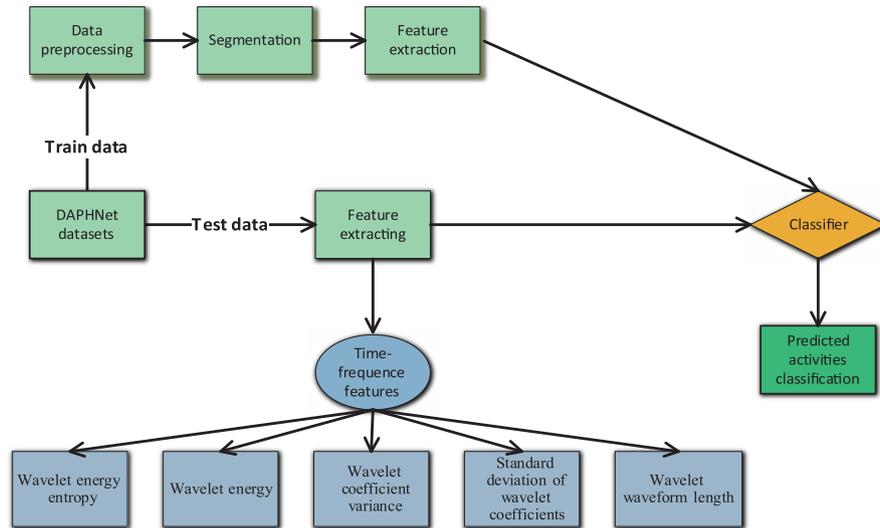


Fig. 3. The process of training and testing the dataset in this experiment

The LSTM neural network in this work had a total of six layers and 1.9K learnable properties. The Fig. 4 illustrates the structure of the LSTM neural network.

	Name	Type	Activations	Learnable Properties	States
1	sequenceinput Sequence input with 75 dimensions	Sequence Input	$75(C) \times 1(B) \times 1(T)$	–	–
2	lstm LSTM with 6 hidden units	LSTM	$6(C) \times 1(B)$	InputWeights 24×75 RecurrentWeights 24×6 Bias 24×1	HiddenState 6×1 CellState 6×1
3	relu ReLU	ReLU	$6(C) \times 1(B)$	–	–
4	fc 2 fully connected layer	Fully Connected	$2(C) \times 1(B)$	Weights 2×6 Bias 2×1	–
5	softmax softmax	Softmax	$2(C) \times 1(B)$	–	–
6	classoutput crossentropyex with classes '1' and '2'	Classification Output	$2(C) \times 1(B)$	–	–

Fig. 4. The structure of long short term memory neural networks

The Tab. 1 shows the LSTM neural network model hyperparameter setting table in this experiment. The Fig. 5 showed the process of training the LSTM model in 1000 epochs.

Table 1. Long short term memory neural network model hyperparameter setting table in this experiment

Number	Parameter name	Parameter value
1	MiniBatchSize	64
2	MaxEpochs	1000
3	InitialLearnRate	0.01
4	LearnRateDropFactor	0.10
5	LearnRateDropPeriod	700
6	Shuffle	Every-epoch
7	Optimization	Adam

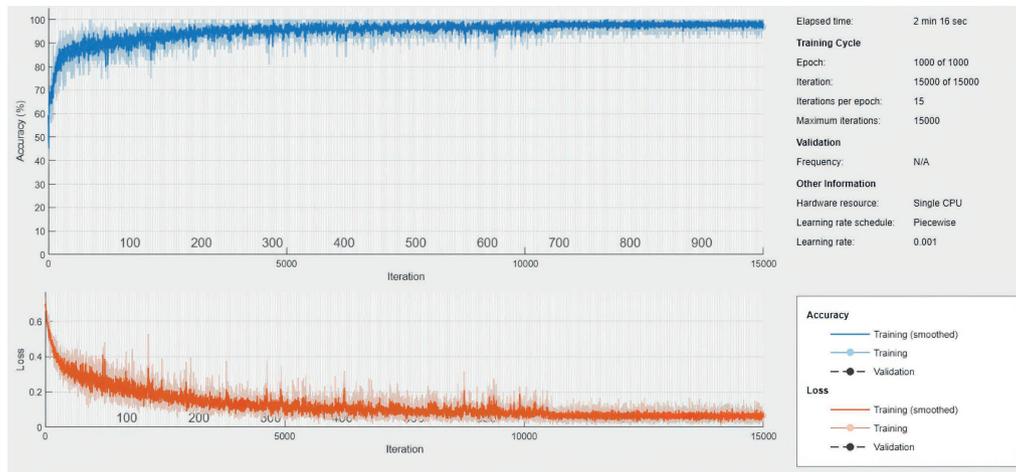


Fig. 5. The process of training the long short-term memory model in 1000 epochs

As can be seen in Fig. 5, after entering training datasets into the model and completing 1000 training periods, the LSTM model converged (losses assumed the same value). The Fig. 6 showed comparison of prediction results for the training and testing datasets. The accuracy of the LSTM model was 96.29 % for the testing datasets and 97.13 % for the training datasets. The accuracy of the testing datasets were lower than the accuracy of the training datasets by 0.84 %, which meant that the model was not over fitted. The Fig. 7 shows confusion matrix of training and testing datasets.

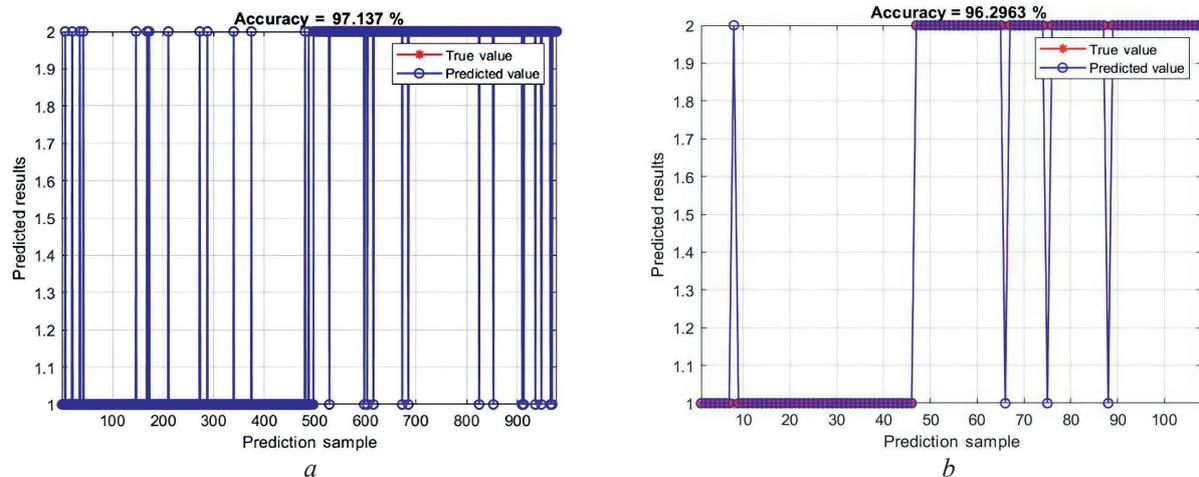


Fig. 6. Comparison of forecasting results for data sets: *a* – training; *b* – test

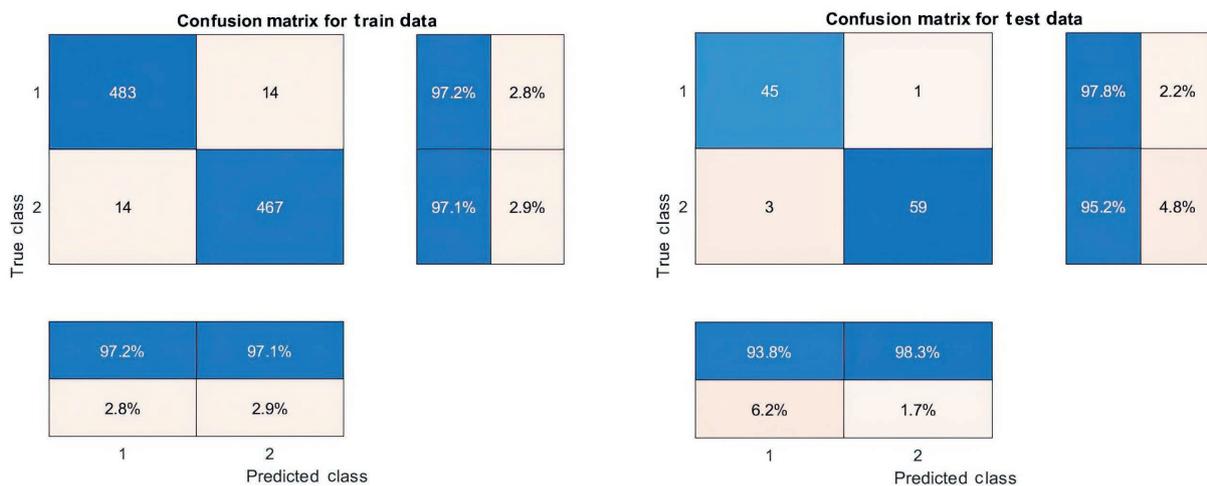


Fig. 7. Confusion matrix of data sets: *a* – training; *b* – test

The categories were distributed equally in the training and testing datasets, as it can be seen in Fig. 7. The confusion matrix was used to calculate various performance metrics for the classification problem, including sensitivity, accuracy and F1 score for a particular category. The Tab. 2 shows the experimental results of Parkinson’s disease recognition based on test datasets using LSTM.

Table 2. The experimental results of Parkinson’s disease recognition based on test datasets using long short term memory

Dataset	Average precision, %	Average sensitivity, %	Average F1 score, %	Test accuracy, %
DAPHNet	96.05	96.50	96.24	96.30

In summary, the accuracy of the LSTM-based Parkinson’s disease model could reach 96.3 % on the test dataset and 97.13 % on the training dataset. On the testing datasets, the average accuracy was 96.05 %, the average sensitivity was 96.50 %, and the average F1 score was 96.24 %. This experimental result showed that the recognition of Parkinson’s disease using LSTM algorithm based on FoG data was effective. The test accuracy of this study and existing studies on the same datasets are compared in the Tab. 3.

Table 3. Compare with others’ research

Dataset	Researcher	Research methods	Test accuracy, %
DAPHNet	[15]	Deep convolutional neural networks with five-layer CNN	80.7
DAPHNet	[16]	LSTM based on the unprocessed datasets	83.4
DAPHNet	[17]	Improved DL neural networks model	91.9
DAPHNet	[16]	SVM	79.5
DAPHNet	The proposed	LSTM based on the wavelet features datasets	96.3

The Tab. 3 shows that the LSTM based on the wavelet features datasets had the highest test accuracy with 96.3 % for the same datasets.

Conclusion

1. The article presents the state of the art of the most relevant freezing of gait recognition systems in Parkinson’s disease and discusses their results. Using the sliding fixed window algorithm, data segmentation was applied to the public dataset, and then from the windowed data, we extracted five types of wavelet features: wavelet entropy, wavelet energy, wavelet waveform length, wavelet coefficient variance and wavelet coefficient standard deviation. The data Augmentation algorithm was used to balance the number of classes in the extracted feature datasets. Datasets of objects were used in long short term memory neural network model, and the model had a six-layer network structure.

2. Based on the DAPHNet datasets of patients for IT diagnostics of Parkinson’s disease, the recognition accuracy for the long short term memory algorithm reached 96.3 %. Our results of IT diagnostics of Parkinson’s disease were compared with the known results of other researchers, the best of which are 91.9 %.

References

1. Davie C. A. (2008) A Review of Parkinson’s Disease. *British Medical Bulletin*. 86 (1), 109–127.
2. Nutt J. G., Bloem B. R., Giladi N., Hallett M., Horak F. B., Nieuwboer A. (2011) Freezing of Gait: Moving Forward on a Mysterious Clinical Phenomenon. *The Lancet Neurology*. 10 (8), 734–744.
3. Arshad H., Khan M. A., Sharif M., Yasmin M., Javed M. Y. (2019) Multi-Level Features Fusion and Selection for Human Gait Recognition: An Optimized Framework of Bayesian Model and Binomial Distribution. *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.* 10 (12), 3601–3618.
4. Zhang Y, Gu D. (2019) A Deep Convolutional-Recurrent Neural Network for Freezing of Gait Detection in Patients with Parkinson’s Disease. *Image and Signal Processing. IEEE*. 1–6.
5. Castaño-Pino Y. J., Navarro A., Muñoz B. (2019) Using Wavelets for Gait and Arm Swing Analysis. *Wavelet Transform and Complexity*. 1–15.

6. Maachi I. E., Bilodeau G.-A., Bouachir W. (2020) Deep 1D-Convnet for Accurate Parkinson Disease Detection and Severity Prediction from Gait. *Expert Systems with Applications*. 5, 1–27.
7. Shah S. A., Tahir A., Ahmad J., et al. (2020) Sensor Fusion for Identification of Freezing of Gait Episodes Using Wi-Fi and Radar Imaging. *IEEE Sensors Journal*. 20 (23), 410–422.
8. Guney S., Boluk B. (2020) Daphnet Freezing Recognition with Gait Data by Using Machine Learning Algorithms. *Telecommunications and Signal Processing*. 1, 1–8.
9. Martínez-Villaseñor L., Ponce H., Miralles-Pechuán L. (2020) A Survey on Freezing of Gait Detection and Prediction in Parkinson's Disease. *Advances in Soft Computing*. 2, 169–181.
10. Noor M. B. T., Zenia N. Z., Kaiser M. S., Mamun S. A., Mahmud M. (2020) Application of Deep Learning in Detecting Neurological Disorders from Magnetic Resonance Images: A Survey on the Detection of Alzheimer's Disease, Parkinson's Disease and Schizophrenia. *Brain Inf.* 7 (1), 1–11.
11. Noor M. H. M., Nazir A., Ab Wahab M. N. (2021) Detection of Freezing of Gait Using Unsupervised Convolutional Denoising Autoencoder. *IEEE Access*. 9, 700–709.
12. Nguyen D. M. D., Miah M., Bilodeau G.-A., Bouachir W. (2022) Transformers for 1D Signals in Parkinson's Disease Detection from Gait. *arXiv*. 4, 1–7.
13. Bachlin M., Plotnik M., Roggen D., Maidan I., Hausdorf K. M., Giladi N. (2009) Wearable Assistant for Parkinson's Disease Patients with the Freezing of Gait Symptom. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 14 (2), 436–446.
14. Damaševičius R., Abayomi-Alli O., Maskeliūnas O., Abayomi-Alli A. (2020) BiLSTM with Data Augmentation Using Interpolation Methods to Improve Early Detection of Parkinson Disease. *Annals of Computer Science and Information Systems*. 21, 371–380.
15. Xia Y., Zhang J., Ye Q. N., Cheng Lu Y., Zhang D. (2018) Evaluation of Deep Convolutional Neural Networks for Detection of Freezing of Gait in Parkinson's Disease Patients. *Biomedical Signal Processing and Control*. 46, 221–230.
16. Ashour A. S., El-Attar A., Dey N., Abd El-Kader H., Abd El-Naby M. M. (2020) Long Short Term Memory Based Patient-Dependent Model for FoG Detection in Parkinson's Disease. *Pattern Recognit. Lett.* 1, 23–29.
17. Li B., Yao Z., Wang J., Wang S., Yang X., Sun Y. (2020) Improved Deep Learning Technique to Detect Freezing of Gait in Parkinson's Disease Based on Wearable Sensors. *Electronics*. 9 (11), 1–12.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Information about the authors

Vishniakou U. A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

YiWey Xia, Postgraduate at 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 44 486-71-82
E-mail: vish@bsuir.by
Vishniakou Uladzimir Anatol'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-84-92>

Original paper

UDC 004.93:616-071

EFFECTIVE ALGORITHM FOR BIOMEDICAL IMAGE SEGMENTATION

DI ZHAO, YI TANG, ALEVTINA B. GOURINOVITCH

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

Submitted 20.11.2023

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024

Abstract. Biomedical image segmentation plays an important role in quantitative analysis, clinical diagnosis, and medical manipulation. Objects in medical images have different scales, types, complex backgrounds, and similar tissue appearances, making information extraction challenging. To solve this problem, a module is proposed that takes into account the features of images, which will improve the biomedical image segmentation network FE-Net. An integral part of the FE-Net algorithm is the connection skipping mechanism, which ensures the connection and fusion of feature maps from different layers in the encoder and decoder. Features at the encoder level are combined with high-level semantic knowledge at the decoder level. The algorithm establishes connections between feature maps, which is used in medicine for image processing. The proposed method is tested on three public datasets: Kvasir-SEG, CVC-ClinicDB and 2018 Data Science Bowl. Based on the results of the study, it was found that FE-Net demonstrates better performance compared to other methods in terms of Intersection over Union and F1-score. The network under consideration copes more effectively with segmentation details and object boundaries, while maintaining high accuracy. The study was conducted jointly with the Department of Magnetic Resonance Imaging of the N. N. Alexandrov National Oncology Center. Access to the source code of the algorithm and additional technical details is available at <https://github.com/tyjcbzd/FE-Net>.

Keywords: biomedical image segmentation, convolution neural network, feature aware module, attention mechanism, U-shaped network.

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

Gratitude. This work is funded by the China Scholarship Council.

For citation. Di Zhao, Yi Tang, Gourinovitch A. B. (2024) Effective Algorithm for Biomedical Image Segmentation. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 84–92. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-84-92>.

ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ БИОМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

ДИ ДЖАО, И ТАН, А. Б. ГУРИНОВИЧ

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

Поступила в редакцию 20.11.2023

Аннотация. Сегментация биомедицинских изображений играет важную роль в количественном анализе, клинической диагностике и медицинских манипуляциях. Объекты на медицинских изображениях имеют различный масштаб, тип, сложный фон и схожий внешний вид тканей, что усложняет извлечение информации. Для решения данной проблемы предлагается модуль, учитывающий особенности изображений, что позволит усовершенствовать биомедицинскую сеть сегментации изображений FE-Net. Неотъемле-

мая часть алгоритма FE-Net – механизм пропуска соединений, обеспечивающий соединение и объединение карт признаков из различных слоев в кодере и декодере. Признаки на уровне кодера комбинируются с высокоуровневыми семантическими знаниями на уровне декодера. Алгоритм устанавливает связи между картами признаков, что используется в медицине для обработки изображений. Предлагаемый метод протестирован на трех общедоступных наборах данных: Kvasir-SEG, CVC-ClinicDB и 2018 Data Science Bowl. По результатам исследования установлено, что FE-Net демонстрирует лучшую производительность по сравнению с другими методами по показателям Intersection over Union и F1-оценки. Рассматриваемая сеть эффективнее справляется с деталями сегментации и границами объектов, сохраняя при этом высокую точность. Исследование проведено совместно с отделением магнитно-резонансной томографии Национального онкологического центра имени Н. Н. Александрова. Доступ к исходному коду алгоритма и дополнительным техническим деталям размещен по ссылке <https://github.com/tyjcbzd/FE-Net>.

Ключевые слова: сегментация биомедицинских изображений, свёрточная нейронная сеть, модуль распознавания признаков, механизм внимания, сеть с U-образной архитектурой.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа поддерживается Китайским стипендиальным советом.

Для цитирования. Джао, Ди. Эффективный алгоритм сегментации биомедицинских изображений / Ди Джао, И Тан, А. Б. Гуринович // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 84–92. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-84-92>.

Introduction

Medical images are images generated using various imaging technologies in the medical field and are used to diagnose, treat, and study diseases. Medical images can include image vessels, cells, and lesions. With the continuous development of biomedical imaging technology, more and more diagnostic imaging tools have emerged, such as magnetic resonance imaging, computed tomography, and positron emission tomography [1]. Normally, doctors to distinguish and make diagnoses with the naked eye do medical image segmentation. However, since the human eye is essentially an imperfect tool, inter-observer and intra-observer differences are prone to occur. At the same time, when the number of medical images increases, manual segmentation becomes tedious and expensive, and very challenging to perform. Therefore, image segmentation technology under deep learning methods can be used as an auxiliary method for detection. Image segmentation refers to the subdivision of an image into components with the same characteristics to extract regions of interest on a semi-automatic or automatic basis.

In recent years, image segmentation methods have made great progress in biomedical image segmentation and clinical decision-making. Different convolutional network models have dominated detection, classification, and segmentation problems in the biomedical field. Convolutional neural network architectures based on encoder-decoder include U-Net [2], U-Net++ [3], ResU-Net++ [4], etc. They have excellent performance in segmentation tasks. The success of these models is largely attributed to the skip connection. Through the joint high-resolution and low-resolution information, thereby improving feature expression. Skip connection algorithm solves the problem of widespread semantic errors between high- and low-resolution features. But information loss and fuzziness are ignored when extracting features at each level.

In order to address this problem and enhance the performance of image segmentation, this research proposes an improved module called the Feature-Aware Module (FAM). The proposed method utilizes an encoder-decoder architecture and incorporates attention mechanisms and residuals to allow the network to adaptively adjust the importance of each layer of features. This enables the network to focus more on key areas, suppress irrelevant noise, and prioritize the extraction of detailed and accurate features at each layer. This densely connected design enables the network to fully leverage the information exchange between low-level and high-level features, thereby enhancing multi-scale expressive capabilities and context awareness of the features.

Furthermore, this fine-grained attention regulation contributes to the enhancement of segmentation accuracy and model robustness in complex scenes. The proposed model is evaluated through experiments on three public datasets, and the results demonstrate significant improvements in image segmentation tasks. Compared to existing methods, the proposed module excels in handling segmentation details and boundaries while maintaining a high level of accuracy.

Relevant studies analysis

Research has mainly focused on the meaningful feature extraction for the medical image semantic segmentations. Efficiency is improved by using neural networks. The primary focus of research has been on extracting meaningful features for the medical images semantic segmentation. Additionally, the efficiency of segmentation has been enhanced through the utilization of neural networks.

Deep learning methods based on Convolutional Neural Networks (CNN) have demonstrated excellent performance in medical image segmentation. However, CNN only assigns categories to the entire image and does not classify individual pixels, making it unsuitable for image segmentation. In [5], a sophisticated image semantic segmentation method called “Fully Convolutional Network (FCN)” was proposed as an advancement of CNN. FCN substitutes a convolutional layer in the fully connected layer place. This configuration enables training from start to finish. This algorithm allows facilitating the per-pixel basis processing and gradual up sampling to enhance the feature dimension. Nonetheless, this approach sacrifices some detailed information from the original image, limiting further improvements in segmentation performance.

Ronneberger O. et al. [2] have developed the encoder-decoder network U-Net algorithm on the FCN network. This is a perfect tool for various types of medical image semantic segmentation tasks. It fully utilizes both low-level and high-level features in the image through the use of skip connections mechanism. This is a perfect tool for various types of medical image semantic segmentation tasks.

Based on this method, a nested U-Net (U-Net++) network for medical image segmentation was proposed [3]. The encoder and decoder subnetworks are connected through a series of nested dense skip paths in the proposed model. This method allows detailed information to be collected at different scales. This multi-scale feature fusion technique enhances the accuracy and detail retention of segmentation results. Subsequently [6] proposed an improved network Modified U-Net (mU-Net) based on the encoder-decoder network, which improves the accuracy of image segmentation by introducing an inverse convolutional layer and activation operations to skip the connected layers. However, they ignore the problem of information loss and blurring during feature extraction in each layer. To solve this problem and further improve the image segmentation performance, an improved encode-decode based network is designed in this research.

Feature aware module

While increasing the depth of a CNN can enhance the model’s performance, it may also introduce challenges such as the vanishing gradient problem (gradients become very small and slow down learning) or the exploding gradient problem (gradients become very large and cause instability during training). To solve this problem, the idea of [7] is utilized to add shortcuts between layers in the learning paradigm, which is the proposed FAM, the flow chart of FAM is shown below in Fig. 1, b. The FAM divides the input of the network into two branches, the first of which first acquires the basic features of the image through three 3×3 convolutional and constant mappings, where each convolutional layer is followed by a batch normalization layer and a rectified linear unit (ReLU) nonlinear activation function.

Then, in order to make the module more sensitive to important features while suppressing unimportant features. Similar to the work of [8], the Squeeze and Excite (SE) module is used after the three convolutional networks, with the SE layer acting as a content-aware mechanism, re-weighting each channel accordingly to create a robust representation. First, the feature map is compressed by using global average pooling to obtain a global understanding of each channel. The squeezing operation produces a feature vector of size n , where n refers to the number of channels [9]. In the second step: excitation, this feature vector is fed through a two-layer feed-forward neural network, where the number of features is first reduced and then expanded to the original size n . This n -sized vector now represents the weights of the original feature map, which are used to scale each channel [10]. The input to the second branch is passed through 1×1 convolution and batchnorm. finally, the results of both branches of the module are subjected to concatenate and relu operations. The computation of the proposed module can be denoted as the following formulas:

$$F_{3 \times 3}^k = \sigma(BN(W_{3 \times 3}^k \bullet I_{out}^k)); \quad (1)$$

$$I_{3 \times 3}^k = F_{3 \times 3}^k(I_{in}); \quad (2)$$

$$O_l = SE(BN(Conv_{3 \times 3}(I_{out}^3))); \quad (3)$$

$$O_r = \text{Conv}_{1 \times 1}(I_{in}); \quad (4)$$

$$\text{Output} = \sigma(O_l \oplus O_r), \quad (5)$$

where I_{in} is the raw input image or input feature map; $F_{3 \times 3}^k$ is the extracted features by convolutional weighting operation on the output feature map; I_{out}^k is the result of the k^{th} convolution image, $k \in \{1, 2, 3\}$; σ is the weights of the convolution layer; \bullet denotes the convolution function, σ represents the Relu activation function; \oplus is the operation addition.

To address this issue, a solution proposed in [7] involves incorporating shortcuts between layers within the learning paradigm. The Residua Block, introduced in [10], adopts this approach. However, it is observed that the number of convolutional layers in each stage of the Residual Block is insufficient for effectively extracting essential feature information. To overcome this limitation, an extension called FAM module has been proposed.

Structure of FE-Net

For medical image segmentation, a novel model using the proposed FAM following the encoder-decoder architecture, which is referred to as FE-Net. The architecture of FE-Net is illustrated in Fig. 1, *a*. The classical U-Net, known for its ability to handle multi-resolution synthesis and decomposition, is employed by cascading encoders and decoders with skip connections [8]. Similarly, to address the diverse scales present in medical images, the proposed network adopts the classical encoder-decoder structure. In the proposed model, the encoder performs convolution and pooling (shrinking paths) on a given input image to create a compressed representation that can adapt to the scale of the medical image and extract local details. This compressed representation is then up-sampled in the decoder (expansion path) using deconvolution, generating a mask that highlights the region of interest. Additionally, skip connections are incorporated to concatenate these feature maps with the corresponding feature maps from the encoder layers. This merging of low-level and high-level semantic information enhances the generation of accurate masks. Specifically, the feature maps are concatenated after the skip connection, and the merged feature maps are fed into the FAM, which mitigates the problem of gradient vanishing and captures valid features. Unlike existing neural networks, the proposed network uses bilinear interpolation instead of transposed convolution in the up-sampling process of the decoder part, which can accelerate the model's computation speed and inference speed while ensuring smooth zooming of the image or feature maps, saving a lot of training memory consumption and time.

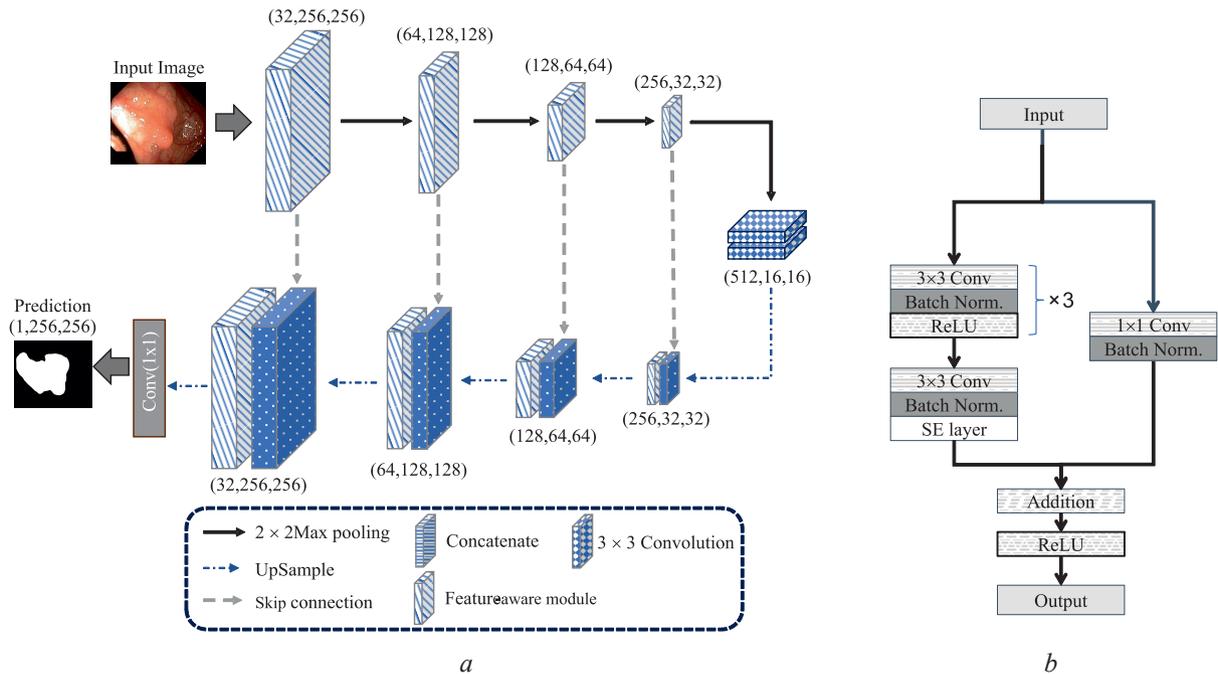


Fig. 1. The architecture of the proposed network and module:
a – architecture of FE-Net; *b* – flowchart of feature-aware module

In the proposed model, 32 filters are used in the first block and then 64, 128, 256, and 512 filters are used in each block in the network contraction path. The number of filters in each block in the network expansion path corresponds to the contraction path. Finally, a binary or multiclass segmentation mask is output using a 1×1 convolution, backed by a sigmoid layer.

Dataset description

To train and validate the proposed FE-Net models in this research, this research test it on three publicly available biomedical image datasets. The descriptions of the three datasets are as follows:

1) Kvasir-SEG: this data set contains 1.000 pictures of different resolutions. The ground truth mask corresponding to the picture consists of a large number of images annotated by professional doctors, including normal tissue, polyps, ulcers, and other lesion types;

2) CVC-ClinicDB: this dataset includes 612 RGB images, the resolution for each image is 384×288 . These images include normal colon tissue, polyps, ulcers, and other structures and lesions. Different patients and different lens settings were taken into account during image acquisition to ensure diversity and realism in the data set;

3) 2018 Data Science Bowl: this data set contains 670 256×256 images. This data set provides a large amount of cell image data, including various types of cells, such as cancer cells, normal cells, etc.

For the above three datasets, they were split into training sets, verification machines and test sets through random sampling and in a ratio of 8:1:1. The details of the biomedical dataset used in the proposed experiments, denoting the total number of images, size of input images, number of training samples, number of validation samples, and number of test samples, are presented in Tab. 1.

Table 1. Details of the biomedical dataset

Dataset	Images	Size	Train	Validation	Test	Application
Kvasir-SEG	1000	Variables	800	100	100	Colonoscopy
CVC-ClinicDB	612	384×288	490	61	61	Colonoscopy
2018 Data Science Bowl	670	256×256	530	67	67	Nuclie

Evaluation metrics

In this research, various standard evaluation metrics are employed [15] to validate the effectiveness of FE-Net. These metrics include precision, dice coefficient (also known as F1 score), recall, and mean intersection over union (mIoU). All evaluation metrics can be calculated using TP and FP , where TP represents the number of true positives and FP represents the number of false positives.

Precision: an indicator to measure the proportion of true examples (True Positive) in the model prediction results. It indicates how many of the samples predicted as positive by the model are truly positive. It can be calculated in formula

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (6)$$

Dice coefficient (also known as F1 score) is a metric used to evaluate the similarity between model predictions and real labels in an image segmentation task. It takes into account the degree of overlap between the predicted results and the real labels, and takes a value ranging from 0 to 1. Higher values indicate that the predicted results are more similar to the real labels. It can be calculated in formula

$$\text{Dice} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}. \quad (7)$$

Recall is a measure of the proportion of True Positive samples that the model successfully detects. It indicates how many of all True Positive samples are correctly detected by the model. It can be calculated in formula

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (8)$$

Mean intersection over union is an average value used to evaluate the degree of overlap between the model predictions and the true labels in an image segmentation task. It calculates the ratio between the intersection and concatenation between the predicted results and the true labels and averages it overall categories. Assuming that there are a total of k classes, and its calculation formula is as below in formula

$$mIoU = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k \frac{TP}{TP + FP + FN}. \quad (9)$$

Data augmentation and experimental results

Today's deep learning researchers rely on large data sets to avoid overfitting problems and data imbalance. Usually the data sample size of biomedical images is small. Therefore, for the train dataset, the research choose to use data augmentation techniques. Random cropping and rotate the image by $[90^\circ, 180^\circ, 270^\circ]$ was utilized. In this way, new data sets are obtained, making the trained model more robust. However, for the test set, data augmentation was not used [12].

1. Results on Kvasir-SEG: Kvasir-SEG is a publicly available polyp segmentation dataset. This dataset is highly used for algorithm benchmarking. The proposed FE-Net has trained and compared with other widely used segmentation models. Tab. 2 shows the comparison results, the proposed methods outperforms other models on all most all metrics. It can be observed that the precision of FE-Net is 91.57 %, which is 8.70 and 1.52 % better than Attention U-Net [13] and recent FANet [10].

2. Results on CVC-ClinicDB: CVC-ClinicDB is a well-known dataset in the field of polyp segmentation, widely used for evaluating the performance of various algorithms. In proposed study, the proposed network was trained on the CVC-ClinicDB dataset and conducted a comprehensive comparison with other popular segmentation models. The results, as shown in Tab. 3, demonstrate the effectiveness and efficiency of the proposed approach in accurately segmenting polyps in the CVC-ClinicDB dataset. The proposed model achieved competitive performance and outperformed several state-of-the-art models in terms of segmentation accuracy and other evaluation metrics. Among them, the proposed model has a very large improvement in the ResU-Net++ [4] of SOTA, with improvements in recall and precision of 28.01 and 6.15 % respectively. Expect higher recall rates in clinical testing.

Table 2. Comparison of experimental results on Kvasir-SEG dataset

Dataset	Method	F1	mIoU	Recall	Precision
Kvasir-SEG	U-Net [2]	0.5969	0.4713	0.6171	0.6722
	ResU-Net++ [4]	0.6902	0.5721	0.7248	0.7454
	FCN [6]	0.8310	0.7365	0.8346	0.8817
	DoubleU-Net [14]	0.8129	0.7332	0.8402	0.8611
	U-Net++ [3]	0.8002	0.7000	0.8716	0.7992
	Attention U-Net [13]	0.7944	0.6959	0.8383	0.8287
	FANet [10]	0.8803	0.8153	0.9058	0.9005
	Authors	0.8896	0.8303	0.9035	0.9157

Table 3. Comparison of experimental results on CVC-ClinicDB dataset

Dataset	Method	F1	mIoU	Recall	Precision
CVC-ClinicDB	U-Net [2]	0.8230	0.7550	0.6472	0.7881
	ResU-Net++ [4]	0.7955	0.4545	0.6683	0.8877
	U-Net++ [3]	0.9377	0.8890	0.9405	0.9432
	Attention U-Net [13]	0.9325	0.8856	0.9276	0.9546
	Authors	0.9466	0.9008	0.9484	0.9492

3. Results on 2018 Data Science Bowl: the 2018 Data Science Bowl is a renowned competition that focuses on the challenging task of polyp segmentation. The proposed network was built to participate in the competition and trained proposed network using the provided dataset. The results obtained from the proposed model were compared against other top-performing models in the challenge.

As depicted in Tab. 4, the proposed approach showcased remarkable performance on the 2018 Data Science Bowl dataset, achieving high segmentation accuracy and demonstrating its capability to accurately detect and segment polyps. The proposed model's performance outperformed several strong competitors and showcased its potential for real-world application in polyp segmentation tasks [11].

Table 4. Comparison of experimental results on 2018 Data Science Bowl dataset

Dataset	Method	F1	mIoU	Recall	Precision
2018 Data Science Bowl	U-Net [2]	0.7573	0.9103	0.6059	0.9015
	DoubleU-Net [14]	0.7683	0.8407	0.6407	0.9596
	U-Net++ [3]	0.9117	0.8477	0.9203	0.9107
	Attention U-Net [13]	0.9179	0.8570	0.9183	0.9235
	Authors	0.9243	0.8642	0.9395	0.9860

Experimental details and visualization

The training and testing for FE-Net were conducted on Python version 3.9 with PyTorch 1.13.1 backend. The PyTorch library provides training and testing functions for the given datasets. The proposed method has been implemented in the code by creating a new FAM. The FAM divides the input into two branches, where the first branch extracts basic image features using three continuous convolutional layers (kernel size and padding size equal to 3 and 1 respectively), batch normalization, and ReLU activation. Additionally, the SE module is utilized after the convolutional layers to enhance sensitivity to important features through channel re-weighting. This is achieved by compressing the feature map, applying an average pooling layer and a two-layer feed-forward network to obtain weights, and scaling each channel accordingly. Here, the compression ratio is 16. The input to the second branch undergoes 1×1 convolution (kernel size is 1 without padding) and batch normalization. Finally, the outputs of both branches are concatenated and passed through the ReLU activation function.

To achieve the best performance results, certain parameters need to be set for the neural network. The “train” function accepts the following parameters: images, labels, number of classes, epochs, and optimizer. The neural network adjusts its weights based on the results obtained after each iteration using different algorithms known as optimizers, which involve calculations on the difference between the results. In this implementation, the network utilizes stochastic gradient descent as the optimizer due to its simplicity in calculating the gradient of the network loss function. The initial learning rate value for all datasets was set to “1e-4”. The learning rate decreases gradually during training. To ensure accurate timing during the training process, the model was warmed up before actual training [15]. The training batch size was set to 16, and the maximum epoch was set to 500.

Fig. 2, *b* below shows the variations in training loss on three different datasets. It can be observed that the model reaches convergence around the 300th epoch. Once the training of the model was completed, the model parameters were saved in *.pth format for future use in predicting new images. Fig. 2, *a* displays the predicted segmentation masks of the model on different datasets. It is evident that the proposed model performs well in terms of segmentation accuracy and detail retention.

Conclusion

1. The research aims are to improve the processing of segmentation details and boundaries in biomedical segmentation without compromising high accuracy. Thus, a novel encoder-decoder based model has been proposed for biomedical image segmentation. The model is comprised of the skip connection strategy and the feature aware module. The skip connections algorithm incorporating into Feature Enhancement Networks allows the reuse of features from the encoder and decoder layers. Thus the network to integrate both low-level and high-level information efficiently and improve the accuracy and precision of the generated masks. The feature aware module incorporates the idea of residual blocks by adding shortcut links between layers to facilitate feature learning. At the same time, the Squeeze and Excite module is embedded to increase the sensitivity of the module to important features and suppress unimportant features by reweighting each channel according to its importance.

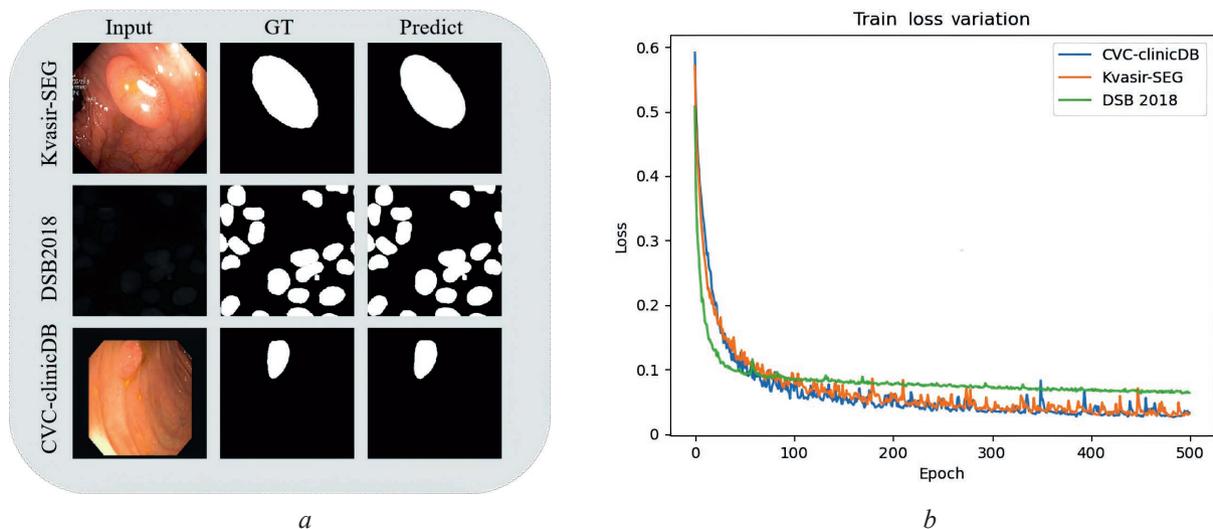


Fig. 2. Visualization and training loss variations:
a – comparison of the original image, ground truth mask and predicted mask of the proposed FE-Net networks on the Kvasir-SEG, 2018 DSB, and DRIVE datasets;
b – training loss variations during 500 epochs

2. The proposed algorithm has been tested on three samples. The following parameters have been used to evaluate segmentation performance and generalization ability: Dice coefficient, recall, and Mean intersection over Union. The proposed algorithm is effective for data processing by object segmentation methods on the proposed medical image segmentation datasets.

3. The study showed the need to optimize the neural network structure. The next step is to improve performance and output speed for more medical image segmentation tasks. The research was carried out jointly with the magnetic resonance imaging department of the N. N. Alexandrov National Cancer Centre.

References

1. Litjens G., Kooi T., Bejnordi B. E., Adiyoso Setio A. A., Ciompi F., Ghafoorian M., et al. (2017) A Survey on Deep Learning in Medical Image Analysis. *Medical Image Analysis*. 60–88.
2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. (2015) U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015, 18th International Conference*. 234–241.
3. Zhou Z., Rahman Siddiquee M. M., Tajbakhsh N., Liang J. (2018) Unet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation. In *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support, 4th International Workshop DLMIA 2018, and 8th International Workshop ML-CDS 2018*. 3–11.
4. Jha D., Smedsrud P. H., Riegler M. A., Johansen D. (2019) Resunet++: An Advanced Architecture for Medical Image Segmentation. In *2019 IEEE International Symposium on Multimedia*. 225–255.
5. Long J., Shelhamer E., Darrell T. (2015) Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 3431–3440.
6. Seo H., Huang C., Bassenne M., Xiao R., Xing L. (2019) Modified U-Net (mU-Net) with Incorporation of Object-Dependent High Level Features for Improved Liver and Liver-Tumor Segmentation in CT Images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 39 (5), 1316–1325.
7. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. (2016) Deep Residual Learning for Image Recognition. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 770–778.
8. Hu J., Shen L., Sun G. (2018) Squeeze-and-Excitation Networks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 7132–7141.
9. Zhang Z., Liu Q., Wang Y. (2018) Road Extraction by Deep Residual U-Net. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 15 (5), 749–753.
10. Tomar N. K., Jha D., Riegler M. A., Johansen H. D., Johansen D., Rittscher J., et al. (2022) Fanet: A Feedback Attention Network for Improved Biomedical Image Segmentation. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*.

11. Yang C., Guo X., Zhu M., Ibragimov B., Yuan Y. (2021) Mutual-Prototype Adaptation for Cross-Domain Polyp Segmentation. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 25 (10), 3886–3897. DOI: 10.1109/JBHI.2021.3077271.
12. Chlap P., Min H., Vandenberg N., Dowling J., Holloway L., Haworth A. (2021) A Review of Medical Image Data Augmentation Techniques for Deep Learning Applications. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*. 65 (5), 545–563. DOI: 10.1111/1754-9485.13261.
13. Oktay O., Schlemper J., Folgoc L. L., Lee M., Heinrich M., Misawa K., et al. (2018) Attention U-Net: Learning Where to Look for the Pancreas. *1st Conference on Medical Imaging with Deep Learning (MIDL 2018), Amsterdam, the Netherlands*.
14. Jha D., Riegler M. A., Johansen D., Halvorsen P., Johansen H. D. (2020) Doubleu-Net: A Deep Convolutional Neural Network for Medical Image Segmentation. In *2020 IEEE 33rd International Symposium on Computer-Based Medical Systems*. 558–564.
15. Iqbal A., Sharif M., Khan M. A., Nisar W., Alhaisoni M. (2022) FF-UNet: A U-Shaped Deep Convolutional Neural Network for Multimodal Biomedical Image Segmentation. *Cognitive Computation*. 14 (4), 1287–1302.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Information about the authors

Di Zhao, Postgraduate at the Department of Information Technologies in Automated Systems, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Yi Tang, Master's Student at the Department of Information Technologies in Automated Systems, BSUIR

Gourinovitch A. B., Assistant Professor at the Department of Information Technologies in Automated Systems, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Brovki St., 6
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 622-69-34
E-mail: gurinovich@bsuir.by
Gourinovitch Alevtina Borisovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-93-100>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.934.2+534.784

МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИЙ В РЕЧЕВОМ СИГНАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИНЫ ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ И НАДСЕГМЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Д. В. КРАСНОПРОШИН, М. И. ВАШКЕВИЧ

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

Поступила в редакцию 19.12.2023

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

Аннотация. Исследована задача распознавания эмоций в речевом сигнале с использованием мел-частотных кепстральных коэффициентов при помощи классификатора на основе метода опорных векторов. При проведении экспериментов применялся набор данных RAVDESS. Предложена модель, которая использует 306-компонентный вектор надсегментных признаков в качестве входных данных для классификатора на основе метода опорных векторов. Оценка качества модели проводилась с помощью невзвешенного среднего значения полноты (UAR). Рассмотрено применение в классификаторе на основе метода опорных векторов в качестве ядра линейной, полиномиальной и радиальной базисной функций. Исследовано использование разных размеров фрейма анализа сигнала (от 23 до 341 мс) на этапе извлечения мел-частотных кепстральных коэффициентов. Результаты исследований выявили значительную точность полученной модели (UAR = 48 %). Предлагаемый подход демонстрирует потенциал для таких приложений, как голосовые помощники, виртуальные агенты и диагностика психического здоровья.

Ключевые слова: голосовой сигнал, мел-частотные кепстральные коэффициенты, извлечение аудиопризнаков, распознавание, машинное обучение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Краснопрошин, Д. В. Метод распознавания эмоций в речевом сигнале с использованием машины опорных векторов и надсегментных акустических признаков / Д. В. Краснопрошин, М. И. Вашкевич // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 93–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-93-100>.

SPEECH EMOTION RECOGNITION METHOD BASED ON SUPPORT VECTOR MACHINE AND SUPRASEGMENTAL ACOUSTIC FEATURES

DANIIL V. KRASNOPROSHIN, MAXIM I. VASHKEVICH

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

Submitted 19.12.2023

Abstract. The problem of recognizing emotions in a speech signal using mel-frequency cepstral coefficients using a classifier based on the support vector machine has been studied. The RAVDESS data set was used in the experiments. A model is proposed that uses a 306-component suprasegmental feature vector as input to a support vector machine classifier. Model quality was assessed using unweighted average recall (UAR). The use of linear, polynomial and radial basis functions as a kernel in a classifier based on the support vector machine is considered. The use of different signal analysis frame sizes (from 23 to 341 ms) at the stage of extracting mel-frequency cepstral coefficients was investigated. The research results revealed significant accuracy of the resulting mo-

del (UAR = 48 %). The proposed approach shows potential for applications such as voice assistants, virtual agents, and mental health diagnostics.

Keywords: voice signal, mel-frequency cepstral coefficients, audio feature extraction, recognition, machine learning.

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

For citation. Krasnoproshin D. V., Vashkevich M. I. (2024) Speech Emotion Recognition Method Based on Support Vector Machine and Suprasegmental Acoustic Features. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 93–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-93-100> (in Russian).

Введение

Область распознавания эмоций по речи быстро развивается благодаря росту производительности вычислительных систем и широкому интересу к этому вопросу исследователей в сфере психологии, психиатрии и информатики [1, 2]. Эмоции часто влияют на процессы принятия решений, поэтому их распознавание может представлять интерес для построения более эффективного общения, включая диалоговые системы (голосовые помощники, чат-боты). Задача распознавания негативных эмоций, таких как стресс, гнев, усталость, является важным аспектом с точки зрения обеспечения безопасности дорожного движения при использовании интеллектуальных транспортных средств, поскольку позволяет им реагировать на эмоциональное состояние водителя [3]. В сфере взаимодействия человека и компьютера точное распознавание эмоций по речи является ключевым фактором. В статье рассматривается задача определения эмоций на основе анализа речевого сигнала. Одна из основных проблем данного подхода связана с определением набора признаков, эффективно описывающих эмоциональное состояние человека [1, 4–6].

При построении системы распознавания эмоций предлагается использовать мел-частотные кепстральные коэффициенты (МЧКК) [7] для получения признаков и метод опорных векторов (МОВ) [7] в качестве классификатора. Признаки на основе МЧКК широко применяются в системах распознавания эмоций по речи [1, 5]. МЧКК воспроизводят реакцию слуховой системы человека на звук, улавливая соответствующую акустическую информацию [8]. Формируя представление аудиосигнала в частотной области, МЧКК уменьшают размерность данных, сохраняя при этом важные особенности, что делает их пригодными для алгоритмов машинного обучения, таких как МОВ. В свою очередь, МОВ является простым и надежным подходом к задаче классификации, который обеспечивает адаптируемость к многомерным пространствам признаков. МОВ основан на принципе поиска оптимальной гиперплоскости, максимально разделяющей разные классы в пространстве признаков [9]. В контексте распознавания эмоций по речи это означает, что МОВ может эффективно дифференцировать эмоциональные состояния [5], а также учитывать нелинейные отношения с помощью функций ядра (kernel function), что позволяет улавливать сложные закономерности в речевых данных.

Извлечение речевых признаков

На начальном этапе в системе распознавания эмоций по речи выполняется предварительная обработка входных аудиоданных [1, 5]. Речевые признаки рассчитываются на основании МЧКК [8]. Расчет МЧКК относится к методам кратковременного анализа речевого сигнала, которые предполагают разбиение сигнала на фреймы (короткие сегменты). Считается, что в интервале от 10 до 30 мс голосовой сигнал можно считать стационарным. На рис. 1 представлена схема вычисления МЧКК.

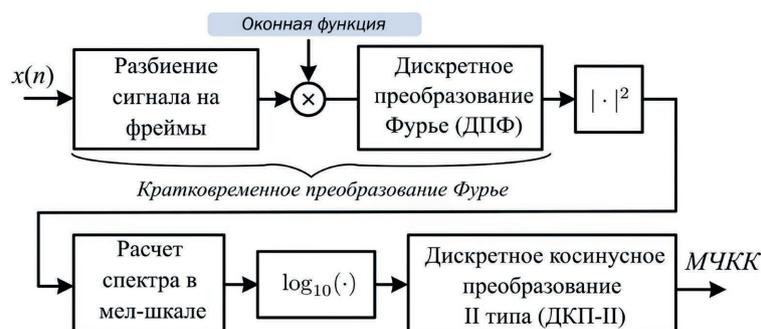


Рис. 1. Схема вычисления мел-частотных кепстральных коэффициентов
Fig. 1. Scheme for calculating mel-frequency cepstral coefficients

Согласно рис. 1, процесс извлечения МЧКК включает следующие шаги:

- 1) вычисление кратковременного преобразования Фурье (КВПФ) и нахождение квадрата модуля КВПФ для получения спектрограммы сигнала;
- 2) вычисление мел-спектрограммы (энергия сигнала из шкалы герц переводится в мел-шкалу, отражающую свойства человеческого слуха);
- 3) взятие логарифма от энергии сигнала в мел-частотных полосах;
- 4) применение декоррелирующего преобразования, в качестве которого используется дискретное косинусное преобразование II типа (ДКП-II).

В качестве иллюстрации на рис. 2 показан пример речевого сигнала, выражающего эмоцию гнева.

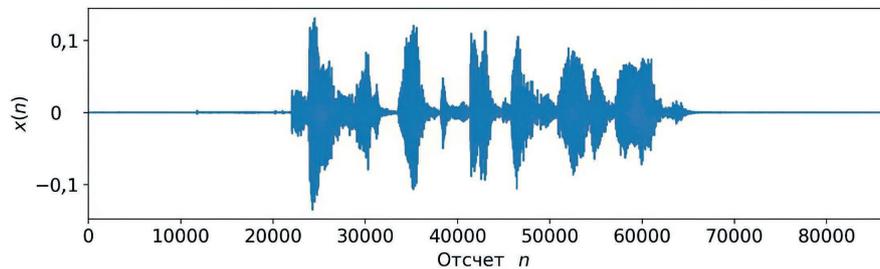


Рис. 2. Представление речевого сигнала, выражающего гнев
Fig. 2. Representation of the speech signal expressing anger

На рис. 3 показан результат вычисления КВПФ и мел-спектрограммы сигнала, представленного на рис. 1. На рис. 4 изображена временная последовательность МЧКК, рассчитанная для сигнала на рис. 1.

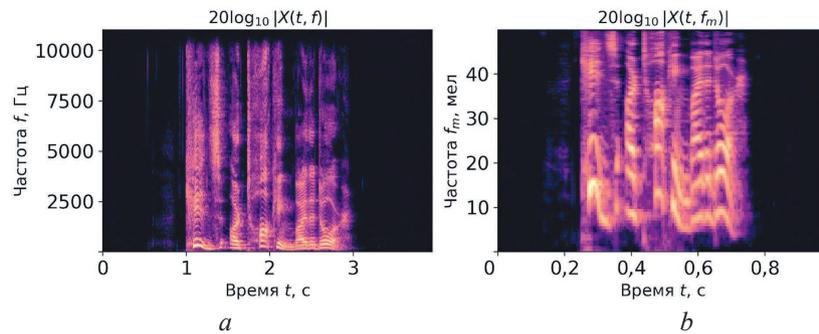


Рис. 3. Речевой сигнал, выражающий гнев: *a* – спектрограмма кратковременного преобразования Фурье; *b* – мел-спектрограмма

Fig. 3. Speech signal expressing anger: *a* – short time Fourier transform spectrogram; *b* – mel-spectrogram

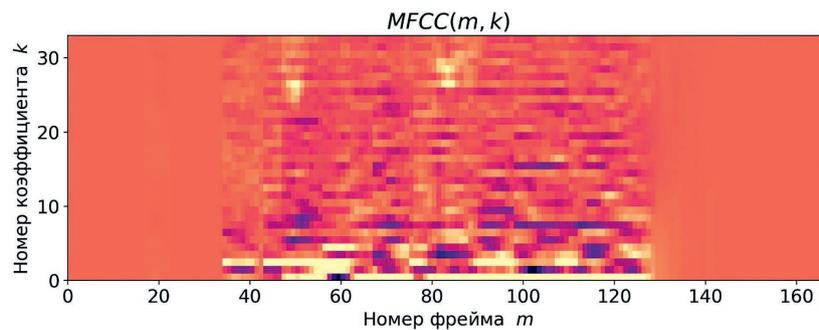


Рис. 4. Временная последовательность мел-частотных кепстральных коэффициентов
Fig. 4. Time-sequence of mel-frequency cepstral coefficients

В экспериментах использовались речевые сигналы с частотой дискретизации 48 кГц. Для обработки аудиосигналов применялась библиотека librosa, написанная на языке Python. КВПФ рассчитывалось для различных размеров фреймов $N = \{1024, 2048, 4096, 8192\}$. Перекрытие между фреймами принималось равным 50 % от размера фрейма. Из каждого фрейма извлекался век-

тор МЧКК размером D . После обработки одного аудиофайла получается матрица $MFCC(k, m)$ размером $D \times N_{frames}$, где N_{frames} – количество фреймов. Таким образом, m -й столбец матрицы представляет собой вектор МЧКК, вычисленный для временного фрейма с номером m .

Для получения единого вектора признаков для каждого аудиофайла вычисляются средние $meanMFCC(k)$ (D признаков) и среднеквадратичные (СКО) отклонения, $SDMFCC(k)$ (D признаков) для МЧКК в матрице $MFCC$ вдоль оси времени. СКО может быть полезно для оценки степени изменчивости в МЧКК во времени. По матрице МЧКК также производилось извлечение первой и второй производных (первой и второй разностей).

Первая производная МЧКК (Δ -МЧКК) представляет собой скорость изменения каждого коэффициента во времени. Таким образом, Δ -МЧКК отражает быстроту изменения спектральных характеристик звука во времени, помогает в выявлении моментов, когда звук становится более высокочастотным или громким, что может быть полезным для распознавания звуковых событий. Вторая производная МЧКК (Δ^2 -МЧКК) представляет собой ускорение изменения каждого коэффициента во времени. Принятие во внимание Δ^2 -МЧКК позволяет более полно описать характер спектральных изменений речевого сигнала во времени.

Известно, что применение производных МЧКК дает возможность улучшить производительность систем распознавания, классификации и детектирования речевых сигналов [1, 5, 10]. Они могут использоваться для выделения важных характеристик аудиосигнала, таких как изменения в тональности, интонации и ритме речи. Это делает их полезными в приложениях по распознаванию речи, детектированию звуковых событий и музыкальному анализу.

Для полученных матриц Δ -МЧКК и Δ^2 -МЧКК рассчитывали их средние значения и СКО, что в итоге дало $4D = 136$ дополнительных признаков. На основании матрицы МЧКК также были рассчитаны коэффициент асимметрии (skewness), эксцесс (kurtosis) и межквартильный размах (Interquartile Range, IQR). Коэффициент асимметрии – это мера степени асимметрии распределения случайной величины. Она показывает, насколько сильно и в какую сторону смещено распределение относительно своего среднего значения. В контексте анализа МЧКК коэффициент асимметрии может дать информацию о форме распределения и подчеркнуть определенные аспекты вариативности звукового сигнала. Коэффициент асимметрии вычислялся для каждого МЧКК

$$SkMFCC(k) = \left(\frac{1}{N_{frames}} \right) \sum_{m=0}^{N_{frames}} \frac{(MFCC(k, m) - meanMFCC(k))^3}{SDMFCC(k)^3}. \quad (1)$$

Эксцесс – мера формы распределения случайной величины, которая показывает, насколько оно остроконечное или плоское по сравнению с нормальным распределением. Для вычисления эксцесса использовали формулу моментов

$$kurtosisMFCC(k) = \left(\frac{1}{N_{frames}} \right) \sum_{m=0}^{N_{frames}} \frac{(MFCC(k, m) - meanMFCC(k))^4}{SDMFCC(k)^4 - 4}. \quad (2)$$

Межквартильный размах – это мера разброса данных, которая используется для измерения разницы между верхним и нижним квартилями. Она показывает разброс значений в данных. При вычислении IQR выполняются шаги:

- 1) упорядочиваются данные по возрастанию;
- 2) находится значение первого квартиля (Q_1), которое отделяет нижние 25 % наблюдений;
- 3) находится значение третьего квартиля (Q_3), которое отделяет нижние 75 %;
- 4) вычисляется IQR как разница между значениями Q_3 и Q_1

$$IQR = Q_3 - Q_1. \quad (3)$$

В контексте решаемой задачи IQR может быть полезен для измерения разброса в параметрах МЧКК. Результирующая схема формирования вектора признаков приведена на рис. 5. В итоговый набор признаков были включены среднее значение МЧКК (D признаков), среднеквадратичное отклонение МЧКК (D признаков), среднее от первой и второй производных от МЧКК ($2D$ признаков), их среднеквадратическое отклонение ($2D$), а также коэффициент асимметрии,

эксцесс и межквантильный размах (по D признаков для каждой характеристики соответственно). Таким образом, для каждого аудиофайла получается $9D$ -компонентный вектор надсегментных признаков МЧКК.

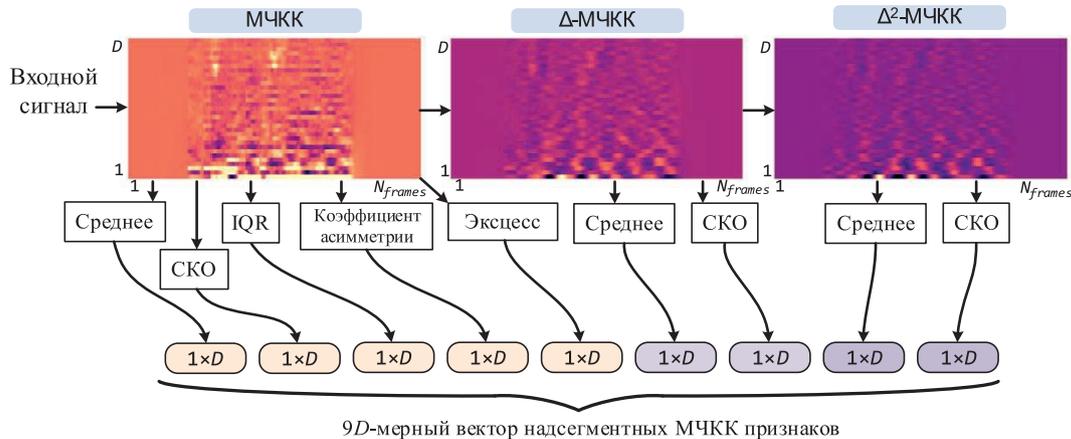


Рис. 5. Схема формирования вектора признаков
Fig. 5. The scheme of feature vector extraction

Речевая база и описание эксперимента

При проведении исследования применяли набор данных Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS) [11]. RAVDESS содержит записи 24 актеров (12 мужчин, 12 женщин). Каждый актер произнес 104 различных сообщения (60 речевых высказываний и 44 песенных). В экспериментах использовалась только часть базы RAVDESS, содержащая речевые высказывания – 1440 файлов в формате wav (16 бит, 48 кГц): 60 записей на каждого из 24-х актеров. Речевые эмоции включали нейтральность, спокойствие, счастье, грусть, гнев, страх, удивление и отвращение. Все эмоциональные состояния, кроме нейтрального, озвучивались на двух уровнях эмоциональной громкости (нормальном и повышенном). Актеры повторяли каждую вокализацию дважды.

Для классификации в системе распознавания эмоционального состояния по речи применяется МОВ. Данный метод выполняет классификацию путем построения разделяющей гиперплоскости, которая оптимально разделяет данные на классы. В МОВ предусмотрено использование функции ядра для преобразования исходного набора данных в многомерное пространство признаков. И уже в новом пространстве признаков выполняется построение оптимальной разделяющей гиперплоскости. В исследовании использовались известные ядерные функции: линейная, полиномиальная и гауссово ядро с радиальной базисной функцией (РБФ) [9].

Построение классификатора на опорных векторах с применением перечисленных выше ядер осуществлялось с помощью библиотеки sklearn языка Python. Для тестирования классификатора использовался метод перекрестной проверки по k блокам (k -fold cross-validation) [9], который заключается в следующем.

1. Набор разбивается на k блоков.
2. В цикле для $i = 1, 2, \dots, k$ выполняются следующие операции:
 - блок i устанавливается в качестве тестового набора данных (test data);
 - оставшиеся блоки принимаются как тренировочные данные (train data);
 - выполняется обучение модели классификатора на тренировочных и оценивается ее эффективность на тестовых данных;
 - сохранение результатов классификации для данных из тестового набора;
 - сброс параметров модели до исходного состояния для следующей итерации.
3. Расчет оценки эффективности модели на основе сохраненных результатов классификации тестовых данных.

Полученные данные, согласно схеме, предложенной в [12], разбивали на блоки следующим образом (в скобках указаны номера актеров):

- блок 0: (2, 5, 14, 15, 16);

- блок 1: (3, 6, 7, 13, 18);
- блок 2: (10, 11, 12, 19, 20);
- блок 3: (8, 17, 21, 23, 24);
- блок 4: (1, 4, 9, 22).

Выбранная стратегия заключается в том, что каждый блок должен содержать одинаковое количество случайно выбранных образцов для каждого класса. При этом должно выполняться условие, что каждый актер представлен либо в обучающей, либо в валидационной выборке, но не в обеих. Для оценки качества модели вычисляли среднее арифметическое (невзвешенное) полноты (unweighted average recall, UAR). UAR – это показатель, используемый для измерения общей производительности модели многоклассовой классификации, вычисляет средний уровень запоминания по всем классам, придавая каждому классу одинаковую важность без учета классового дисбаланса:

$$UAR = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{A_{ii}}{\sum_{j=1}^{N_c} A_{ij}}, \quad (4)$$

где A – матрица спутанности (confusion matrix); N_c – количество классов.

Значение UAR находится в диапазоне от 0 до 1. Эксперимент проводился в три этапа:

- 1) подготовка обучающей выборки;
- 2) обучение и тестирование классификатора с использованием различных функций ядра и разных размеров длины фрейма анализа речевых сигналов;
- 3) оценка модели с использованием метрики UAR.

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе проводили эксперименты по подбору числа D извлекаемых МЧКК. Выбирался размер фрейма, равный 1024 отчета (~23 мс), классификатор на основе МОВ с линейным ядром и определялось оптимальное число D МЧКК из множества {30,32,34,36,38,40,42,44}. Наилучший результат классификации был получен при $D = 34$. Это значение затем использовали в дальнейших исследованиях.

На втором этапе выполнялись эксперименты с классификатором на основе МОВ и различными ядерными функциями. Известно, что функция полиномиального ядра имеет параметр deg (степень полинома), а радиальная базисная функция – параметр γ . Также классификатор на основе МОВ имеет параметр C , который представляет собой «бюджет» некоторой величины, отражающий степень нарушения зазора решающей границы [9]. Подобные нарушения происходят, поскольку данные в признаковом пространстве не могут быть разделены идеально. Таким образом, параметры deg , γ и C являются гиперпараметрами классификатора на основе МОВ. Для выбора оптимальных значений гиперпараметров использовалась техника поиска по сетке (grid search): для deg – сетку значений от 1 до 8 с шагом 1; для C – сетку из 12 значений от 0,1 до 100,0, расположенных эквидистантно в логарифмическом масштабе; для γ формировалась сетка из 10 значений в диапазоне от $10^{-3,5}$ до $10^{-1,5}$, расположенных эквидистантно в логарифмическом масштабе. Поиск оптимальных значений параметров, позволяющих получить наибольшее значение UAR, выполнялся для векторов признаков, полученных при различных значениях размера фрейма анализа. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результирующий UAR для классификатора на основе метода опорных векторов с различными ядрами
Table 1. Resulting UAR for a support vector machine classifier with different kernels

Размер фрейма / Frame size	Линейное ядро / Linear kernel	Полиномиальное ядро / Polynomial kernel	Радиальная базисная функция ядра / Radial basis kernel function
1024	0,458 ($C = 0,01$)	0,457 ($C = 0,01, \gamma = 1, deg = 1$)	0,469 ($C = 8,11, \gamma = 0,0008$)
2048	0,451 ($C = 0,10$)	0,450 ($C = 0,01, \gamma = 1, deg = 1$)	0,471 ($C = 8,11, \gamma = 0,0008$)
4096	0,454 ($C = 0,01$)	0,455 ($C = 0,05, \gamma = 0,1, deg = 1$)	0,476 ($C = 2,31, \gamma = 0,0014$)
8192	0,469 ($C = 0,01$)	0,474 ($C = 0,05, \gamma = 0,1, deg = 1$)	0,482 ($C = 28,48, \gamma = 0,0014$)

Наилучшее значение $UAR = 48,2\%$ достигается при использовании классификатора с ядрами РБФ и МЧКК, рассчитанными на фрейме размером 8192. Поверхность UAR , рассчитанная в ходе поиска по сетке для этой модели, представлена на рис. 6, а. Из рисунка видно, что большое значение параметра C приводит к более гибкому классификатору с высокой производительностью. При увеличении размера фрейма анализа до 16 384 показатель UAR резко падал до значения 0,13. На рис. 6, б представлена матрица спутывания для лучшей модели.

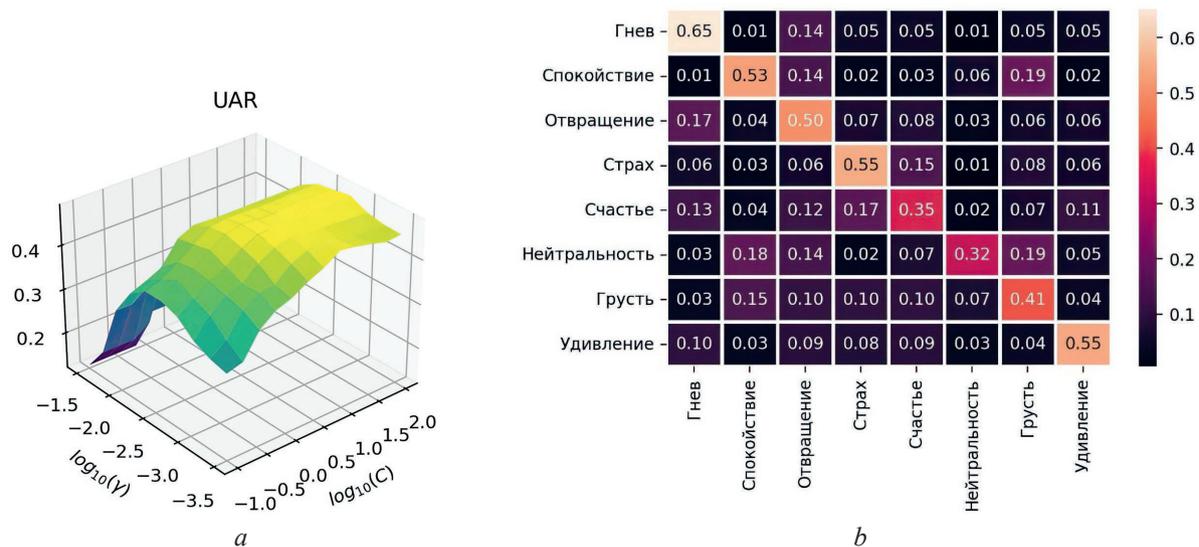


Рис. 6. Результаты экспериментов: а – поверхность UAR; б – матрица спутывания
Fig. 6. Experimental results: a – UAR surface; b – confusion matrix

Анализ матрицы спутывания позволяет выявить важные закономерности в распознавании эмоций. Можно заметить, что наиболее часто неправильно классифицированными эмоциями являются нейтральность (32 %) и счастье (35 %). Примечательно, что нейтральность часто путается с грустью и спокойствием, что позволяет предположить некоторое сходство их акустических характеристик. И наоборот, гнев имеет высокую точность распознавания (65 %) и редко ошибочно классифицировался как другая эмоция, что указывает на отличительные особенности его акустического профиля. Эти результаты проливают свет на проблемы, с которыми сталкивается классификатор при различении тонких эмоциональных нюансов, и подчеркивают важность разработки функций и совершенствования моделей для улучшения эффективности распознавания эмоций.

Результаты исследований показывают, что выбор ядра оказывает существенное влияние на точность классификации. Классификатор с РБФ продемонстрировал высокую производительность в отношении множества эмоций, в то время как использование линейного ядра позволяет хорошо различать лишь отдельные эмоциональные состояния.

Размер фрейма, используемый для извлечения МЧКК, играет существенную роль в общей точности системы: более короткие фреймы обеспечивают более мелкие временные детали, а более длинные собирают более широкую контекстную информацию, что позволяет лучше распознавать эмоции. Полученные результаты подчеркивают важность точной настройки ядра классификатора и подбора размера фрейма при разработке систем распознавания эмоций по речи. Точность (UAR) полученной модели, использующей 306-компонентный вектор признаков, составляет 48,2 %, что больше, чем у модели на основе МОВ [12], использующей в качестве вектора признаков 2048-компонентный вектор, полученный от внутреннего слоя нейронной сети AlexNet (UAR = 45,8 %). Следует также отметить, что человек справляется с задачей распознавания эмоций по речи с точностью 67 % [12].

Заключение

Рассмотрен подход к задаче распознавания эмоций по речи, основанный на классификаторе на базе метода опорных векторов и использующий надсегментные мел-частотные кепстральные коэффициенты. Наилучшие результаты (UAR = 48,2 %) получены в случае применения клас-

сификатора с радиальной базисной функцией ядра и признаками мел-частотных кепстральных коэффициентов, рассчитанными на фрейме длительностью 170 мс.

Список литературы / References

1. Issa D., Demirci F. M., Yazici A. (2020) Speech Emotion Recognition with Deep Convolutional Neural Networks. *Biomedical Signal Processing and Control*. 59.
2. Luna-Jiménez C., Griol D., Callejas Z., Kleinlein R., Montero J. M., Fernández-Martínez F. (2021) Multimodal Emotion Recognition on RAVDESS Dataset Using Transfer Learning. *Sensors*. 21 (22), 1–29.
3. Xiao H., Li W., Zeng G., Wu Y., Xue J., Zhang J., [et al.] (2022) On-Road Driver Emotion Recognition Using Facial Expression. *Appl. Sci*. 12.
4. Sadok S., Leglaive S., Séguier R. (2023) A Vector Quantized Masked Autoencoder for Speech Emotion Recognition. *arXiv preprint arXiv*. 2304.
5. Bhavan A., Chauhan P., Shah R. R. (2019) Bagged Support Vector Machines for Emotion Recognition from Speech. *Knowledge-Based Systems*. 184, 1–7.
6. Baruah M., Banerjee B. (2022) Speech Emotion Recognition via Generation Using an Attention-Based Variational Recurrent Neural Network. *Proc. Interspeech*. 4710–4714.
7. Yu C., Tian Q., Cheng F., Zhang S. (2011) Speech Emotion Recognition Using Support Vector Machines. *Advanced Research on Computer Science and Information Engineering. Communications in Computer and Information Science*. 152.
8. Huang X., Acero A., Hon H.-W., Foreword By-Reddy R. (2001) Spoken Language Processing: A Guide to Theory, Algorithm, and System Development. *Prentice Hall PTR*.
9. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. H., Friedman J. H. (2009) The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. *Springer*.
10. On C. K., Pandiyan P. M., Yaacob S., Saudi A. (2006) Mel-Frequency Cepstral Coefficient Analysis in Speech Recognition. *In 2006 International Conference on Computing & Informatics*. 1–5.
11. Livingstone S. R., Russo F. A. (2018) The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS): A Dynamic, Multimodal Set of Facial and Vocal Expressions in North American English. *PLoS One*. 13 (5).
12. Luna-Jiménez C., Griol D., Callejas Z., Kleinlein R., Montero J. M., Fernández-Martínez F. (2021) Multimodal Emotion Recognition on RAVDESS Dataset Using Transfer Learning. *Sensors*. 21.

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Краснопрошин Д. В., магистрант каф. электронных вычислительных средств, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Вашкевич М. И., д-р техн. наук, проф. каф. электронных вычислительных средств, 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 17 293-84-78
E-mail: vashkevich@bsuir.by
Вашкевич Максим Иосифович

Information about the authors

Krasnoproshin D. V., Master's Student at the Department of Electronic Computing Facilities, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Vashkevich M. I., Dr. of Sci. (Tech.), Professor at the Department of Electronic Computing Facilities, 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 17 293-84-78
E-mail: vashkevich@bsuir.by
Vashkevich Maxim Iosifovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-101-105>

Оригинальная статья
Original paper

Краткое сообщение

УДК 621.385.6

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ И ПОСТОЯННАЯ ЗАТУХАНИЯ ЭНЕРГИИ ФОТОНА В ВАКУУМЕ

А. А. КУРАЕВ, В. В. МАТВЕЕНКО

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

Поступила в редакцию 30.08.2023

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

Аннотация. На основе квантовых представлений о структуре вакуума и данных о красном смещении спектров излучателя удаленных галактик получена оценка минимального значения постоянной затухания энергии фотона в вакууме α : $\alpha = 8 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-1}$. Предположено, что космическое микроволновое излучение частично является тепловым излучением вакуума, нагретого фотонными потоками бесконечной вселенной. Несмотря на бесконечность вселенной, небо темное именно из-за поглощения энергии фотонов далеких и сверхдалеких галактик в вакууме, а не только из-за поглощения самих фотонов при различных взаимодействиях с компонентами газовых и пылевых межгалактических скоплений. Тем самым спектр излучения сверхдалеких объектов трансформируется в микроволновой диапазон, что дополняет интенсивность теплового излучения в нем. Показана несостоятельность альтернативных объяснений красного смещения: доплеровского эффекта в космологической модели расширяющейся вселенной и Большого взрыва, гравитационного смещения.

Ключевые слова: красное смещение, фотон, вакуум, микроволновое излучение, постоянная затухания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кураев, А. А. Красное смещение и постоянная затухания энергии фотона в вакууме / А. А. Кураев, В. В. Матвеев // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 101–105. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-101-105>.

REDSHIFT AND PHOTON ENERGY ATTENUATION CONSTANT IN VACUUM

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

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

Submitted 30.08.2023

Abstract. There obtained an estimate of the minimum value of the photon energy attenuation constant in vacuum α : $\alpha = 8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^{-1}$ based on quantum concepts of the structure of vacuum and data on the red shift of the emitter spectra of distant galaxies. Presumably, the cosmic microwave radiation is partly the thermal vacuum radiation heated by the photon fluxes from the infinite universe. Despite the universe infinity, the sky is dark precisely due to the photon's energy absorption from distant and ultra-distant galaxies in vacuum, and not only the photon absorption during various interactions with the gas or dust components of intergalactic clusters. Thus, the emission spectrum of these ultra-distant objects is transformed into the microwave range, which complements the intensity of thermal radiation in this range. The inconsistency of alternative explanations for the red shift is shown: the Doppler effect in the cosmological model of the expanding universe and the Big Bang, and the gravitational shift.

Keywords: redshift, photon, vacuum, microwave radiation, attenuation constant.

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

For citation. Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2024) Redshift and Photon Energy Attenuation Constant in Vacuum. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 101–105. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-101-105> (in Russian).

Красное смещение спектров излучения внегалактических объектов было обнаружено в 1914 г. при исследовании туманностей, которые оказались галактиками, подобными нашей, – галактике Млечный Путь. Систематическое исследование этого явления провел Е. Р. Хаббл [1] и установил закон зависимости красного смещения от расстояния до исследуемой галактики, названный его именем:

$$z = \frac{H_0 r}{c}, \quad (1)$$

где $z = \frac{v_0 - v}{v}$; v_0 – частота линии излучения (или поглощения) в спектре дальней галактики; v – частота той же линии спектра на Земле (оказалось, что для всех линий z одинакова); r – расстояние до исследуемой галактики; c – скорость света в вакууме.

Закон (1) выполняется, когда z мало, при больших z возникают поправки порядка высших степеней ($H_0 r c^{-1}$). Сразу после публикации в 1929 г. статьи [1] стали возникать различные гипотезы о сущности явления красного смещения, которые продолжают развиваться и конкурировать до наших дней. Обсудим существующие гипотезы.

1. Эффект Доплера. Общая теория относительности А. Эйнштейна (ОТО). Теория расширяющейся вселенной и Большого взрыва.

Эффект Доплера в случае перемещения источника излучения по отношению к приемнику со скоростью $\pm u$ выражается в сдвиге частоты [2]:

а) по волновой формуле

$$\frac{v_0}{v} = \left(1 \pm \frac{u}{c}\right)^{-1}; \quad (2)$$

б) по релятивистской формуле

$$\frac{v_0}{v} = \gamma^{-1} \left(1 \pm \frac{u}{c}\right)^{-1}, \quad \gamma = \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Таким образом, получаем

$$z = \gamma \left(1 \pm \frac{u}{c}\right) - 1. \quad (4)$$

Следовательно, красное смещение может быть объяснено эффектом Доплера ($+u$). Но возникает два спорных момента:

1) красное смещение зависит от r , т. е. галактики в слое $r = \text{const}$ должны с одинаковой скоростью удаляться от нас;

2) по той же формуле (4) с учетом (1) необходимо, чтобы скорости удаления галактик возрастали так, чтобы удовлетворять условию

$$\gamma \left(1 \pm \frac{u}{c}\right) - 1 = \frac{H_0 r}{c}. \quad (5)$$

В 1917 г. А. Эйнштейн ввел в правую часть уравнения ОТО космологическую поправку – $\Lambda g_{\mu\nu}$, где Λ – космологическая постоянная; $g_{\mu\nu}$ – метрический тензор в Римановом пространстве [3]. Благодаря этой поправке при определенных положительных значениях Λ и выборе $g_{\mu\nu}$ оказалось возможным получить решения, соответствующие расширяющейся однородной и изотропной вселенной. Это направление развивалось до последнего времени как теория Большого взрыва и расширяющейся вселенной [4]. Но еще в прошлом веке высказывались сомнения в космологической теории, основанной на ОТО [5, 6]. Указывалось на то, что получаемые решения неоднозначны из-за определенного произвола в выборе Λ и $g_{\mu\nu}$, а также из-за утраты фундаментальных законов сохранения [6]. К тому же в теории расширяющейся вселенной в связи с тем, что по условию [4] для дальних галактик $z \gg 1$ и растет нелинейно по r , пришлось ввести неизвестную нефизическую «темную энергию», создающую дополнительные к решению ОТО антигравитационные силы. Действительно у галактики GN-z11 $z = 11,1$, у галактики HD1 $z = 13,27$. Как следует из (4), у этих галактик $\gamma \gg 1$, т. е. это ультрарелятивистские создания, что представ-

ляется невозможным. Кроме того, последние открытия с помощью телескопа «Джеймс Уэбб» также опровергают теорию Большого взрыва ($z > 20$). Таким образом, рассматриваемая версия происхождения красного смещения представляется мало обоснованной.

2. Гравитационное красное смещение.

В соответствии с основными положениями квантовой физики энергия фотона $E = h\nu$, а масса $m = \frac{h\nu}{c^2}$, где $h = 6,626196 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка. Ньютоновский потенциал у однородной сферической звезды $\Phi = \frac{GM}{r}$, где $G = 6,672 \cdot 10^{-11}$ м³·кг⁻¹·с⁻² – гравитационная постоянная; M – масса звезды. Из закона сохранения энергии получаем [5]

$$z = \frac{GM}{r_0 c^2}, \quad (6)$$

где r_0 – внешний радиус фотосферы звезды.

Данный эффект действительно имеет место, но его величина относительно мала. Так, для Солнца $z = 2 \cdot 10^{-6}$. Кроме того, гравитационное z не зависит от r , как это наблюдается у красного смещения. Таким образом, этот эффект просто вносит поправку в наблюдаемое красное смещение.

3. Взаимодействие фотонов с вакуумом.

В отличие от ОТО А. Эйнштейна в электромагнитной теории Максвелла–Герца, в ОТО Лоренца–Минковского, в квантовой физике вакуум – не пустота, а материальная среда, обладающая набором всех присущих материи свойств. В теории Максвелла–Лоренца вакуум обладает диэлектрической $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (т. е. способен поляризоваться под действием электрического поля) и магнитной $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м проницаемостями (способен намагничиваться в магнитном поле). Причем скорость распространения электромагнитных волн (света) в вакууме $c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-0,5} = 2,99793 \cdot 10^8$ м/с.

В квантовой физике «по определению, вакуум есть состояние с наименьшей плотностью энергии» [7]. И там же: «Астрономия ... говорит о том, что плотность энергии вакуума заведомо меньше 10^{-28} Г/(см·с²)». В вакууме возникают виртуальные пары частиц-античастиц, существующие настолько малое время Δt , что свет не успевает распространиться от точки их возникновения, т. е. это точечное событие в пространстве Минковского. Действительно из соотношения неопределенности Гейзенберга $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ (ΔE – энергия виртуальной частицы; Δt – время ее существования; $\hbar = h/(2\pi)$; h – постоянная Планка) следует, что $\Delta t = \hbar/\Delta E$. Для γ -кванта $\Delta E = hf$ и, следовательно, $\Delta t = 1/(2\pi f) = 1/\omega$, где ω – угловая частота γ -кванта. Таким образом, для виртуального γ -кванта время жизни $\Delta t \sim 5 \cdot 10^{-20}$ с. Следовательно, взаимодействие с ним – точечное в четырехмерном пространстве событие. Это означает, что вакуум нельзя представлять, как субстанцию, имеющую некоторую скорость перемещения: во всех системах отсчета (ускоренных или инерциальных) вакуум – неподвижная среда. Поэтому в любых системах отсчета скорость распространения электромагнитных волн одна и та же – $c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-0,5}$. При действии на вакуум высокоэнергичных фотонов (γ -квантов) из него рождается пара электрон-позитрон. Известны статический и динамический квантовые эффекты Казимира. В первом обнаруживается внешнее давление вакуума на близко расположенные зеркальные металлические пластины, во втором – излучение фотонов при вибрации одной из пластин [8]. Эффект Казимира становится измеримым со значения расстояния между зеркалами $d = 40$ нм и возрастает пропорционально d^{-4} : $p = \frac{c\hbar\pi^2}{240d^4}$. При $d = 10$ нм

давление p достигает 1 атм. Зеркала образуют резонатор, осуществляющий частотную селекцию виртуальных фотонов, поэтому их число внутри резонатора меньше, чем снаружи.

Таким образом, взаимодействие фотонов со средой их распространения – вакуумом – очевидно. Происходят процессы поляризации и намагничивания вакуума в классическом понимании и квантовый обмен с точки зрения квантовой физики. При таких физически объективных процессах потери энергии фотона неизбежны [8]. А поскольку энергия фотона $E = h\nu$, красное смещение будет обусловлено потерей энергии фотона на пути распространения r . Такое объяснение не требует привлечения неизвестной «темной энергии» и теории Большого взрыва.

Расчет постоянной затухания энергии фотона в вакууме касается именно энергии фотона, а не светового потока, в котором часть фотонов поглощается при взаимодействии с материаль-

ными частицами межзвездного пространства. Считаем вакуум однородной и изотропной средой. Тогда уменьшение энергии фотона $E(r)$ можно представить в виде экспоненциального закона

$$\frac{E(r)}{E_0} = e^{-\alpha r}, \quad (7)$$

где E_0 – первоначальная энергия излученного фотосферой звезды фотона; α – постоянная затухания; $E(r) = h\nu$; $E_0 = h\nu_0$.

Тогда величина красного смещения z может быть представлена как

$$z = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu} = \frac{E_0 - E}{E} = \frac{E_0}{E} - 1 = e^{\alpha r} - 1. \quad (8)$$

Рассмотрим случай, когда справедлив линейный закон Хаббла: $z \ll 1$, $\alpha r \ll 1$. Тогда

$$z \approx 1 + \alpha r - 1 = \frac{H_0}{c} r, \text{ или } \alpha = \frac{H_0}{c}, \quad (9)$$

где $H_0 \cong 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$.

Подставляя в (9) значения H_0 и c , получаем $\alpha = 8 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-1}$. Это значение α следует считать минимальным, поскольку существуют другие причины снижения E фотона, например, указанное выше гравитационное красное смещение.

Остановимся на некоторых следствиях полученного результата.

1. В методе «стандартных свечей», используемом при определении расстояний до дальних галактик по яркости сверхновых типа 1А (считается, их светимость стандартна), следует учитывать α :

$$\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 e^{-\alpha(r-r_0)}, \quad (10)$$

где \mathcal{E} – наблюдаемая яркость исследуемой 1А; \mathcal{E}_0 – наблюдаемая яркость репера 1А; r – расстояние до наблюдаемой 1А; r_0 – расстояние до репера 1А.

2. Из-за потерь энергии фотона в вакууме он нагревается до наблюдаемых 2,7 К. Именно с этим связано микроволновое излучение, а не с теорией Большого взрыва.

Следует попутно отметить, что весьма точные измерения суммы углов треугольников в космическом пространстве показали точно 180° , т. е. космическое пространство имеет евклидову структуру (как пространство-время Минковского), а не риманову, как в ОТО. Это тоже противоречит теории Большого взрыва.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Полученные результаты не противоречат природе и не требуют привлечения неизвестных сущностей и явлений (таких как темная материя, темная энергия).

2. В пользу того, что красное смещение z – следствие потери энергии в вакууме, свидетельствуют измерения z для галактики Шредингера CEERS-93316. При первоначальном измерении $z = 16$, затем через период менее года у той же вновь найденной галактики оказалось $z = 5$. Такой факт не может быть объяснен внезапным изменением радиальной скорости галактики – слишком большой скачок. С точки же зрения потери энергии фотона – это вполне объяснимо. В первом случае световой луч прошел зигзагообразный путь при многократном гравитационном линзировании, во втором – гораздо более короткий путь, близкий к прямолинейному. Поэтому потери энергии фотона (и, соответственно, z) в этом случае значительно меньше, чем в первом.

3. Имеется и чисто математическое доказательство необходимости существования потерь энергии электромагнитных волн в вакууме. Теорему единственности для внутренней и внешней задач электродинамики удается доказать только в предположении, что в каждой точке пространства отличны от нуля (хотя, может, и весьма малы) потери энергии электромагнитного поля [9] (§10). В природе же единственность всегда имеет место. Так, существуют только расходящиеся от источника волны, а сходящиеся к источнику отсутствуют. То есть в природе предусмотрены хотя бы малые потери энергии фотонов в вакууме, как одной из конкретных сред распространения электромагнитных волн.

Список литературы

1. Hubble, E. P. Proc. Nat. Acad. Sci. / E. P. Hubble. 1929. Vol. 15, No 3. P. 168–173.
2. Ландеберг, Г. С. Общий курс физики. Т. 3. Оптика / Г. С. Ландеберг. М., 1952.
3. Эйнштейн, А. Сущность теории относительности / А. Эйнштейн. М., 1955.
4. Зельманов, А. Л. Космология. Физический энциклопедический словарь. Т. 2 / А. Л. Зельманов. М.: Сов. энцикл., 1962. С. 491–501.
5. Фок, В. А. Теория пространства, времени и тяготения / В. А. Фок. М., 1961.
6. Логунов, А. А. Лекции по теории относительности и гравитации. Современный анализ проблемы / А. А. Логунов. М.: Наука, 1987.
7. Зельдович, Я. Б. Драма идей в познании природы / Я. Б. Зельдович, М. Ю. Хлопов. М.: Наука, 1988.
8. Алеманов, С. Б. Квантовый закон Хаббла $v_n = nH_0$ / С. Б. Алеманов // Инженерная физика. 2014. № 3. С. 40–46.
9. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. М.: Радио и связь, 1988.

References

1. Hubble E. P. (1929) *Proc. Nat. Acad. Sci.* 15 (3). 168–173.
2. Landeberg G. S. (1952) *General Course of Physics. Vol. 3. Optics.* Moscow (in Russian).
3. Einstein A. (1955) *The Essence of the Theory of Relativity.* Moscow (in Russian).
4. Zelmanov A. L. (1962) *Cosmology. Physical Encyclopedic Dictionary, Vol. 2.* Moscow, Sovetskaya Encyclopedia Publ. 491–501 (in Russian).
5. Fok V. A. (1961) *Theory of Space, Time and Gravity.* Moscow (in Russian).
6. Logunov A. A. (1987) *Lectures on the Theory of Relativity and Gravitation. Modern Analysis of the Problem.* Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
7. Zeldovich Ya. B., Khlopov M. Yu. (1988) *The Drama of Ideas in the Knowledge of Nature.* Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
8. Alemanov S. B. (2014) Hubble's Quantum Law $v_n = nH_0$. *Engineering Physics.* (3), 40–46 (in Russian).
9. Vainshtein L. A. (1988) *Electromagnetic Waves.* Moscow, Radio i Svyaz Publ. (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

Кураев А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Матвеенко В. В., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. вычислительных методов и программирования, 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 17 293-89-56
E-mail: kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

Information about the authors

Kurayev A. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Information Radiotechnologies Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Matveyenka V. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Computational Methods and Programming 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 17 293-89-56
E-mail: kurayev@bsuir.by
Kurayev Alexander Alexandrovich



Посвящается памяти профессора-геометра
Ивана Петровича Егорова

О ЛАКУНАХ В ПОРЯДКАХ ПОЛНЫХ ГРУПП ИЗОМЕТРИЙ И ГОМОТЕТИЙ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РИМАНОВЫХ ПРОСТРАНСТВАХ И МЕТРИКИ САМЫХ ПОДВИЖНЫХ ЭТИХ ПРОСТРАНСТВ ПЕРВЫХ ШЕСТИ ЛАКУНАРНОСТЕЙ

З. Н. ЧЕТЫРКИНА

Поступила в редакцию 20.10.2023

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

Аннотация. Рассмотрены метрические римановы пространства V_n^{4a} , в метриках которых работают сразу четыре алгебраические структуры: вещественные D_{m_1} и комплексные C_{m_2} числа, кватернионы H_{m_3} и октонионы O_{m_4} . Эти пространства интересны с точки зрения их изометрической и гомотетической подвижности. Оказывается, что в порядках r полных групп изометрий G_r и гомотетий P_r имеются лакуны (пропуски).

Найдены метрики самых подвижных пространств V_n^{4a} первых шести лакунарностей в смысле И. П. Егорова.

Ключевые слова: группы изометрий и гомотетий, лакуны, пространства лакунарности в смысле И. П. Егорова.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Четыркина, З. Н. О лакунах в порядках полных групп изометрий и гомотетий в специализированных римановых пространствах и метрики самых подвижных этих пространств первых шести лакунарностей / З. Н. Четыркина // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 106–111.

ON GAPS IN THE ORDERS OF COMPLETE GROUPS OF ISOMETRY AND HOMOTETIES IN SPECIALIZED RIEMANNIAN SPACES AND METRICS OF THE MOST MOBILE OF THESE SPACES OF THE FIRST SIX LACUNARS

ZINAIDA N. CHETYRKINA

Submitted 20.10.2023

Abstract. In the present paper there are considered metric Riemannian spaces V_n^{4a} , in the metrics of which four algebraic structures work at once: real numbers D_{m_1} and complex numbers C_{m_2} , quaternions H_{m_3} and octonions O_{m_4} . We are interested in these spaces in terms of their isometric and homothetic mobility. It turns out that there are lacunas (gaps) in the orders r of complete groups of isometries G_r and homotheties P_r . The metrics of the most mobile spaces V_n^{4a} of the first six lacunarities in the sense of I. P. Egorov are found.

Keywords: groups of isometries and homotheties, lacunae, spaces of lacunarity in the sense of I. P. Egorov.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Chetyrkina Z. N. (2024). On Gaps in the Orders of Complete Groups of Isometry and Homoteties in Specialized Riemannian Spaces and Metrics of the Most Mobile of These Spaces of the First Six Lacunars. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 106–111 (in Russian).

Введение

В [1] подробно описано, как в метрику псевдоевклидова пространства E_n вводятся сразу четыре алгебраические структуры: вещественные числа D_{m_1} , комплексные числа C_{m_2} , кватернионы H_{m_3} и октонионы O_{m_4} (m_i – размерность действия соответствующей алгебры в касательном пространстве рассматриваемого метрического пространства) [2]. Рассмотрим псевдоевклидово пространство с нормой:

$$ds^2 = e_1(dx^1)^2 + e_2(dx^2)^2 + \dots + e_n(dx^n)^2, \quad e_i = \pm 1, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

После введения перечисленных структур метрика (1) принимает вид

$$ds^2 = e_{11}(dx^1)^2 + \dots + e_{1m_1}(dx^{m_1})^2 + e_{21}dz^1 dz^{1*} + \dots + e_{2m_2}dz^{m_2} dz^{m_2*} + e_{31}dk^1 dk^{1*} + \dots + e_{3m_3}dk^{m_3} dk^{m_3*} + e_{41}do^1 do^{1*} + \dots + e_{4m_4}do^{m_4} do^{m_4*}, \quad e_{\alpha i} = \pm 1, \quad \alpha = \overline{1, 4}, \quad i = \overline{1, m_\alpha}, \quad (2)$$

где «*» – операция сопряжения в соответствующей алгебре.

Для сокращения дальнейших расчетов введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} d\tilde{s}^2 = & e_{21}dz^1 dz^{1*} + \dots + e_{2m_2}dz^{m_2} dz^{m_2*} + e_{31}dk^1 dk^{1*} + \dots + e_{3m_3}dk^{m_3} dk^{m_3*} + \\ & + e_{41}do^1 do^{1*} + \dots + e_{4m_4}do^{m_4} do^{m_4*}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$ds_{m_1}^2 = e_{11}(dx^1)^2 + \dots + e_{1m_1}(dx^{m_1})^2. \quad (4)$$

Тогда метрика (2) запишется в кратком виде

$$ds^2 = ds_{m_1}^2 + d\tilde{s}^2. \quad (2)'$$

В [1] предложен порядок полной группы изометрий G_r , сохраняющий всю сложную алгебраическую структуру в метрике (2):

$$r_{1\max} = \frac{1}{2}m_1(m_1+1) + m_2(m_2+1) + \frac{7}{2}m_3(m_3+1) + 11m_4(m_4+1). \quad (5)$$

Оператор гомотетии $Y = x^1 p_1 + x^2 p_2 + \dots + x^n p_n$, $p_i = \frac{\partial}{\partial x^i}$, $i = \overline{1, n}$, для метрики (1) работает и для (2). Поэтому порядок полной группы гомотетий для метрики (2) будет на единицу больше, чем у группы изометрий.

Методика проведения эксперимента

В геометрической школе И. П. Егорова при изучении лакунарностей (пропусков) в порядках полных групп движений в римановых пространствах V_n обнаружены пять первых лакун при больших значениях n [3–5]. Продолжая традиции школы И. П. Егорова, автор статьи решила рассмотреть такие вопросы, как: имеются ли лакуны в порядках полных групп изометрических и гомотетических движений в специализированных римановых пространствах V_n^{4a} с введенными в их метрику четырьмя алгебраическими структурами D_{m_1} , C_{m_2} , H_{m_3} , O_{m_4} ; и если лакуны есть, то каковы они и метрики рассматриваемых пространств с допустимыми группами? Приступая к решению этих вопросов, следует заметить, что в специализированных римановых пространствах всегда действуют операторы групп G_r и P_r , выражаемые в вещественной алгебре, а сложная алгебраическая структура метрики находится только в касательном пространстве, и в нем нет операторов изометрии, перемешивающих «лепестки» с «тычинками» [1, 2]. Поэтому картина лакунарности в порядках полных групп G_r и P_r в V_n^{4a} (где $n = m_1 + 2m_2 + 4m_3 + 8m_4$) зависит лишь от величины m_1 , т. е. от размерности действия в метрике специализированного пространства вещественной алгебры. Необходимо, чтобы слагаемое $d\tilde{s}^2$ (3) в метрике рассматриваемого пространства всегда оставалось неизменным, а с лакунарностью может меняться вид метрики $ds_{m_1}^2$.

В связи с этим можно воспользоваться результатами школы И. П. Егорова [3–5]. Для сокращения дальнейших расчетов введем обозначение

$$N_* = m_2(m_2 + 1) + \frac{7}{2}m_3(m_3 + 1) + 11m_4(m_4 + 1). \quad (6)$$

Тогда для полных групп $G_{r_{1\max}}$ и $P_{r_{1\max}}$ метрики (2) имеем соответственно:

$$r_{1\max} = \frac{1}{2}m_1(m_1 + 1) + N_*; \quad (7)$$

$$r_{1\max} = \frac{1}{2}m_1(m_1 + 1) + 1 + N_*. \quad (8)$$

Пространства V_n^{4a} с метрикой (2), согласно терминологии И. П. Егорова, назовем пространствами первой лакунарности в изометрическом и гомотетическом смыслах, поскольку порядки групп движений этих смыслов в таких пространствах предшествуют первым лакунам (пропускам). Первая лакуна – первый интервал запрещенных порядков – для полных групп G_r в V_n^{4a} имеет вид [3]:

$$r_{2\max} < r < r_{1\max}, \quad (9)$$

где $r_{2\max} = \frac{1}{2}m_1(m_1 - 1) + 1 + N_*$.

С учетом [4] вторая лакуна для полных групп G_r в V_n^{4a} такова:

$$r_{3\max} < r < r_{2\max} - 1, \quad (10)$$

где $r_{3\max}$ – третий максимальный порядок для групп G_r в V_n^{4a} после второй лакуны, $r_{3\max} = \frac{1}{2}(m_1 - 2)(m_1 - 1) + 5 + N_*$.

Следует заметить, что картина лакунарности в порядках полных групп G_r и P_r в знакоположительных метрических пространствах легко усматривается из самых подвижных метрик с группами движений G_r :

– для первой лакунарности:

$$ds = \left(dx^1{}^2 + dx^2{}^2 + \dots + dx^n{}^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad r = \frac{1}{2}n(n + 1); \quad (11)$$

– для второй лакунарности:

$$ds = \left((dx^1)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left((dx^2)^2 + \dots + (dx^n)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad r = \frac{1}{2}n(n - 1) + 1; \quad (12)$$

– для третьей лакунарности:

$$ds = \left((dx^1)^2 + (dx^2)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left((dx^3)^2 + \dots + (dx^n)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad r = \frac{1}{2}(n - 1)(n - 2) + 3; \quad (13)$$

– для четвертой лакунарности:

$$ds = \left((dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left((dx^4)^2 + \dots + (dx^n)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad r = \frac{1}{2}(n - 2)(n - 3) + 6; \quad (14)$$

– для пятой лакунарности:

$$ds = \left((dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2 + (dx^4)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left((dx^5)^2 + \dots + (dx^n)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad r = \frac{1}{2}(n - 4)(n - 3) + 10. \quad (15)$$

И так далее.

Но для знакоопределенных метрик римановых пространств лакунарная картина меняется, потому что для ds начинает работать уже комплексная алгебра. И. П. Егоров заметил это первый, он же первый отметил, что теория лакун для порядков групп изометрий и гомотетий в римано-

вых пространствах V_n работает при $n \geq 4$. Действительно, при $n = 4$ для группы G_r имеем $r_{1\max} = 10$ и $r_{2\max} = 7$, а для группы P_r имеем $r_{1\max} = 11$ и $r_{2\max} = 8$. А у Л. И. Егоровой [6] нашлась метрика V_4 , допускающая группы $G_{r_{2\max}} = 8$ и $P_{r_{2\max}} = 9$:

$$ds^2 = 2dx^1 dx^4 + 2dx^3 dx^2 + (x^4)^2 (dx^2)^2. \quad (16)$$

Метрика (16) вписывается в рассматриваемую метрику пространства V_n^{4a} с полными группами $G_{r_{3\max}}$ и $P_{r_{3\max}}$:

$$ds^2 = 2dx^1 dx^4 + 2dx^2 dx^3 + (x^4)^2 (dx^2)^2 + e_5 (dx^5)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2. \quad (17)$$

В (17) дополнительные операторы изометрии – $X_{\alpha 1} = e_\alpha x^\alpha p_1 - x^4 p_\alpha$, $X_{\alpha 2} = e_\alpha x^\alpha p_3 - x^2 p_\alpha$, $\alpha = \overline{5, m_1}$, а оператор гомотетии – $Y = 3x^1 p_1 + x^2 p_2 + 3x^3 p_3 + x^4 p_4 + 2(x^5 p_5 + \dots + x^n p_n)$ [6–9].

Заменив в (17) слагаемое $e_5 (dx^5)^2$ на $e^{2x^5} e_5 (dx^5)^2$ (последнее имеет оператор изометрии $X = p_5 / e^{x^5}$), получим метрику пространства V_n^{4a} с группами изометрий $G_{r_{4\max}}$ и гомотетий $P_{r_{4\max}}$:

$$ds^2 = 2dx^1 dx^4 + 2dx^2 dx^3 + (x^4)^2 (dx^2)^2 + e^{2x^5} e_5 (dx^5)^2 + e_6 (dx^6)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2. \quad (18)$$

В (18) оператор гомотетии – $Y = 3x^1 p_1 + x^2 p_2 + 3x^3 p_3 + x^4 p_4 + 2(p_5 + x^6 p_6 + \dots + x^n p_n)$, для группы изометрий – $r_{4\max} = \frac{1}{2}(m_1 - 3)(m_1 - 2) + 6 + N_*$.

Рассмотрим метрику пространства V_n^{4a}

$$ds^2 = 2dx^1 dx^4 + 2dx^2 dx^3 + (x^4)^2 (dx^2)^2 + 2dx^5 dx^8 + 2dx^6 dx^7 + (x^8)^2 (dx^6)^2 + e_9 (dx^9)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2. \quad (19)$$

В (19) две егоровские метрики (16) для переменных (x^1, x^2, x^3, x^4) и (x^5, x^6, x^7, x^8) допускают 16 операторов изометрии и еще дополнительные операторы – $X_{17} = x^8 p_1 - x^4 p_5$, $X_{18} = x^6 p_1 - x^4 p_7$, $X_{19} = x^8 p_3 - x^2 p_5$, $X_{20} = x^6 p_3 - x^2 p_7$, $X_{14\alpha} = e_\alpha x^\alpha p_1 - x^4 p_\alpha$, $X_{23\alpha} = e_\alpha x^\alpha p_3 - x^2 p_\alpha$, $X_{58\alpha} = e_\alpha x^\alpha p_5 - x^8 p_\alpha$, $X_{67\alpha} = e_\alpha x^\alpha p_7 - x^6 p_\alpha$, $\alpha = \overline{9, m_1}$.

Оператор гомотетии – $Y = 3x^1 p_1 + x^2 p_2 + 3x^3 p_3 + x^4 p_4 + 3x^5 p_5 + x^6 p_6 + 3x^7 p_7 + x^8 p_8 + 2(x^9 p_9 + \dots + x^n p_n)$.

Риманово пространство V_n^{4a} с метрикой (19) допускает группы $G_{r_{5\max}}$ и $P_{r_{5\max}}$. Для группы изометрий – $r_{5\max} = \frac{1}{2}(m_1 - 4)(m_1 - 3) + 10 + N_*$.

Метрики самых подвижных римановых пространств V_n^{4a} второй–шестой лакуарностей

Для пространств V_n^{4a} второй–шестой лакуарностей представим метрики:

– вторая лакуарность с группами $G_{r_{2\max}} \left\{ r_{2\max} = \frac{1}{2} m_1 (m_1 - 1) + 1 + N_* \right\}$ и $P_{r_{2\max}}$, где шесть классов пространств, а знакоположительная метрика (12) одна, имеет метрики:

$$\begin{aligned} ds^2 &= e^{2x^1} e_1 (dx^1)^2 + e_2 (dx^2)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2; \\ ds^2 &= a(x^1) [2dx^1 dx^2 + e_3 dx^3^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2] + d\tilde{s}^2; \\ a(x^1) &= e^{2x^1}; (x^1)^b; b \neq 0; \frac{e^{-2\alpha \arctg x^1}}{1 + (x^1)^2}; \frac{e^{\frac{\alpha}{x^1}}}{(x^1)^2}; \frac{(x^1 - 1)^{\alpha-1}}{(x^1 + 1)^{\alpha+1}}; \forall \alpha; b \in D; \end{aligned} \quad (20)$$

– третья лакунарность с группами $G_{r_{3\max}} \left\{ r_{3\max} = \frac{1}{2}(m_1 - 2)(m_1 - 1) + 5 + N_* \right\}$ и $P_{r_{3\max}}$ имеет только одну метрику (егоровскую) (17). Аналогов ей среди знакоположительных метрик нет. Она представлена формулой (21). Здесь пять типов метрик с группами $G_{r_{3\max}}$ и $P_{r_{3\max}}$ в силу (20) сравнимы со знакоположительной метрикой (13):

$$ds^2 = 2dx^1 dx^4 + 2dx^2 dx^3 + (x^4)^2 (dx^2)^2 + e_5 (dx^5)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2; \quad (21)$$

$$ds^2 = e_3 (dx^3)^2 + a(x^1)[2dx^1 dx^2 + e_4 (dx^4)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2] + d\tilde{s}^2;$$

– четвертая лакунарность с группами $G_{r_{4\max}} \left\{ r_{4\max} = \frac{1}{2}(m_1 - 3)(m_1 - 2) + 6 + N_* \right\}$ и $P_{r_{4\max}}$ имеет пять классов метрик, которые по подвижности сродни знакоположительной метрике (14) при $a(x^1)$ вида (20) и егоровской метрике (18):

$$ds^2 = 2dx^1 dx^4 + 2dx^2 dx^3 + (x^4)^2 (dx^2)^2 + e^{2x^5} e_5 (dx^5)^2 + e_6 (dx^6)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2;$$

$$ds^2 = e_3 (dx^3)^2 + e_4 (dx^4)^2 + a(x^1)[2dx^1 dx^2 + e_5 (dx^5)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2];$$

– пятая лакунарность с группами $G_{r_{5\max}} \left\{ r_{5\max} = \frac{1}{2}(m_1 - 4)(m_1 - 3) + 10 + N_* \right\}$ и $P_{r_{5\max}}$ имеет пять классов метрик пространств, по подвижности родственные знакоположительной метрике (15) при $a(x^1)$ вида (20), а также егоровскую метрику (19):

$$ds^2 = e_3 (dx^3)^2 + e_4 (dx^4)^2 + e_5 (dx^5)^2 + a(x^1)[2dx^1 dx^2 + e_6 (dx^6)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2];$$

– шестая лакунарность с группами $G_{r_{6\max}} \left\{ r_{6\max} = \frac{1}{2}(m_1 - 5)(m_1 - 4) + 15 + N_* \right\}$ и $P_{r_{6\max}}$ имеет пять метрик пространств, по подвижности родственные одной знакоположительной метрике при $a(x^1)$ вида (20):

$$ds^2 = e_3 (dx^3)^2 + e_4 (dx^4)^2 + e_5 (dx^5)^2 + e_6 (dx^6)^2 + a(x^1)[2dx^1 dx^2 + e_7 (dx^7)^2 + \dots + e_{m_1} (dx^{m_1})^2 + d\tilde{s}^2].$$

Заключение

Получено полное представление особых сверхподвижных метрик римановых специализированных пространств до шестой лакунарности включительно в смысле И. П. Егорова, в которых действует уже комплексная алгебра. Если положить $d\tilde{s}^2 = 0$, то получим представление всех максимально подвижных метрик римановых пространств V_{m_1} до шестой лакунарности в современном понимании.

Список литературы

1. Четыркина, З. Н. О максимальных порядках групп изометрических и гомотетических движений в метрических пространствах, допускающих в своей метрике вещественную, комплексную и гиперкомплексные алгебраические структуры / З. Н. Четыркина // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. 2021. Т. 1, № 57. С. 27–34.
2. Розенфельд, Б. А. Геометрия групп Ли / Б. А. Розенфельд, М. П. Замаховский. М.: Изд-во МЦНМО, 2003.
3. Егоров, И. П. Римановы пространства второй лакунарности / И. П. Егоров // Доклады Академии наук СССР. 1956. Т. 111, № 2. С. 276–279.
4. Егоров, И. П. О пространствах первых трех лакунарностей в гомотетическом смысле / И. П. Егоров // Доклады Академии наук СССР. 1963. Т. 150, № 4. С. 730–732.
5. Егоров, И. П. Автоморфизмы в обобщенных пространствах / И. П. Егоров // Итоги науки и техники. Серия: Проблемы геометрии. 1978. № 10. С. 147–191.
6. Егорова, Л. И. Об однородных гомотетических пространствах / Л. И. Егорова // Материалы 5-й научно-технической конференции. Секция математики. ПВАИУ. 1970. С. 29–31.

7. Лаптев, Б. Л. Производная Ли для объектов, являющихся функциями точки и направления / Б. Л. Лаптев // Известия физико-математического общества. Казань. 1938. № 10. С. 3–38.
8. Четыркина, З. Н. Гомотетии и движения в двумерных финслеровых пространствах / З. Н. Четыркина // Волжский математический сборник. 1966. № 5. С. 366–373.
9. Четыркина, З. Н. Пространства Рандерса первой лакунарности и максимально подвижные финслеровы пространства / З. Н. Четыркина // Известия высших учебных заведений. Математика. 1984. № 11. С. 53–56.

References

1. Chetyrkina Z. N. (2021) On the Maximum Orders of Groups That Are Isometric and Homothetic Moves in Metric Spaces That Admit Real, Complex, and Hypercomplex Algebraic Structures in Their Metric. *Bulletin of Mogilev State University named after A. A. Kuleshov*. 1 (57), 27–34 (in Russian).
2. Rosenfeld B. A., Zamakhovsky M. P. (2003) *Geometry of Lie Groups*. Moscow, MTsNMO Publ. (in Russian).
3. Egorov I. P. (1956) Rimanov Spaces of the Second Lacunarity. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 111 (2), 276–279 (in Russian).
4. Egorov I. P. (1963) On the Spaces of the First Three Lacunaries in the Homothetic Sense. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 150 (4), 730–732 (in Russian).
5. Egorov I. P. (1978) Automorphisms in Generalized Spaces. *Results of Science and Technology. Series: Problems of Geometry*. (10), 147–191 (in Russian).
6. Egorova L. I. (1970) On Homogeneous Homothetic Spaces. *Materials of the 5th Scientific and Technical Conference: Section of Mathematics. PVAIU*. 29–31 (in Russian).
7. Laptev B. L. (1938) Lie Derivative for Objects That Are Functions of a Point and a Direction. *Proceedings of the Physical and Mathematical Society. Kazan*. (10), 3–38 (in Russian).
8. Chetyrkina Z. N. (1966) Homotheties and Motions in Two-Dimensional Finsler Spaces. *Volga Mathematical Collection*. (5), 366–373 (in Russian).
9. Chetyrkina Z. N. (1984) Randers Spaces of First Lacunarity and Maximally Mobile Finsler Spaces. *News of Higher Educational Institutions. Mathematics*. (11), 53–56 (in Russian).

Сведения об авторе

Четыркина З. Н., канд. физ.-мат. наук, доц.

Адрес для корреспонденции

220036, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Кунцевщина, 36–580
Тел.: +375 29 275-24-64
E-mail: guseinaas@yandex.ru
Четыркина Зинаида Никандровна

Information about the author

Chetyrkina Z. N., Cand. of Sci., Associate Professor

Address for correspondence

220036, Republic of Belarus,
Minsk, Kunsevchina St., 36–580
Tel.: +375 29 275-24-64
E-mail: guseinaas@yandex.ru
Chetyrkina Zinaida Nikandrovna

