
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит шесть раз в год

Научный журнал издается с января 2003 года

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

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

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники

Редакционная коллегия

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

Редакционный совет

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

СОДЕРЖАНИЕ

Фам В. Т., Максимов С. Е., Уткина Е. А., Чубенко Е. Б., Борисенко В. Е. Емкостные свойства пленочных структур из графитоподобного нитрида углерода	5
Гасенкова И. В., Мухуров Н. И., Андрухович И. М. Параметры анодного оксида алюминия, определяемые из осцилляций Фабри – Перо в спектрах зеркального отражения	14
Гапоненко Н. В., Клещева С. М., Лашковская Е. И., Лабунов В. А., Мартынов И. Л., Чистяков А. А., Каргин Н. И., Райченко Т. Ф., Судник Л. В., Лученок А. Р., Ванг М. Золь-гель-синтез монодисперсных глобул кремнезема и оптические свойства упорядоченных и неупорядоченных материалов на их основе	21

Захаров И. А., Гусинский А. В., Сайков А. В., Касперович М. М., Кондрашов Д. А., Свирид М. С. Измерительный гармонический смеситель в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц.....	29
Лаппо А. И. Выбор траектории движения лазерного луча для формирования переходных отверстий в кремниевой подложке.....	38
Зеневич А. О., Жданович С. В., Матковская Т. А., Новиков Е. В. Оптическое волокно как основа для создания датчика искусственной освещенности	45
Мордачев В. И., Ционенко Д. А. Оценка электромагнитной совместимости низкоорбитальных группировок спутниковой связи с наземными радиосистемами	52
Герман Ю. О., Герман О. В. Использование нейросетей для решения задач прикладной логики.....	62
Батура М. П., Шилин Л. Ю., Кукин Д. П. Математическое моделирование систем фазовой синхронизации с импульсной модуляцией.....	70
Чонг Тхань Нгуен, Дао Динь Ха, Ловшенко И. Ю., Стемпицкий В. Р. Конструктивные решения приборных структур биполярных транзисторов с изолированным затвором и вертикальным расположением канала	81
Чураков А. В., Камлач П. В., Елемесов Н. Ж., Камлач В. И., Онгарбаева А. И., Лещевич Е. В. Моделирование экстракорпорального инфразвукового воздействия на стопу человека	90
Самуйлов И. В. Исследование расслабления мышц жевательного комплекса после функциональной нагрузки	97
Пискун Е. С., Нуансенгси Д. В., Котько Е. Н. Оптимизация бизнес-процессов в электронной коммерции с применением методов и алгоритмов искусственного интеллекта.....	103

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Подписано в печать 09.12.2024. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 11,2. Тираж 75 экз. Заказ 194.

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

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., Maximov S. E., Utkina E. A., Chubenko E. B., Borisenko V. E. Capacitance of Film Structures Including Graphitic Carbon Nitride.....	5
Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Andrukhovich I. M. Parameters of Anodic Alumina Determined from Fabry – Perot Oscillations in Specular Reflection Spectra	14
Gaponenko N. V., Kleshcheva S. M., Lashkovskaya E. I., Labunov V. A., Martynov I. L., Chistyakov A. A., Kargin N. I., Raichenok T. F., Sudnik L. V., Luchanok A. R., Wang M. Sol-Gel Synthesis of Monodisperse Silica Globules and Optical Properties of Ordered and Disordered Materials Based on Them.....	21
Zakharov I. A., Gusinsky A. V., Saikov A. V., Kasperovich M. M., Kondrashov D. A., Svirid M. S. Measuring Harmonic Mixer in the Frequency Range from 78.33 to 118.10 GHz.....	29
Lapo A. I. Selecting the Trajectory of the Laser Beam to Form Vias in the Silicon Substrate.....	38
Zenevich A. O., Zhdanovich S. V., Matkovskaia T. A., Novikov E. V. Optical Fiber as a Basis for Creation Light Sensor	45
Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. Evaluation of Electromagnetic Compatibility of Low-Orbit Satellite Communication Constellations with Terrestrial Radio Systems	52

German Ju. O., German O. V. Usage of Neural Networks for Solving Applied Logic Problems....	62
Batura M. P., Shilin L. Yu., Kukin D. P. Mathematical Modeling of Phase-Locking Systems with Pulse Modulation	70
Trong Thanh Nguyen, Dao Dinh Ha, Lovshenko I. Yu., Stempitsky V. R. Design Solutions for Device Structures of Bipolar Transistors with an Insulated Gate and a Vertical Channel Arrangement	81
Churakov A. V., Kamlach P. V., Elemesov N. Zh., Kamlach V. I., Ongarbayeva A. I., Leshchevich E. V. Modeling of Extracorporeal Infrasound Impact on Human Foot	90
Samuilau I. U. Study of Relaxation of the Muscles of the Chewing Complex after the Functional Load	97
Piskun E. S., Nuansengsy D. V., Kotsko E. N. Optimization of Business Processes in E-Commerce Using Artificial Intelligence Methods and Algorithms.....	103

Responsible Secretary T. Mironenka

Signed for printing 09.12.2024. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.
Ed.-pr. 1. 13,25. Ed.-ed. 1. 11,2. Edition 75 copies. Order 194.

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

© Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, 2024



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.354.342.1; 621.315.592

ЕМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР ИЗ ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА

В. Т. ФАМ, С. Е. МАКСИМОВ, Е. А. УТКИНА, Е. Б. ЧУБЕНКО, В. Е. БОРИСЕНКО

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

Поступила в редакцию 29.07.2024

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

Аннотация. Скоростным осаждением графитоподобного нитрида углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) из меламина на подложки из кремния (Si) и алюминия (Al), часть поверхности которых была покрыта оксидом – соответственно SiO_2 или Al_2O_3 , с поверхностными пленочными контактами из Al изготовлены структуры $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Si}/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$ и $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$. На них при комнатной температуре измерены вольт-фарадные характеристики и зависимость емкости от частоты измерительного сигнала. Установлено, что диэлектрическая проницаемость $g\text{-C}_3\text{N}_4$ составляет 14 в структурах на кремнии и 9–10 в структурах на алюминии. Уменьшение диэлектрической проницаемости объясняется образованием Al_2O_3 на границе $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$ в процессе осаждения $g\text{-C}_3\text{N}_4$, на что указывают результаты проведенного рентгенодифракционного анализа сформированных образцов.

Ключевые слова: пленка, нитрид углерода, оксид алюминия, оксид кремния, емкость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках задания 1.4 Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии». Авторы благодарят Д. И. Тишкевич за рентгенодифракционный анализ экспериментальных образцов.

Для цитирования. Емкостные свойства пленочных структур из графитоподобного нитрида углерода / В. Т. Фам [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-5-13>.

CAPACITANCE OF FILM STRUCTURES INCLUDING GRAPHITIC CARBON NITRIDE

VAN T. PHAM, SERGEY E. MAXIMOV, ELENA A. UTKINA, EUGENE B. CHUBENKO,
VICTOR E. BORISENKO

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

Submitted 29.07.2024

Abstract. $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Si}/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$ and $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ structures were fabricated by rapid chemical vapor deposition of graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) from melamine onto silicon (Si) and aluminum (Al) substrates partially coated with appropriate oxide – SiO_2 or Al_2O_3 – and Al contacts deposited on the surface. Their capacitance-voltage characteristics and frequency dependence of the capacitance were measured at room temperature. It was found that the permittivity of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ is 14 in structures on silicon and 9–10 in structures on aluminum. The decrease in permittivity is explained by the formation of Al_2O_3

at the $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$ boundary during the deposition of $g\text{-C}_3\text{N}_4$, as indicated by the results of the X-ray diffraction analysis of the formed samples.

Keywords: film, carbon nitride, aluminium oxide, silicon oxide, capacitance.

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

Gratitude. The research was carried out within the framework of task 1.4 of the State Program of Scientific Research of the Republic of Belarus “Materials Science, New Materials and Technologies”. The authors thank D. I. Tishkevich for the X-ray diffraction analysis of the experimental samples.

For citation. Pham V. T., Maximov S. E., Utkina E. A., Chubenko E. B., Borisenko V. E. (2024) Capacitance of Film Structures Including Graphitic Carbon Nitride. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-5-13> (in Russian).

Введение

Графитоподобный нитрид углерода $g\text{-C}_3\text{N}_4$ рассматривается в качестве одного из перспективных материалов для устройств аккумулирования электрической энергии [1]. Особую актуальность он приобретает в связи с возможностью формирования методом химического осаждения из газовой фазы пленочных структур, состоящих из слоев этого материала нанометровой толщины [2–5]. Установлен ряд электрофизических характеристик $g\text{-C}_3\text{N}_4$, проявляющего свойства анизотропного полупроводника с очень низкой электропроводностью, таких как удельное сопротивление и подвижность носителей заряда [6–8]. Однако диэлектрические характеристики изготавливаемых из него наноразмерных структур мало изучены.

В этой связи цель исследований авторов – экспериментальное изучение емкостных зарядовых свойств тонкопленочных слоистых наноструктур из $g\text{-C}_3\text{N}_4$, сформированного химическим осаждением из газовой фазы на металлической (Al) и полупроводниковой (Si) подложках, а также на диэлектрических оксидных слоях (SiO_2 , Al_2O_3) на этих подложках.

Методика проведения эксперимента

В качестве исходных подложек использовали пластины диаметром 76 мм монокристаллического (111) кремния с p -типом проводимости (легирующая примесь – бор) и удельным сопротивлением 0,03 Ом·см, а также пластины размерами $70 \times 70 \times 0,1$ мм, вырезанные из алюминиевой фольги ДПРНТ 0,1×500НД 8011 (ГОСТ 618–2014), содержащей не менее 97,5 % алюминия. Поверхность подложек подвергали стандартной очистке в органических растворителях.

Оксидный слой из SiO_2 толщиной 290 нм создавали на кремниевой подложке ее термическим окислением в воздушной среде при 900 °С. После этого с половины поверхности подложки оксид стравливали в водном растворе фтористоводородной кислоты концентрацией 4,5 об.%. Слой Al_2O_3 толщиной 210 нм формировали на алюминиевой подложке ее электрохимическим окислением в водном растворе лимонной кислоты в потенциостатическом режиме при скорости развертки потенциала 1 В/с до 150 В. При этом подложку лишь до середины погружали в электролит, обеспечивая таким образом соседство областей, покрытых оксидом алюминия и свободных от него.

Пленки $g\text{-C}_3\text{N}_4$ наносили скоростным химическим осаждением из паров меламина в воздушной атмосфере при атмосферном давлении, как это описано в [5], при 575 °С в течение 5 мин на кремниевые подложки и при 550 °С в течение 3, 5 и 7 мин – на алюминиевые. При этом каждую подложку располагали над реактором так, чтобы осаждение происходило одновременно на ее поверхность, покрытую и непокрытую соответствующим оксидом. Толщины осажденного $g\text{-C}_3\text{N}_4$, оцененные в экспериментах [5], составляли 1150 нм на кремниевой и соответственно 700, 1100 и 1200 нм – на алюминиевых подложках.

Для создания электрических контактов к внешней поверхности пленки $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и к подложке их защищали механически прижатой контактной маской из железной фольги и магнетронным распылением наносили пленку алюминия толщиной порядка 100 нм. Окна в маске имели форму квадратов размерами 1×1 мм и располагались на расстоянии 12 мм друг от друга. В результате были сформированы четыре группы экспериментальных ($\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Si}/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$, $\text{Al}/g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$) и две группы контрольных пленочных структур ($\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ и $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$). Они позволяли регистрировать емкостные характеристики как собственно SiO_2 и Al_2O_3 , так и комбинированных структур $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$, $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 1).

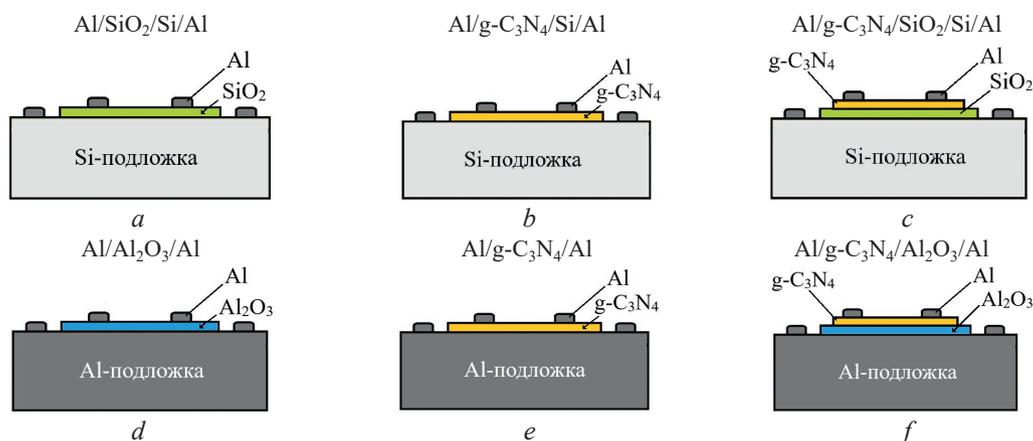


Рис. 1. Структура контрольных (a, d) и экспериментальных (b, c, e, f) образцов на кремниевой (a, b, c) и алюминиевой (d, e, f) подложках

Fig. 1. Structure of reference (a, d) and experimental (b, c, e, f) samples on silicon (a, b, c) and aluminum (d, e, f) substrates

На полученных образцах анализировали морфологию поверхности методом сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе ZEISS EVO 10 и присутствие в них кристаллических фаз методом рентгеновской дифрактометрии на рентгеновском порошковом дифрактометре POWDIX 600/300), используя для зондирования излучение $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,542 \text{ \AA}$). Исследование емкостных характеристик экспериментальных пленочных структур проводили при комнатной температуре с помощью зондового устройства и измерителя импеданса E7-25, позволявшего регистрировать емкости в диапазоне от 1 до 1000 пФ и напряжения смещений 0–10 В, а также частотные зависимости емкости в диапазоне 100 Гц–1 МГц. Измерения частотной зависимости емкости осуществляли при подаваемом на образец постоянном напряжении 0, 3 и 7 В. Оценивалось также влияние отжига при 120 °С на воздухе в течение 10 мин на контролируемые емкостные характеристики.

Результаты исследований

Все сформированные пленочные структуры имели гладкую поверхность с четкими границами контактных областей. Рентгенодифракционный анализ экспериментальных образцов обнаружил в структурах на кремнии кристаллическую фазу самого кремния (подложка) и характерный для $\text{g-C}_3\text{N}_4$ дифракционный пик отражения от плоскости (002). На дифрактограммах образцов на алюминиевых подложках (рис. 2), наряду с рефлексами от подложки и $\text{g-C}_3\text{N}_4$, зарегистрированы сигналы от кристаллических фаз Al_2O_3 . Причем эти сигналы присутствуют как на дифрактограммах, снятых на образцах, на которые $\text{g-C}_3\text{N}_4$ наносили на предварительно электрохимически окисленную алюминиевую подложку, так и на образцах, на которые $\text{g-C}_3\text{N}_4$ наносили на неокисленный алюминий.

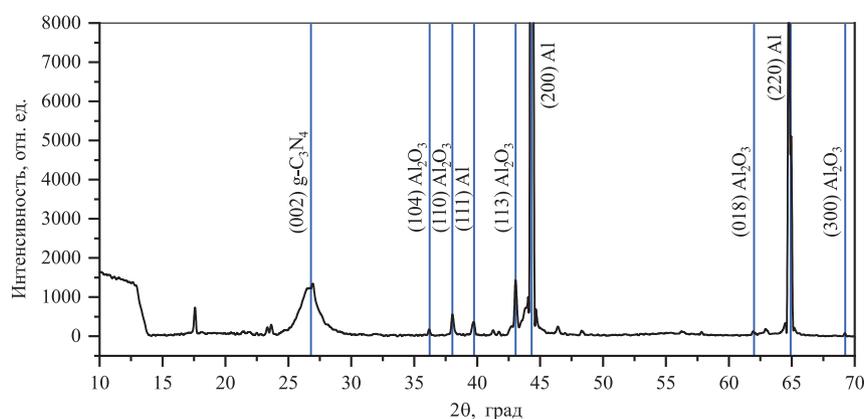


Рис. 2. Рентгенограмма образца Al/g-C₃N₄/Al

Fig. 2. X-ray diffraction spectrum of Al/g-C₃N₄/Al sample

Перед регистрацией емкостных характеристик по вольт-амперным измерениям убеждались в омическом характере контактов к кремниевым и алюминиевым подложкам и проверяли структуры на электрической пробой и утечки. Установлено, что все изготовленные пленочные структуры, за исключением тех, на которых $g-C_3N_4$ осаждали на кремний ($Al/g-C_3N_4/Si/Al$), выдерживают напряжение до ± 10 В при плотности токов утечки менее 10 нА/см^2 . В названных структурах на кремнии токи оказались на три-четыре порядка больше. В дальнейшем на них емкостные измерения не проводились.

На рис. 3 приведены вольт-фарадные (C-V) характеристики, снятые на контрольной структуре, в которой присутствовал только один диэлектрик – SiO_2 , и на экспериментальной структуре с двухслойным материалом $g-C_3N_4/SiO_2$ между токоподводящими электродами.

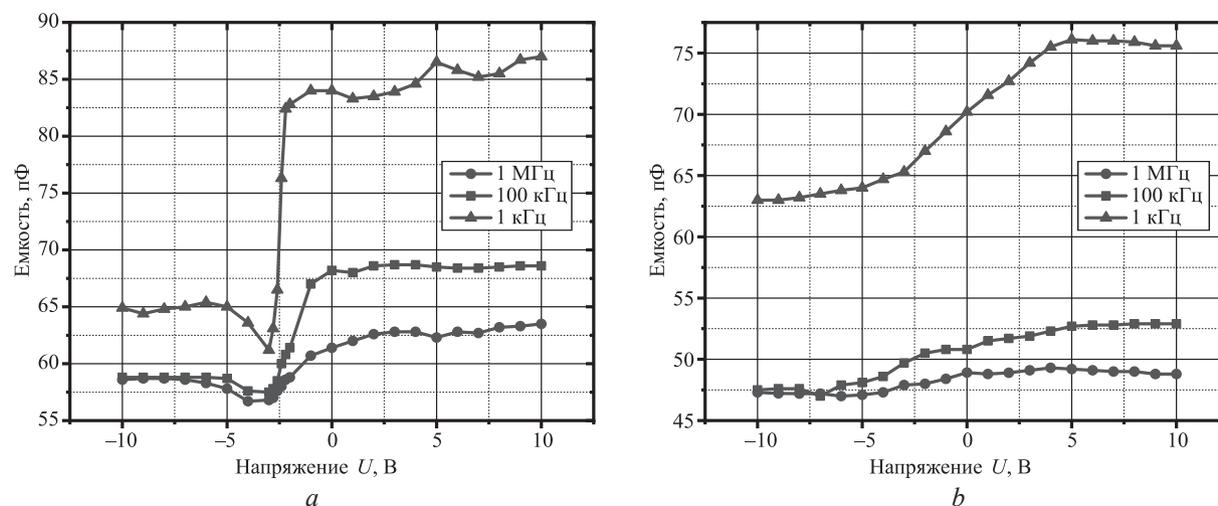


Рис. 3. C-V-характеристики контрольной $Al/SiO_2/Si/Al$ (a) и экспериментальной $Al/g-C_3N_4/SiO_2/Si/Al$ (b) пленочных структур на кремниевой подложке

Fig. 3. C-V characteristics of reference $Al/SiO_2/Si/Al$ (a) and experimental $Al/g-C_3N_4/SiO_2/Si/Al$ (b) film structures on a silicon substrate

Вид C-V-характеристики контрольной структуры является типичным для МОП-структур на кремнии [6, 7]. При положительном напряжении на Al-электроде, контактирующем с SiO_2 , емкость остается практически неизменной во всем исследованном диапазоне приложенных внешних напряжений. При смене полярности приложенного напряжения имеет место резкое уменьшение емкости в интервале от нуля до (-5) В, после которого ее значения остаются неизменными. Отмеченные особенности C-V-характеристики контрольной структуры объясняются дрейфом положительных ионов в окисле и/или перераспределением подвижных носителей заряда [8]. На границе Si/SiO_2 ионы, как правило, закреплены из-за высокой разупорядоченности окисла, а ионы, находящиеся на границе металл/окисел, могут быть подвижными. Кроме этого, эффективный заряд на границе Si/SiO_2 , влияющий на измеряемую емкость, может изменяться вследствие туннельной инжекции свободных носителей из полупроводника на ловушки на этой границе. Такой механизм становится преобладающим при отрицательных напряжениях смещения, приводя к уменьшению общей регистрируемой емкости структуры.

Отличительными особенностями C-V-характеристики экспериментальной структуры являются более низкие значения регистрируемой емкости и расширенная область монотонного изменения емкости в зависимости от приложенного напряжения. В рассматриваемом случае она симметрична относительно нуля и простирается от (-5) до $(+5)$ В, что можно связать с зарядовыми эффектами, принесенными $g-C_3N_4$. Так как при одинаковой площади контактов абсолютное значение емкости контрольной структуры, содержащей только пленку SiO_2 между токопроводящими электродами, и при одних и тех же условиях измерений было больше емкости экспериментальной двухслойной $g-C_3N_4/SiO_2$ -структуры, то эквивалентную электрическую схему последней можно представить в виде последовательного соединения двух конденсаторов с емкостями, соответствующими отдельно $g-C_3N_4$ и SiO_2 , и рассчитать емкостные характеристики собственно $g-C_3N_4$, которые затруднительно получить прямыми измерениями. Соответственно,

с использованием экспериментальных значений емкостей контрольной C_{SiO_2} и экспериментальной $C_{\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4}$ структур на кремнии, измеренных при напряжении 5 В на частоте 1 кГц, емкость $\text{g-C}_3\text{N}_4$ была определена следующим образом:

$$C_{\text{g-C}_3\text{N}_4} = \left[\frac{1}{C_{\text{SiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4}} - \frac{1}{C_{\text{SiO}_2}} \right]^{-1}. \quad (1)$$

По полученному значению емкости, используя формулу для емкости конденсатора с плоскими параллельными обкладками, находим:

$$C_{\text{g-C}_3\text{N}_4} = \frac{\varepsilon_{\text{g-C}_3\text{N}_4} \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{g-C}_3\text{N}_4}$ – диэлектрическая проницаемость $\text{g-C}_3\text{N}_4$; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; S – площадь верхнего электрода; d – толщина $\text{g-C}_3\text{N}_4$.

Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{g-C}_3\text{N}_4}$ при вычислении оказалась равной 14, что согласуется с ранее опубликованными данными [9], полученными для слоистой структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$. С-V-характеристики всех экспериментальных и контрольных структур на алюминиевых подложках показали отсутствие зависимости емкости от приложенного напряжения. Их типичный вид приведен на рис. 4. Абсолютные значения емкостей, представленные в табл. 1, зависят лишь от состава входящих в них пленок и частоты, на которой проводилось измерение.

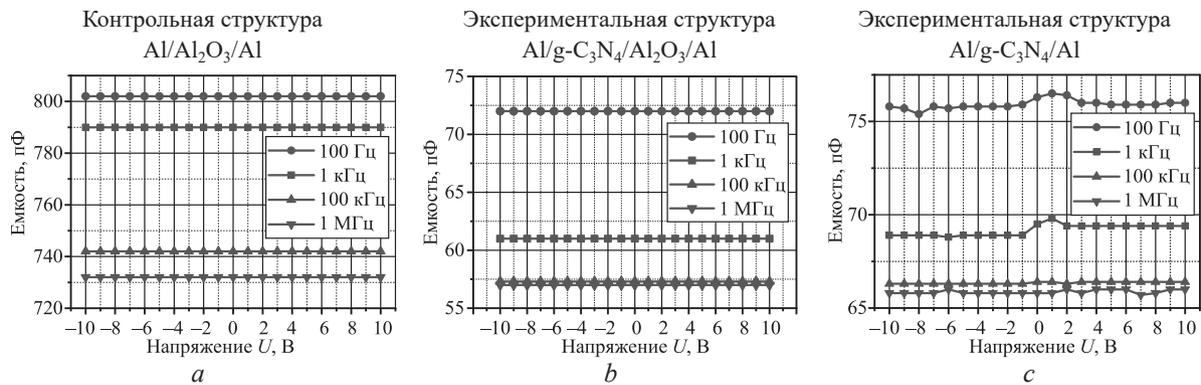


Рис. 4. С-V-характеристики контрольной (а) и экспериментальных (б, с) пленочных структур на алюминиевой подложке, сформированных осаждением $\text{g-C}_3\text{N}_4$ при 550°C в течение 7 мин

Fig. 4. C-V characteristics of reference (a) and experimental (b, c) film structures on an aluminum substrate formed by deposition of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ at 550°C for 7 min

Таблица 1. Электрические емкости пленочных структур на алюминиевых подложках, измеренные при напряжении 3 В на частоте 100 Гц

Table 1. Electrical capacitances of film structures on aluminum substrates measured at 3 V and 100 Hz

Режим нанесения $\text{g-C}_3\text{N}_4$	Измеренная электрическая емкость, пФ, в структурах			Рассчитанная емкость $\text{g-C}_3\text{N}_4$, пФ, в $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$
	контрольной $\text{Al/Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$	экспериментальной		
		$\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$	$\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$	
$550^\circ\text{C}/3$ мин	620 (130 нм)	99	116	118
$550^\circ\text{C}/5$ мин	640 (115 нм)	85	90	99
$550^\circ\text{C}/7$ мин	802 (100 нм)	66	76	72

Из экспериментальных значений емкостей контрольных структур ($\text{Al/Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$), приведенных в табл. 1, по методике, описанной выше, при помощи уравнения (2) с учетом $\varepsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 9$ [8, 9] рассчитали толщины Al_2O_3 , оставшегося на поверхности подложки, на которую $\text{g-C}_3\text{N}_4$ не осаждался. Рассчитанные величины приведены в табл. 1 в скобках. Очевидно, что эти толщины меньше толщины Al_2O_3 (210 нм) до осаждения $\text{g-C}_3\text{N}_4$.

Как и в случае структур на кремнии, емкость экспериментальных двухслойных $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ -структур оказалась меньше, чем у контрольных, содержащих только одну диэлектричес-

кую пленку Al_2O_3 . Это позволило рассчитать емкостные характеристики $\text{g-C}_3\text{N}_4$ в структурах $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ при помощи уравнения (1). Рассчитанные таким образом емкости $\text{g-C}_3\text{N}_4$ в структурах $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ приведены в табл. 1. Полученные величины удовлетворительно согласуются с экспериментально измеренными на структурах $\text{Al/g-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$. Извлеченная из них $\varepsilon_{\text{g-C}_3\text{N}_4}$ находится в пределах 9–10, что меньше значения 14, полученного в предыдущих экспериментах.

Отмеченные выше закономерности проявляются во всем исследованном частотном диапазоне 100 Гц–1 МГц. Однако наиболее ярко они выражены на низких частотах. Рис. 5 иллюстрирует относительное изменение емкости анализируемых структур от частоты приложенного напряжения. У образцов на кремниевой подложке отмечено монотонное уменьшение их емкости с увеличением значения частоты. На контрольных образцах оно наиболее существенно – до 2–3 кГц, на экспериментальных при более высоких частотах – до 10–20 кГц. Относительное снижение емкости структур, изготовленных на алюминиевой подложке, с увеличением частоты менее значительно и происходит монотонно с увеличением частоты во всем исследованном диапазоне.

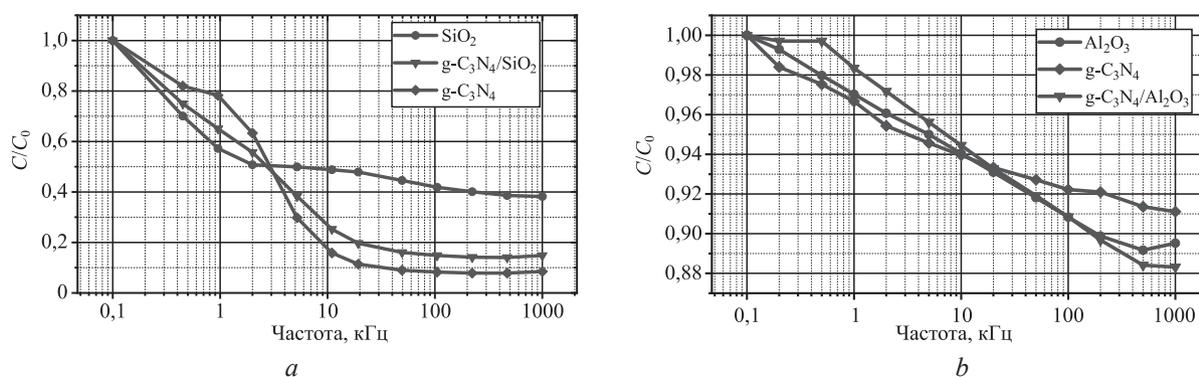


Рис. 5. Относительное изменение емкости пленочных структур на кремнии (а) и алюминии (b) в зависимости от частоты напряжения при постоянном смещении 3 В: C_0 – емкость при 100 Гц

Fig. 5. Relative change of the capacitance of film structures on silicon (a) and aluminum (b) as a function of voltage frequency at the 3 V constant bias: C_0 – capacitance at 100 Hz

Дополнительная термообработка при 120 °С уже сформированных структур с тонкопленочными алюминиевыми контактными площадками практически не приводит к изменению их емкости (рис. 6). При этом характер частотной зависимости емкости, состоящий в монотонном ее уменьшении по мере увеличения частоты, не меняется.

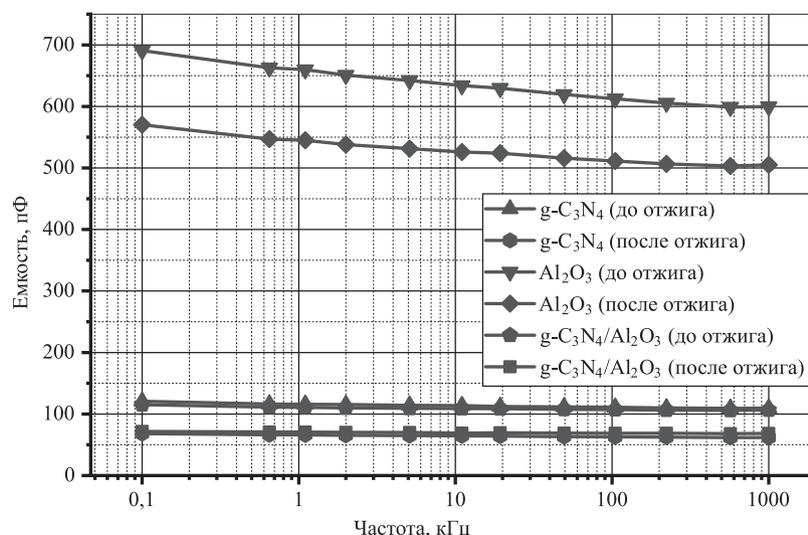


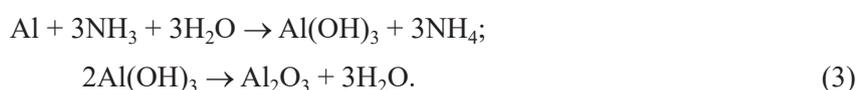
Рис. 6. Частотная зависимость емкости пленочных структур с $\text{g-C}_3\text{N}_4$ на алюминии до и после отжига при 120 °С

Fig. 6. Frequency dependence of the capacitance of $\text{g-C}_3\text{N}_4$ films on aluminum before and after annealing at 120 °С

Установившиеся значения емкостей и характер их частотной зависимости остаются практически неизменными даже после хранения отожженных образцов на воздухе при комнатной температуре в течение не менее 72 ч.

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные позволяют уточнить представления о реальном составе сформированных пленочных структур. В первую очередь обращает на себя внимание факт наличия на рентгенограммах структур Al/g-C₃N₄/Al дифракционных пиков, соответствующих гексагональному Al₂O₃. Поскольку аналогичных сигналов от структур на кремниевой подложке, у которых алюминий присутствует только в верхних контактах, не зарегистрировано, целесообразно заключить, что это соединение образовалось на границе g-C₃N₄ с алюминиевой подложкой в процессе его высокотемпературного осаждения. Известно [10], что при преобразовании меланина в g-C₃N₄ выделяется аммиак (NH₃), взаимодействие которого с алюминием в присутствии паров воды при повышенной температуре может приводить к образованию Al₂O₃:



Нельзя исключать и образование нитрида алюминия AlN



К сожалению, однозначно идентифицировать присутствие этого широкозонного полупроводника в исследуемых структурах не представляется возможным, поскольку положения его основных дифракционных пиков (36,16 град в направлении (002) и 38,02 град в направлении (101)) на рентгенограммах практически совпадают с пиками от Al₂O₃ (36,21 град в направлении (104) и 38,06 град в направлении (110)). На химическую активность выделяющегося аммиака указывает и уменьшение толщины ранее сформированной пленки Al₂O₃ на части образца, на которую g-C₃N₄ не осаждался (табл. 1). Так, если Al₂O₃, образующийся на границе g-C₃N₄/Al, оказывается защищенным от воздействия аммиака слоем g-C₃N₄, то в незащищенной части возможно его травление с последующим испарением продуктов реакции:



Образование Al₂O₃ на границе с g-C₃N₄, осажденного на алюминиевую подложку, объясняет пониженное значение диэлектрической проницаемости g-C₃N₄, рассчитанной из проведенных емкостных измерений, поскольку относится не к самому материалу, а к двухслойной пленочной структуре g-C₃N₄/Al₂O₃.

Частотные зависимости емкости изготовленных структур свидетельствуют об определяющей роли медленных механизмов релаксации находящихся в них зарядов. Наиболее вероятной их локализацией являются границы раздела g-C₃N₄. Присутствие в осажденном материале значительного количества атомов кислорода (до нескольких атомарных процентов), о чем сообщалось в [5], позволяет предположить, что эти зарядовые состояния связаны именно с кислородом, который собирается на границах раздела. Причем в структурах на алюминиевой подложке концентрация таких зарядовых состояний меньше, чем в структурах на кремниевой подложке, что, вероятно, связано с образованием геттерирующего кислород слоя Al₂O₃ между осаждаемым g-C₃N₄ и алюминием подложки. Незначительное уменьшение абсолютных значений емкости экспериментальных структур при остающемся неизменным характере их частотной зависимости после низкотемпературного (120 °С) отжига (рис. 6) говорит об адсорбции на их поверхности чужеродных атомов и молекул с низкой энергией связи с основными материалами этих структур. Удаление этих частиц термообработкой носит необратимый характер.

Заключение

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о существенной роли в емкостных свойствах пленочных структур, содержащих g-C₃N₄, зарядовых состояний на границах этого

материала с материалом подложки. Поскольку синтез $g\text{-C}_3\text{N}_4$ из меламина сопровождается выделением значительного количества аммиака, следует считаться с возможностью его химического взаимодействия с материалом подложки. В частности, при его взаимодействии в присутствии паров воды с алюминием возможно образование Al_2O_3 на границе $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{Al}$, что подтверждают данные рентгенодифракционного анализа. Не следует исключать такого рода взаимодействия и с другими материалами подложек, что требует последующих углубленных исследований.

Список литературы

1. Chen, Y. Graphitic Carbon Nitride Nanomaterials for High Performance Supercapacitors / Y. Chen, C. Lu // *Carbon Neutralization*. 2023. Vol. 2, No 5. P. 585–602. DOI: 10.1002/cnl2.87.
2. Thermal Vapor Condensation of Uniform Graphitic Carbon Nitride Films with Remarkable Photocurrent Density for Photoelectrochemical Applications / J. Bian [et al.] // *NanoEnergy*. 2015. Vol. 15. P. 353–361. DOI: 10.1016/j.nanoen.2015.04.012.
3. Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Layered Films / E. B. Chubenko [et al.] // *J. Phys. Chem.* 2022. Vol. 126, No 9. P. 4710–4714. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c10561.
4. CVD-синтез пленок графитоподобного нитрида углерода из меламина / Е. Н. Ермакова [и др.] // *Журнал неорганической химии*. 2023. Т. 68, № 2. С. 56–64.
5. Rapid Chemical Vapor Deposition of Graphitic Carbon Nitride Films / E. B. Chubenko [et al.] // *Materialia*. 2023. Vol. 28. DOI: 10.1016/j.mtla.2023.101724.
6. Боброва, Е. А. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП-структур, обусловленные зарядом в окисле / Е. А. Боброва, Н. М. Омеляновская // *Физика и техника полупроводников*. 2008. Т. 42. № 11. С. 1380–1383.
7. Кремниевые МОП-структуры с нестехиометрическими металлоксидными полупроводниками / Е. А. Тутов [и др.] // *Журнал технической физики*. 2006. Т. 76. № 12. С. 65–68.
8. Особенности измерения диэлектрической проницаемости тонких пленок МДП-структур / К. А. Воротилов [и др.] // *Вестник науки Сибири*. 2011. Т. 1, № 1. С. 220–228.
9. Patra, P. C. Dielectric Constant of Thin Film Graphitic Carbon Nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) and Double Dielectric $\text{Al}_2\text{O}_3/g\text{-C}_3\text{N}_4$ / P. C. Patra, Y. N. Mohapatra // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 118, No 10. DOI: 10.1063/5.0045911.
10. Graphitic Carbon Nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$)-Based Photocatalysts for Artificial Photosynthesis and Environmental Remediation: Are We a Step Closer to Achieving Sustainability? / W. J. Ong [et al.] // *Chem. Rev.* 2016. Vol. 116, No 12. DOI: 10.1039/D3SU00382E.

References

1. Chen Y., Lu C. (2023) Graphitic Carbon Nitride Nanomaterials for High Performance Supercapacitors. *Carbon Neutralization*. 2 (5), 585–602. DOI: 10.1002/cnl2.87.
2. Bian J., Li Q., Huang C., Li J., Guo Y., Zaw M., et al. (2015) Thermal Vapor Condensation of Uniform Graphitic Carbon Nitride Films with Remarkable Photocurrent Density for Photoelectrochemical Applications. *NanoEnergy*. 15, 353–361. DOI: 10.1016/j.nanoen.2015.04.012.
3. Chubenko E. B., Kovalchuk N. G., Komissarov I. V., Borisenko V. E. (2022) Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Layered Films. *J. Phys. Chem.* 126 (9), 4710–4714. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c10561.
4. Ermakova E. N., Maksimovsky E. A., Yushina I. V., Kosinova M. L. (2023) CVD Synthesis of Graphitic Carbon Nitride Films from Melamine. *Journal of Inorganic Chemistry*. 68 (2), 56–64 (in Russian).
5. Chubenko E. B., Maximov S. E., Bui C. D., Borisenko V. E., Pham V. T. (2023) Rapid Chemical Vapor Deposition of Graphitic Carbon Nitride Films. *Materialia*. 28. DOI: 10.1016/j.mtla.2023.101724.
6. Bobrova E. A., Omelyanovskaya N. M. (2008) Capacitance-Voltage Characteristics of MOS Structures Caused by Charge in the Oxide. *Physics and Technology of Semiconductors*. 42 (11), 1380–1383 (in Russian).
7. Tutov E. A., Ryabtsev S. V., Tutov E. E., Bormontov E. N. (2006) Silicon MOS Structures with Nonstoichiometric Metal Oxide Semiconductors. *Journal of Technical Physics*. 76 (12), 65–68 (in Russian).
8. Vorotylov K. A., Luchnikov P. A., Podgorny V. U., Seregin D. S. (2011) Features of Measuring the Permittivity of Thin Films of MIS Structures. *Bulletin of Science of Siberia*. 1 (1), 220–228 (in Russian).
9. Patra P. C., Mohapatra Y. N. (2021) Dielectric Constant of Thin Film Graphitic Carbon Nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) and Double Dielectric $\text{Al}_2\text{O}_3/g\text{-C}_3\text{N}_4$. *Appl. Phys. Lett.* 118 (10). DOI: 10.1063/5.0045911.
10. Ong W. J., Tan L. L., Ng Y. H., Yong S. T., Chai S. P. (2016) Graphitic Carbon Nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$)-Based Photocatalysts for Artificial Photosynthesis and Environmental Remediation: Are We a Step Closer to Achieving Sustainability? *Chem. Rev.* 116 (12). DOI: 10.1039/D3SU00382E.

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

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)

Максимов С. Е., студ. БГУИР

Уткина Е. А., канд. техн. наук, доц., доц. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Чубенко Е. Б., д-р. физ.-мат. 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 25 792-66-37
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)

Maximov S. E., Student, BSUIR

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

Chubenko E. B., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), 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 25 792-66-37
E-mail: v.tu2103@gmail.com
Pham Van Tung



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-14-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 535.323

ПАРАМЕТРЫ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ИЗ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ФАБРИ – ПЕРО В СПЕКТРАХ ЗЕРКАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ

И. В. ГАСЕНКОВА, Н. И. МУХУРОВ, И. М. АНДРУХОВИЧ

Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
(г. Минск, Республика Беларусь))

Поступила в редакцию 26.07.2024

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

Аннотация. Исследованы осцилляции Фабри – Перо в спектрах зеркального отражения в видимом диапазоне длин волн в зависимости от толщины анодного оксида алюминия. Формирование анодного оксида алюминия проводили в водном растворе 1,0 М H_2SO_4 с добавлением этиленгликоля в соотношении 1:1 воды и этиленгликоля. Определены условия получения оксидов, спектры отражения которых характеризуются высокой интенсивностью осцилляций и могут быть использованы в сенсорных структурах. С применением оптических осцилляций рассчитаны эффективные показатели преломления анодного оксида алюминия и установлено их увеличение на 0,04 в среде изопропилового спирта по сравнению с воздухом для образцов толщиной порядка 2–5 мкм. Показана возможность определения пористости анодного оксида алюминия по сдвигу осцилляций Фабри – Перо в средах с различными показателями преломления. Установлено хорошее согласие значений пористости, полученных из расчетов спектров отражений и электронно-микроскопических изображений.

Ключевые слова: анодный оксид алюминия, оптические свойства, эффективный показатель преломления, пористость, коэффициент отражения, оптическая толщина.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гасенкова, И. В. Параметры анодного оксида алюминия, определяемые из осцилляций Фабри – Перо в спектрах зеркального отражения / И. В. Гасенкова, Н. И. Мухуров, И. М. Андрухович // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-14-20>.

PARAMETERS OF ANODIC ALUMINA DETERMINED FROM FABRY – PEROT OSCILLATIONS IN SPECULAR REFLECTION SPECTRA

IRINA V. GASENKOVA, NIKOLAI I. MUKHUROV, IRYNA M. ANDRUKHOVICH

State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 26.07.2024

Abstract. The Fabry – Perot oscillations in specular reflection spectra in the visible wavelength range depending on the anodic alumina thickness have been investigated. The anodic alumina was formed in 1.0 M H_2SO_4 aqueous solution with the 1:1 water to ethylene glycol solution additive. The oxides fabrication conditions have been established whose reflection spectra were characterized by high intensity of oscillations to be used in sensor structures. Using these optical oscillations data, the anodic alumina effective refractive indices have been calculated; the increase by 0.04 has been revealed in the isopropyl alcohol solution compared to the air medium

for the 2 to 5 micrometer thick samples. The ability to determine the anodic alumina porosity using the Fabry – Perot oscillation shift in the different refractive indices media has been shown. A good agreement between the porosity values obtained from the reflection spectra calculations and the electron microscopic images has been established.

Keywords: anodic alumina, optical properties, effective refractive index, porosity, reflection coefficient, optical thickness.

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

For citation. Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Andrukhovich I. M. (2024) Parameters of Anodic Alumina Determined from Fabry – Perot Oscillations in Specular Reflection Spectra. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-14-20> (in Russian).

Введение

Взаимодействие света с наноструктурированным пористым анодным оксидом алюминия (АОА) приводит к появлению оптических свойств, которые представляют интерес как на уровне научных исследований, так и практического применения [1]. Особое внимание уделяется анодному оксиду с упорядоченным расположением пор и отличающимся различной степенью пористости наноразмерными слоями. Изученные их оптические свойства – наличие фотонной стоп-зоны, интерферометрические и фотолюминесцентные свойства, прозрачность в определенном диапазоне длин волн – могут быть применены к созданию биосенсоров, компонентов фотоники, таких как отражатели с распределенным эффектом Брэгга или фильтры с характеристическими фотонными полосами пропускания [2], а также сенсорные структуры с использованием фотолюминесценции (ФЛ) [3].

В пленках АОА с оптически гладкими поверхностями наблюдаемая в спектрах пропускания [4], отражения [5, 6], фотолюминесценции [4, 7] интерференция излучения характеризуется наличием осцилляций Фабри – Перо. Было исследовано влияние структурных параметров АОА, включая диаметры пор, расстояние между порами, длину пор, модификации поверхности осаждением тонкопленочных Au, Ag, Cr, Pt, Ni и TiO₂ на количество полос Фабри – Перо и интенсивность спектра АОА [7]. С учетом систематического исследования влияния длины пор и их диаметров на спектры зеркального отражения в АОА, в [8] предложена система штрихкодов для оценки чувствительности оптических биосенсоров к изменениям среды в порах оксида.

В [9] показано, что пористость АОА в диапазоне от 14 до 70 % и модификация оксида нанесением тонких (10 и 20 нм) слоев золота значительно улучшают контрастность колебаний в спектре отражения. Исследовано и подтверждено влияние температуры электролита на количество и интенсивность колебаний, обусловленных интерференцией Фабри – Перо, в наблюдаемых спектрах ФЛ пленок АОА. Повышение температуры электролита при формировании оксида способствовало росту числа осцилляций с одновременным уменьшением их амплитуды [10].

Наличие осцилляций Фабри – Перо в оптических спектрах АОА при проведении спектроскопии зеркального отражения [8, 10, 11] и ФЛ [11, 12] позволяет определять эффективный показатель преломления материала и его изменения при взаимодействии анализируемого вещества с АОА. Показатель преломления, определяемый по осцилляциям, и его зависимость от морфологических характеристик АОА, которыми можно управлять при формировании оксида, дают возможность использовать АОА в качестве платформы для оптических датчиков и биосенсоров [13]. Аналитическим сигналом в них является сдвиг спектрального положения осцилляций Фабри – Перо при изменении среды. В [14] предложен альтернативный подход – использовать в качестве аналитического сигнала для оптических датчиков многофакторный анализ. Исследованы изменения оптических спектров с увеличением концентрации глюкозы и создана количественная регрессионная модель для определения концентраций глюкозы по спектрам ФЛ. Результаты показали, что многофакторный анализ может быть использован при интерференциях Фабри – Перо для получения откликов оптических датчиков.

Интерференция Фабри – Перо в оптических спектрах рассмотрена для пленок АОА, сформированных в простых электролитах, а также изучены осцилляции в спектрах фотолюминесценции. В литературе отсутствуют данные о возможности использования сложных электролитов для получения сенсорных платформ пористого оксида алюминия, обеспечивающих достаточную отражательную способность для получения высокоточного интерферометрического спектра отражения. В статье рассмотрены условия формирования в вязком электролите пригодной для сенсорных приложений морфологии АОА и показана возможность определения пористости оксида

по изменению спектрального положения осцилляций Фабри – Перо в спектрах зеркального отражения в среде изопропилового спирта.

Методика формирования образцов

На начальном этапе алюминиевая фольга А99 толщиной (100 ± 2) мкм была очищена в бензине при температуре $80\text{ }^\circ\text{C}$, отрихтована при $160\text{ }^\circ\text{C}$, а затем электрохимически отполирована в растворе оксида шестивалентного хрома и ортофосфорной кислоты. Использовали импульсный режим полировки при общем количестве импульсов 40, длительности импульсов 3 с, паузе между ними 40 с и плотности тока 400 mA/cm^2 . Анодирование алюминия осуществляли в двух-электродной электрохимической ячейке объемом 2 л с катодом из пластины алюминия. В качестве электролита использовали водный раствор $1,0\text{ M H}_2\text{SO}_4$ с добавлением этиленгликоля в соотношении 1:1 воды и этиленгликоля. Электролит интенсивно перемешивался, его температура поддерживалась с помощью термостата и составляла $5\text{ }^\circ\text{C}$. Анодирование проводили в потенциостатическом режиме при напряжении 25 В до достижения значений протекающего электрического заряда 2, 4, 10, 14, 20 Кл при площади образцов 1 cm^2 .

Спектры зеркального отражения образцов измеряли при комнатной температуре на воздухе и в среде изопропилового спирта. Зеркальное отражение исследовали с помощью спектрофотометра MC 122 Proscan Special Instrument, а морфологию и толщину образцов – на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-4800 (Япония) в режиме вторичных электронов.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены спектры отражения образцов АОА, полученные в потенциостатическом режиме при напряжении 25 В и плотности электрического заряда Q в процессе анодирования 2, 4, 10, 14, 20 Кл/см². В спектрах зеркального отражения отчетливо видны интенсивные осцилляции коэффициента отражения, которые объясняются резонансами Фабри – Перо для света, проходящего сквозь весь образец АОА толщиной d , и подтверждают высокую однородность толщины этих образцов.

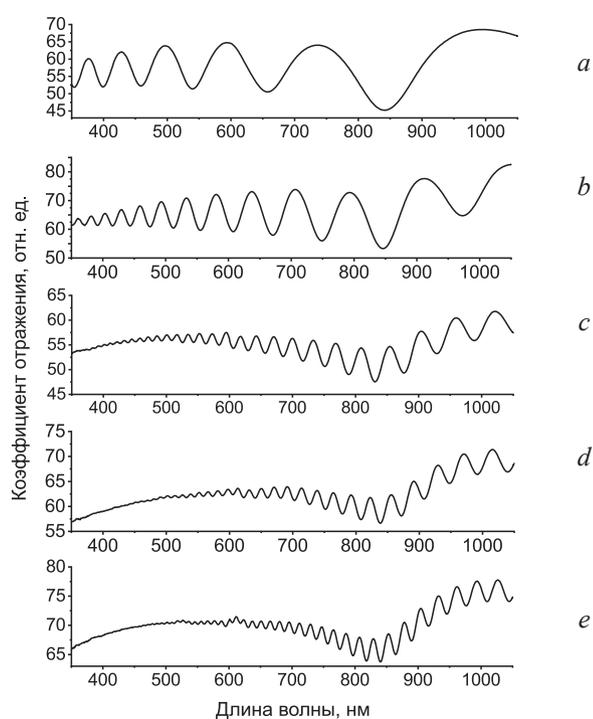


Рис. 1. Спектральная зависимость зеркального отражения пленок анодного оксида алюминия, сформированных при прохождении заряда, Кл: *a* – 2; *b* – 4; *c* – 10; *d* – 14; *e* – 20

Fig. 1. Spectral dependence of the mirror reflection of anodic aluminum oxide films formed during the passage of a charge, C: *a* – 2; *b* – 4; *c* – 10; *d* – 14; *e* – 20

Различия в спектрах отражения связаны с амплитудой и частотой интерференционных полос. Для АОА, полученного при Q , равном 2 и 4 Кл/см², в спектрах отчетливо видны интенсивные осцилляции Фабри – Перо в диапазоне длин волн более 400 нм (рис. 1, *a, b*). Оксидная пленка, полученная при 10 Кл/см², характеризуется спектром с высоким разрешением пиков в диапазоне длин волн более 500 нм и большим количеством полос (рис. 1, *c*). Колебания Фабри – Перо в спектрах образцов, полученных при значениях Q , равных 14 и 20 Кл/см², слабые или полностью отсутствуют в видимой области (рис. 1, *d, e*).

Расстояние между соседними пиками оптической интерференции Фабри – Перо увеличивается с длиной волны в соответствии с соотношением

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d \left[n - \lambda \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \right]}, \quad (1)$$

где λ – длина волны света; n – показатель преломления АОА; d – толщина образца; $dn/d\lambda$ – дисперсия материала.

Для более коротких длин волн соседние колебания не могут быть разрешены, поэтому в коротковолновой части спектра наблюдается исчезновение оптических интерференционных полос Фабри – Перо. Согласно (1), расстояние между пиками оптической интерференции Фабри – Перо уменьшается из-за увеличения толщины пленки при том же λ . Это хорошо видно на рис. 1.

Типичные РЭМ-изображения АОА показаны на рис. 2 на примере образцов, сформированных при количестве электричества 4 и 10 Кл/см². Пленки имеют гексагонально упорядоченные ячейки с порами в центре, среднее значение диаметров которых 25,8 нм. Средний диаметр ячеек D_{int} практически постоянен и составляет 61,5 нм для образца с $Q = 4$ Кл/см² и 65,1 нм – с $Q = 10$ Кл/см². Согласно результатам анализа РЭМ-изображений, толщина пленок АОА, полученного при температуре 5 °С и напряжении 25 В, составляет 2,11 мкм для образца с зарядом формирования 4 Кл (рис. 2, *a, c*) и 4,81 мкм – для образца с 10 Кл (рис. 2, *b, d*).

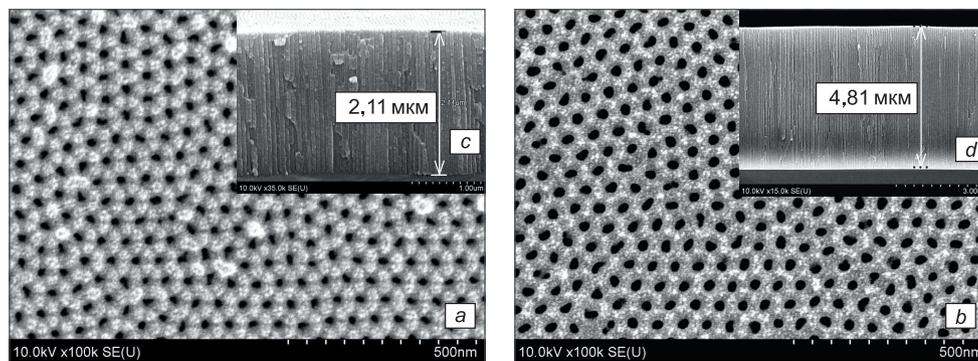


Рис. 2. РЭМ-изображение поверхности образцов, сформированных при $Q = 4$ Кл (*a, c*) и $Q = 10$ Кл (*b, d*) со стороны электролит–анодный оксид алюминия (*a, b*) и скола (*c, d*)

Fig. 2. The surface SEM images for the samples formed at $Q = 4$ C (*a, c*) and $Q = 10$ C (*b, d*) from the side electrolyte–anodic aluminum oxide (*a, b*) and the cleavage (*c, d*)

Таким образом, пленки толщиной 2,11 и 4,81 мкм были выбраны для изучения зависимости эффективного показателя преломления пленок от показателя преломления вещества, заполняющего поры, и использования в сенсорных структурах, поскольку им соответствуют на спектрах отражения осцилляции максимальной интенсивности и количества. Для оценки изменения оптических свойств АОА при заполнении пор веществами с показателем преломления по сравнению с воздухом больше единицы были сняты спектры зеркального отражения в среде изопропилового спирта (рис. 3). Графики разнесены по вертикальной оси для удобства восприятия.

Показатель преломления изопропилового спирта ($n = 1,378$) больше показателя преломления воздуха ($n = 1,000$), поэтому, согласно формуле [15]:

$$n_{эф} = \sqrt{n_{Al_2O_3}^2 (1 - P) + n_{среды}^2 P}, \quad (2)$$

где $n_{Al_2O_3}$ – показатель преломления стенок ячеек анодного оксида; $n_{среды}$ – показатель преломления заполняющего поры вещества; P – пористость АОА.

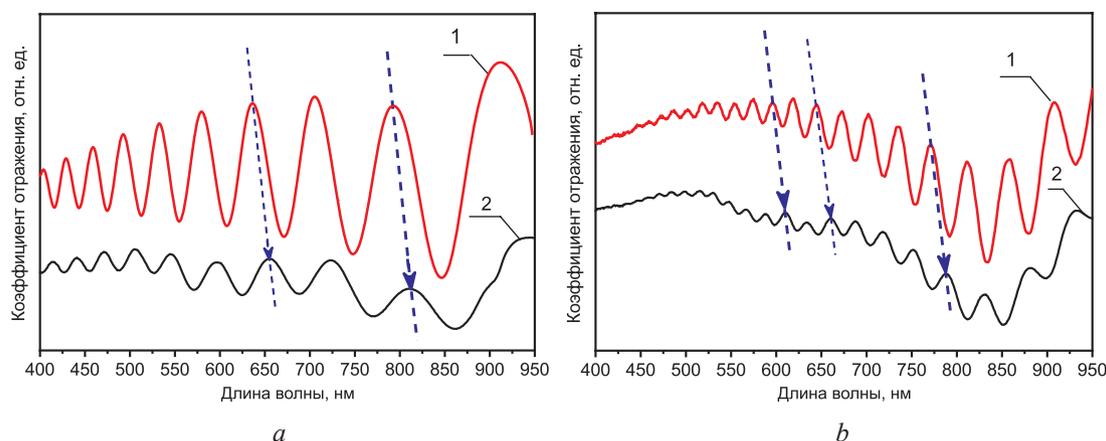


Рис. 3. Спектры отражения исходных (1) и пропитанных изопропиловым спиртом (2) образцов анодного оксид алюминия, полученных при Q , Кл/см²: $a - 4$; $b - 10$; смещение осцилляций Фабри – Перо показано стрелками
Fig. 3. Reflectance spectra of the initial (1) and isopropyl alcohol-impregnated (2) samples of anodic aluminum oxide obtained at Q , C/cm²: $a - 4$; $b - 10$; the shift of the Fabry-Perot oscillations is shown by arrows

Эффективный показатель преломления АОА будет расти при заполнении пор и обуславливать сдвиг осцилляций Фабри – Перо в область более длинных волн (рис. 3). По положению максимумов осцилляций Фабри – Перо в спектрах зеркального отражения определены значения эффективного показателя преломления пленок анодного оксида на воздухе и помещенных в изопропиловый спирт по формуле

$$n_{\text{эф}}^2 = \left(\frac{N_2 - N_1}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)d} \right)^2 + \sin^2 \theta, \quad (3)$$

где N_1, N_2 – номер максимума коэффициента отражения; λ_1, λ_2 – соответствующая максимумам коэффициента отражения длина волны, нм; θ – угол падения светового пучка на образец.

Оптическая толщина определялась умножением эффективного показателя преломления на геометрическую толщину, определенную по данным анализа РЭМ-изображений (рис. 2). Значения показателей преломления и оптической толщины представлены в табл. 1.

Таблица 1. Оптические характеристики спектров зеркального отражения образцов анодного оксида алюминия

Table 1. Optical characteristics of specular reflection spectra of anodic aluminum oxide samples

Плотность электрического заряда Q , Кл/см ²	Среда	Положение пика, нм		Толщина образца d по данным РЭМ, мкм	Оптическая толщина nd	Эффективный показатель преломления $n_{\text{эф}}$
		λ_1	λ_2			
4	1	392	671	2,11	3,31	1,57
	2	402	688		3,40	1,61
10	1	606	685	4,81	7,94	1,65
	2	623	675		8,13	1,69

Примечание – 1 – воздух; 2 – изопропиловый спирт.

Таким образом, для образцов с $Q = 4$ и $Q = 10$ Кл/см² установлено одинаковое увеличение эффективного показателя преломления на 0,04. Следовательно, пленки, полученные анодированием алюминия при приведенных выше условиях, могут быть использованы для применения в сенсорных структурах.

Исходя из оптических характеристик образцов, можно определить пористость АОА. Из формулы (2) следует, что квадрат эффективного показателя преломления АОА линейно зависит от квадрата эффективного показателя преломления среды, при этом значение углового коэффициента будет равно значению пористости. Линеаризация полученных экспериментальных данных (рис. 4) эффективного показателя преломления для воздуха (1,57 и 1,65) и для изопропилового спирта (1,61 и 1,69) имеет вид $n_{\text{эф}}^2 = 2,5577 + 0,1576n_{\text{среды}}^2$ для пленок АОА,

сформированных при плотности электрического заряда в процессе анодирования 4 Кл/см², и $n_{эф}^2 = 2,3336 + 0,1421n_{среды}^2$ – при 10 Кл/см².

В соответствии с данными рис. 4 значение углового коэффициента равно 0,1421 для АОА, полученного при величине протекающего заряда 4 Кл, следовательно, пористость составляет 14,21 %. Для АОА, полученного при 10 Кл, угловой коэффициент равен 0,1576, и пористость составляет 15,76 %. Следует отметить, что эти значения хорошо согласуются с данными, полученными из анализа РЭМ-изображений. С учетом измерений с помощью РЭМ определены средний диаметр пор и ячеек образцов АОА и рассчитана пористость по формуле

$$P = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D_p}{D_{int}} \right)^2, \quad (4)$$

где D_p – диаметр поры; D_{int} – диаметр ячейки.

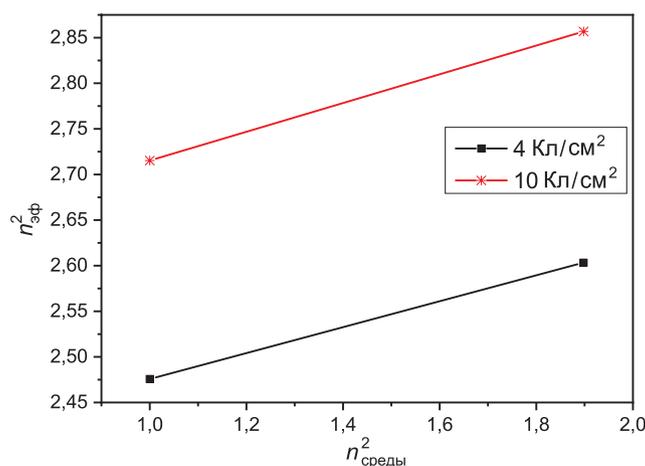


Рис. 4. Линейная аппроксимация экспериментальных данных квадрата эффективного показателя преломления анодного оксида алюминия от квадрата показателя преломления среды

Fig. 4. Linear approximation of experimental data of the square of the effective refractive index of anodic aluminum oxide from the square of the refractive index of the medium

Значения пористости составили 14,24 % для образца с зарядом формирования 4 Кл и 15,96 % – с зарядом формирования 10 Кл. Разница в пористости при расчете через средний диаметр пор и ячеек и при вычислении через линейную аппроксимацию экспериментальных данных квадрата эффективного показателя преломления составляет не более 0,2 %.

Заключение

1. Показана возможность применения вязких электролитов на основе серной кислоты и приведены режимы формирования слоев анодного оксида алюминия, которые обеспечивают получение спектров отражения с хорошо различимыми максимумами осцилляций Фабри – Перо.

2. Определены эффективные показатели преломления, оптическая толщина образцов анодного оксида алюминия, полученных при напряжении 25 В и при плотностях электрического заряда 4 и 10 Кл/см², которые соответствуют геометрической толщине 2,11 и 4,81 мкм на воздухе и в среде изопропилового спирта. Установлено одинаковое увеличение эффективного показателя преломления на 0,04 в изопропиловом спирте в сравнении с воздухом для данных образцов. Это подтверждает возможность использования анодного оксида алюминия в оптических сенсорных структурах.

3. По изменению спектрального положения максимумов осцилляций Фабри – Перо на спектрах зеркального отражения определена пористость анодного оксида алюминия, которая согласуется со значениями пористости, полученными методом электронной микроскопии.

Список литературы / References

1. Ferre-Borrull J., Xifré-Pérez E., Pallares J., Marsal L. (2015) Optical Properties of Nanoporous Anodic Alumina and Derived Applications. *Springer Series in Materials Science*. 219, 185–217. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-20334-8_6.

2. Acosta Capilla L., Berto-Rosello F., Xifré-Pérez E., Santos A., Ferre-Borrull J., Marsal L. (2019) Filters with Tunable Multispectral Photonic Stopbands as Sensing Platforms. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 11 (3), 3360–3371. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.8b19411>.
3. Choudhari K. S., Suresh D., Kulkarni, Unnikrishnan V. K., Rajeev K., Sinha, Santhosh C., Sajan D. George (2019) Optical Characterizations of Nanoporous Anodic Alumina for Thickness Measurements Using Interference Oscillations. *Nano-Structures & Nano-Objects*. 19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100354>.
4. Xu W. L., Chen H., Zheng M. J., Ding G. Q., Shen W. Z. (2006) Optical Transmission Spectra of Ordered Porous Alumina Membranes with Different Thicknesses and Porosities. *Opt. Mater.* 28, 1160–1165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2005.07.003>.
5. Trivinho-Strixino F., Guerreiro H. A., Gomes C. S., Pereira E. C., Guimaraes F. E. G. (2010) Active Waveguide Effects from Porous Anodic Alumina: An Optical Sensor Proposition. *Appl. Phys. Lett.* 97, 011902–011904. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3447375>.
6. Kant K., Low S. P., Marshal A., Shapter J. G., Losic D. (2010) Nanopore Gradients on Porous Aluminum Oxide Generated by Nonuniform Anodization of Aluminum. *ACS Appl. Interfaces*. 2 (12), 3447–3454. <https://doi.org/10.1021/am100502u>.
7. Gardelis S., Nassiopoulou A. G., Giannetta V., Theodoropoulou M. (2010) Photoluminescence Induced Oscillations in Porous Anodic Aluminum Oxide Films Grown on Si: Effect of the Interface and Porosity. *J. Appl. Phys.* 107, 113104–113108. <https://doi.org/10.1063/1.3432694>.
8. Santos A., Balderrama V. S., Alba M., Formentín P., Ferré-Borrull J., Pallarés J., et al. (2012) Tunable Fabry-Pérot Interferometer Based on Nanoporous Anodic Alumina for Optical Biosensing Purposes. *Nanoscale Res. Lett.* 7. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-370>.
9. Hernandez L., Ferre-Borrull J., Macias G., Pallarés J., Marsal L. (2014). Engineering Optical Properties of Gold-Coated Nanoporous Anodic Alumina for Biosensing. *Nanoscale Research Letters*. 9. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-414>.
10. Cantelli L., Santos J. S., Trivinho-Strixino F. (2016) The Effect of Anodization Temperature on Optical Properties of Nanoporous Anodic Alumina (NAA) Films. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 780, 386–390. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.01.009>.
11. Kumeria T., Santos A., Losic D. (2013) Ultrasensitive Nanoporous Interferometric Sensor for Label-Free Detection of Gold(III) Ions. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 5 (22), 11783–11790. <https://doi.org/10.1021/am403465x>.
12. Alekseev S., Lysenko V., Zaitsev V., Barbier D. (2007) Application of Infrared Interferometry for Quantitative Analysis of Chemical Groups Grafted onto the Internal Surface of Porous Silicon Nanostructures. *The Journal of Physical Chemistry C*. 111 (42), 15217–15222. <https://doi.org/10.1021/jp0712452>.
13. Santos A., Kumeria T., Losic D. (2013) Nanoporous Anodic Aluminum Oxide for Chemical Sensing and Biosensors. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 44, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.11.007>.
14. Ferro L., Lemos S., Ferreira M., Trivinho-Strixino F. (2017) Use of Multivariate Analysis on Fabry-Prerot Interference Spectra of Nanoporous Anodic Alumina (NAA) for Optical Sensors Purposes. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 248, 718–723. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.051>.
15. Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Andrukhovich I. M. (2023) Anodizing Aluminum in a Viscous Electrolyte to Produce One-Dimensional Photonic Crystals. *Vesti National Academy of Sciences of Belarus. Gray Physics-Technical Sciences*. 68 (1), 7–17. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-7-17>.

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Гасенкова И. В., д-р физ.-мат. наук, доц., гл. науч. сотр., Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (ГНПО «ООЛТ»)

Мухуров Н. И., д-р техн. наук, проф., зав. лаб., ГНПО «ООЛТ»

Андрухович И. М., канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ГНПО «ООЛТ»

Адрес для корреспонденции

220090, Республика Беларусь
г. Минск, Логойский тракт, 22
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Тел.: +375 17 242-32-30
E-mail: mukhurov@oelt.basnet.by
Мухуров Николай Иванович

Information about the authors

Gasenkova I. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Leading Researcher, State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology” (SSPA “OOLT”)

Mukhurov N. I., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Laboratory, SSPA “OOLT”

Andrukhovich I. M., Cand. of Sci., Senior Researcher, SSPA “OOLT”

Address for correspondence

220090, Republic of Belarus,
Minsk, Logoiskii Trakt, 22
SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”
Tel.: +375 17 242-32-30
E-mail: mukhurov@oelt.basnet.by
Mukhurov Nikolai Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-21-28>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.357.74-022.532:669.056.91

ЗОЛЬ-ГЕЛЬ-СИНТЕЗ МОНОДИСПЕРСНЫХ ГЛОБУЛ КРЕМНЕЗЕМА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УПОРЯДОЧЕННЫХ И НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Н. В. ГАПОНЕНКО¹, С. М. КЛЕЩЕВА, Е. И. ЛАШКОВСКАЯ¹, В. А. ЛАБУНОВ¹,
И. Л. МАРТЫНОВ², А. А. ЧИСТЯКОВ², Н. И. КАРГИН², Т. Ф. РАЙЧЕНОК³,
Л. В. СУДНИК⁴, А. Р. ЛУЧЕНОК⁴, М. ВАНГ⁵

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

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва, Российская Федерация)

³Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)

⁴Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа
(г. Минск, Республика Беларусь)

⁵Сианьский университет Цзяо Тун (г. Сиань, Китайская Народная Республика)

Поступила в редакцию 06.09.2024

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

Аннотация. Золь-гель-методом синтезированы монодисперсные глобулы кремнезема размерами около 250–300 нм, составляющие основу для синтеза искусственных опалов – трехмерных фотонных кристаллов и неупорядоченных опаловых матриц. Синтезированы матовые покрытия на кварцевом стекле, состоящие из монодисперсных глобул кремнезема и ксерогеля титаната бария, легированного эрбием и иттербием, демонстрирующие ап-конверсионную люминесценцию эрбия. Показано вызванное термообработкой изменение полосы непрозрачности (фотонной запрещенной зоны) в спектрах отражения синтетических опалов, содержащих ксерогель титаната бария и остатки не удаленного термообработкой этиленгликоля.

Ключевые слова: золь-гель-метод, искусственный опал, фотонный кристалл, ап-конверсия, люминесценция эрбия, ксерогель титаната бария.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф22КИТГ-008, № Х23М-044, № Т23РНФ-147 и задания 3.5 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций». Авторы выражают благодарность В. Д. Живулько и Д. В. Жигулину за помощь при анализе образцов.

Для цитирования. Золь-гель-синтез монодисперсных глобул кремнезема и оптические свойства упорядоченных и неупорядоченных материалов на их основе / Н. В. Гапоненко [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-21-28>.

SOL-GEL SYNTHESIS OF MONODISPERSE SILICA GLOBULES AND OPTICAL PROPERTIES OF ORDERED AND DISORDERED MATERIALS BASED ON THEM

NIKOLAI V. GAPONENKO¹, SVETLANA M. KLESHCHEVA,
EKATERINA I. LASHKOVSKAYA¹, VLADIMIR A. LABUNOV¹, IGOR L. MARTYNOV²,
ALEXANDER A. CHISTYAKOV², NIKOLAI I. KARGIN², TAMARA F. RAICHENOK³,
LARISA V. SUDNIK⁴, ALEXEI R. LUCHANOK⁴, MINQIANG WANG⁵

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

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russian Federation)

³B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

⁴Powder Metallurgy Institute (Minsk, Republic of Belarus)

⁵Xi'an Jiaotong University (Xi'an, People's Republic of China)

Submitted 06.09.2024

Abstract. Monodisperse silica globules of about 250–300 nm in size have been synthesized by the sol-gel method. These globules form the basis for the synthesis of artificial opals – three-dimensional photonic crystals and disordered opal matrices. Matte coatings on quartz glass consisting of monodisperse silica globules and barium titanate xerogel doped with erbium and ytterbium, demonstrating up-conversion luminescence of erbium, have been synthesized. A change in the photonic band gap caused by heat treatment in the reflectance spectra of synthetic opals containing barium titanate xerogel and residues of ethylene glycol not removed by heat treatment has been shown.

Keywords: sol-gel method, artificial opal, photonic crystal, up-conversion, erbium luminescence, barium titanate xerogel.

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

Gratitude. The work was sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research Projects No F22KITG-008, No X23M-044, No T23RNF-147 and task 3.5 of the State Program of Scientific Research “Photonics and Electronics for Innovations”. The authors express their gratitude to V. D. Zhivulko and D. V. Zhigulin for assistance in analyzing the samples.

For citation. Gaponenko N. V., Kleshcheva S. M., Lashkovskaya E. I., Labunov V. A., Martynov I. L., Chistyakov A. A., et al. (2024) Sol-Gel Synthesis of Monodisperse Silica Globules and Optical Properties of Ordered and Disordered Materials Based on Them. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-21-28> (in Russian).

Введение

Монодисперсные глобулы кремнезема размерами около нескольких сотен нанометров синтезируются из раствора тетраэтоксисилана [1]. Глобулы кремнезема используются для получения синтетических опалов – драгоценных камней и трехмерных фотонных кристаллов, оптические свойства которых могут быть модифицированы за счет введения золь в поры и формирования в порах опалов ксерогелей при последующей термообработке, а также при введении в поры жидкостей [2–6]. Опаловые матрицы, представляющие собой упорядоченную упаковку монодисперсных глобул, используются также для формирования фотонных кристаллов с перестраиваемой фотонной запрещенной зоной и инвертированных опалов [7]. В [4, 5, 8] рассмотрена интенсивная люминесценция лантаноидов и квантовых точек, зависящая от положения фотонной запрещенной зоны (полосы непрозрачности) опалов и инвертированных опалов. Представляет дальнейший интерес исследование оптических свойств упорядоченных и неупорядоченных матриц на основе монодисперсных глобул кремнезема для их практического применения в качестве сенсоров, рассеивающих сред и люминофоров. В статье исследованы оптические спектры композитов, состоящих из монодисперсных глобул кремнезема, выполненные в виде люминесцентных покрытий, упорядоченных и неупорядоченных опаловых матриц.

Проведение эксперимента

Для работы с опаловыми матрицами использовались синтезированные ранее по методике [2] упорядоченные опаловые матрицы с фотонной запрещенной зоной в видимом диапазоне, а также синтезированные в лаборатории нанофотоники БГУИР монодисперсные глобулы и опаловые матрицы на их основе, спрессованные методом взрывного прессования [9]. Монодисперсные

глобулы использовались также для формирования суспензии с золей титаната бария, содержащим эрбий и иттербий. Для синтеза монодисперсных глобул кремнезема применялись этиловый спирт (этанол), тетраэтоксисилан ($C_2H_5O)_4Si$, аммиак и дистиллированная вода. Полученную смесь интенсивно перемешивали 4 ч. Затем сформированные монодисперсные глобулы смешивали с золей титаната бария и полученную суспензию наносили на кварцевое стекло с последующей термообработкой. Золь титаната бария, содержащий эрбий и иттербий, был изготовлен по методике [9]. В качестве исходных компонентов синтеза золя использовали изопропоксид титана ($Ti(OC_3H_7)_4$), ацетат бария ($Ba(CH_3COO)_2$), гидрат ацетата эрбия ($Er(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$), гидрат ацетата иттербия ($Yb(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$), ацетилацетон ($CH_3COCH_2COCH_3$) и уксусную кислоту (CH_3COOH). Золь оксида титана с европием для пропитки опаловой матрицы был получен на основе изопропоксида титана, гидрата нитрата европия ($Eu(CH_3COO)_3 \cdot xH_2O$), изопропилового спирта ($CH_3CH(OH)CH_3$) и азотной кислоты HNO_3 .

Упорядоченные опаловые матрицы использовались для пропитки этиленгликолем с последующим нагревом и регистрации спектров отражения при нагреве. Опаловые матрицы, синтезированные взрывным прессованием, использовались для анализа спектров отражения при комнатной температуре, пропитки золей, содержащих европий, и возбуждения люминесценции европия. Суспензию из монодисперсных глобул и золя титаната бария наносили на кварцевое стекло методом центрифугирования со скоростью 2200 об/мин с последующей термообработкой при температуре 900 °C в течение 30 мин.

Ап-конверсионную люминесценцию возбуждали непрерывным лазерным излучением с длиной волны возбуждения 980 нм [9]. Люминесценция европия регистрировалась на спектрофлуориметре CM 2203 (Solar, Беларусь). Морфология полученных образцов исследовалась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) S-4800 (Hitachi, Япония). Спектры отражения и пропускания измерялись на спектрофотометрах Cary-500 Scan UV-VIS NIR (Varian, США-Австралия) и MC 122 (ООО «СОЛ Инструментс», Беларусь). Спектры отражения в диапазоне температур 20–130 °C исследовались с помощью спектрометра Ocean optics USB2000+, укомплектованного волоконным зондом отражения QR200-7-UV-VIS. В качестве источника освещения использовалась галогенная вольфрамовая лампа LS-1. При проведении эксперимента образец располагался на нагревательном столике. Температура поверхности образца контролировалась с помощью термопары, прижатой к образцу сверху. Характерная скорость нагрева составляла около 1 °C/мин. В температурном диапазоне 70–80 °C образец нагревался медленнее. Суммарно время выдержки образца в этом диапазоне температур составило 20 мин. Охлаждение происходило естественным путем.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены типичные РЭМ-изображения монодисперсных глобул кремнезема, полученные модифицированным методом Штобера. Размер глобул – около 300 нм.

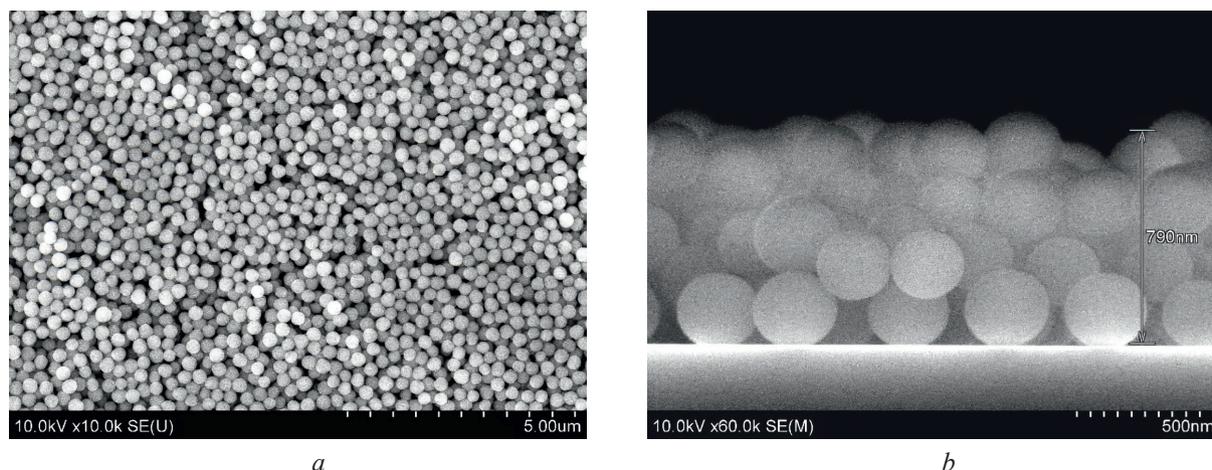


Рис. 1. РЭМ-изображения образцов, полученных центрифугированием суспензии монодисперсных глобул при увеличении: *a* – 10 000; *b* – 50 000

Fig. 1. SEM images of samples obtained by centrifugation of a suspension of monodisperse globules at magnification: *a* – 10 000; *b* – 50 000

Перемешивание суспензии из монодисперсных глобул SiO_2 и золя титаната бария, содержащего компоненты эрбия и иттербия, и ее последующее нанесение на кварцевое стекло приводят к формированию матового твердотельного покрытия с низкой прозрачностью, обусловленной рассеянием видимого света. На рис. 2 показаны: *a* – внешний вид покрытия на черном фоне с изображением цветного пятна в области облучения лазером с длиной волны $\lambda_{ex} = 980$ нм; *b* – спектр ап-конверсионной люминесценции покрытия для $\lambda_{ex} = 980$ нм; *c* – РЭМ-изображение покрытия из монодисперсных глобул и ксерогеля титаната бария, легированного эрбием и иттербием; *d* – спектры пропускания кварцевого стекла с покрытием и исходной подложки кварцевого стекла без покрытия.

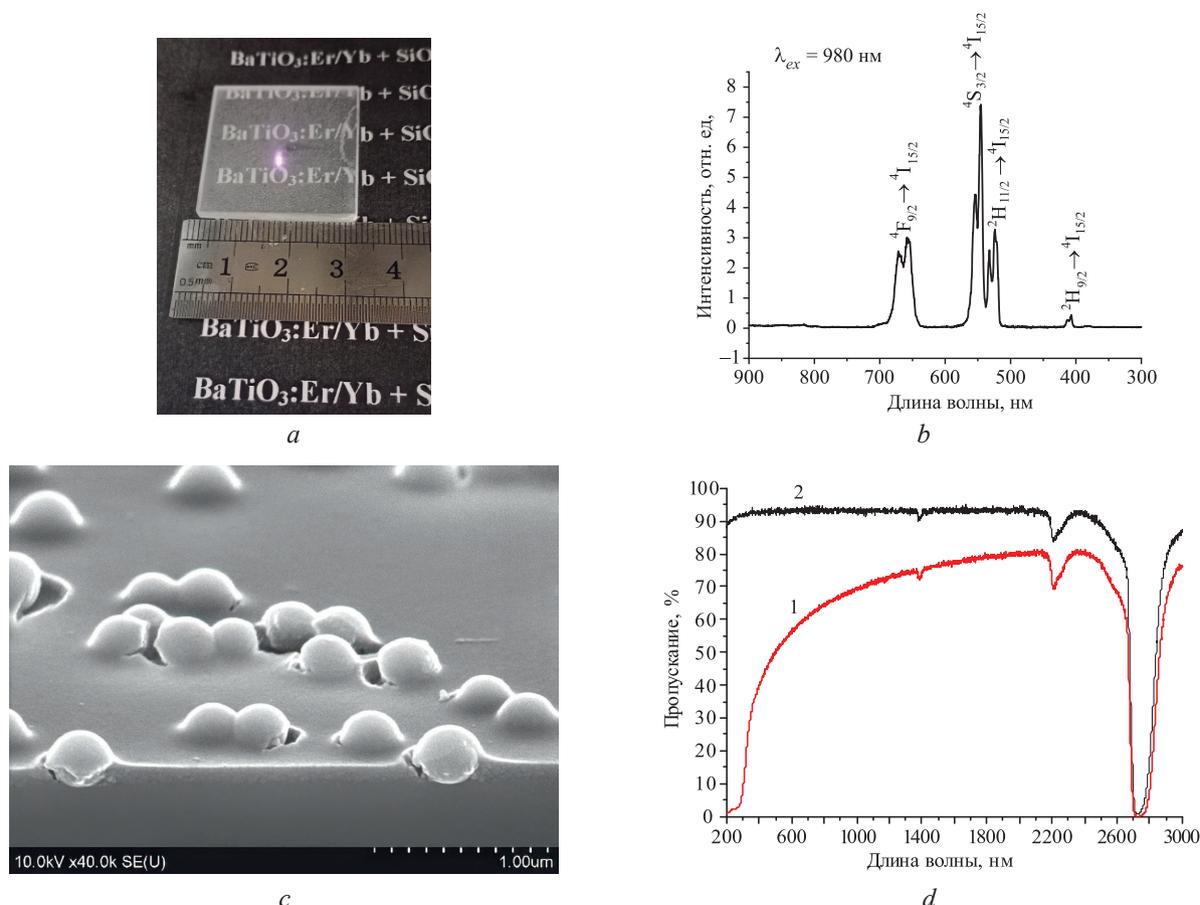


Рис. 2. Внешний вид (*a*), спектр ап-конверсионной люминесценции покрытия (*b*), РЭМ-изображение покрытия из монодисперсных глобул и ксерогеля титаната бария (*c*), спектры пропускания (*d*):

1 – кварцевого стекла с покрытием; 2 – исходной подложки кварцевого стекла без покрытия

Fig. 2. Appearance (*a*), spectrum of up-conversion luminescence of the coating (*b*), SEM image of coatings made of monodisperse globules and barium titanate xerogel (*c*), transmission spectra (*d*):

1 – quartz glass with coating; 2 – original quartz glass substrate without coating

Описанные суспензии могут найти применение для декорирования стекла и других поверхностей, при этом дополнительной опцией является люминесценция внедренных в покрытие люминофоров, что может быть использовано в технологии защиты изделия от подделки или несанкционированного проникновения лазерного излучения ИК-диапазона. В качестве примера на рис. 2, *a* можно наблюдать изображение ап-конверсионной люминесценции в области облучения ИК-лазером. Приведенный на рис. 2, *b* спектр ап-конверсионной люминесценции покрытия характеризуется наличием нескольких полос фотолюминесценции на длинах волн 410, 523, 546 и 658 нм, соответствующих переходам $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ трехвалентных ионов эрбия.

При достижении упорядочения монодисперсных глобул кремнезема формируются синтетические опалы [2, 3], демонстрирующие фотонную запрещенную зону визуально и при регистрации спектров отражения и пропускания. Пропитка опала этиленгликолем приводит к его

адсорбции. Нагрев опала, содержащего ксерогель титаната бария и остатки этиленгликоля, приводит к испарению компонентов этиленгликоля, что вызывает существенное изменение спектра его отражения в области положения фотонной запрещенной зоны (полосы непрозрачности), характеризуемой интерференционным максимумом в спектре отражения (рис. 3). При нагреве, начиная с комнатной температуры и до 70 °С, наблюдалось постепенное снижение коэффициента отражения образца в полосе, отвечающей фотонной запрещенной зоне. Смещения положения фотонной запрещенной зоны не наблюдалось при низких температурах нагрева. Начиная с 70 °С, отмечался значительный сдвиг полосы фотонной запрещенной зоны в коротковолновую область на величину 37 нм. Сдвиг спектра отражения происходил медленно и сопровождался выпариванием из образца остатков этиленгликоля, которое происходило при 70–80 °С. Во время этого процесса дальнейший нагрев образца был приостановлен. Нагрев возобновлялся после стабилизации положения максимума спектра отражения на длине волны ~600 нм. При нагреве образца от 80 до 130 °С наблюдался практически двукратный рост коэффициента отражения в полосе фотонной запрещенной зоны до 13 %, который сопровождался дальнейшим небольшим сдвигом спектра отражения в коротковолновую область на величину 2–3 нм.

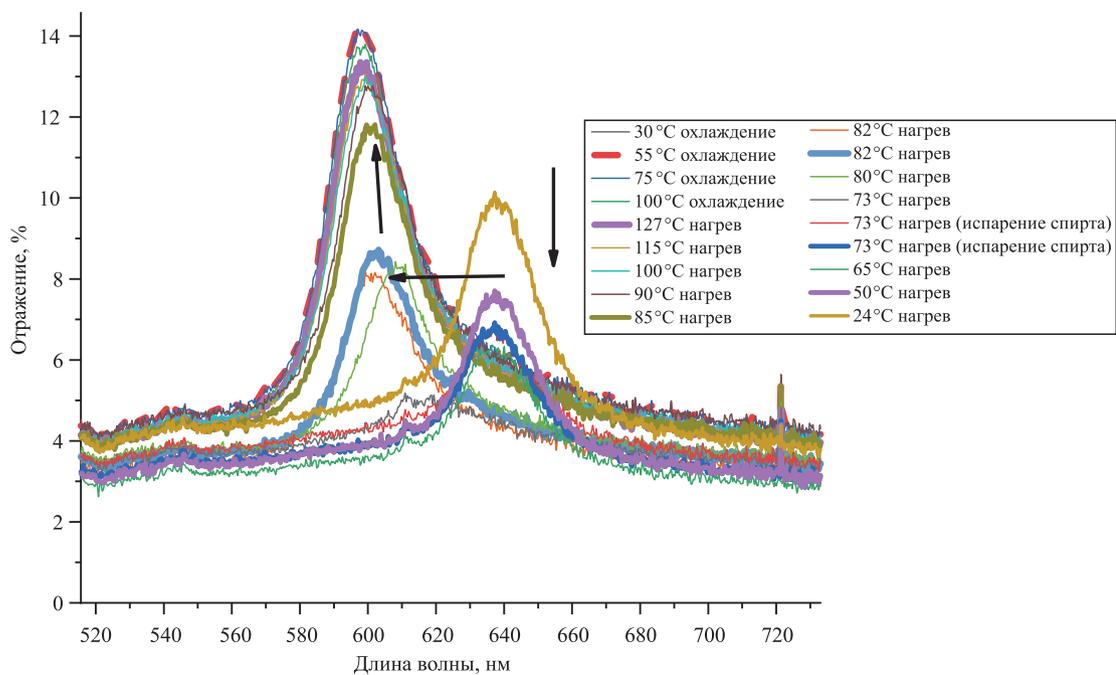


Рис. 3. Спектры отражения опала, записанные в условиях нагрева и охлаждения в диапазоне температур от 24 до 127 °С после пропитки этиленгликолем: стрелки – направление изменения спектров по мере нагревания

Fig. 3. Reflectance spectra of opal recorded under heating and cooling conditions in the temperature range from 24 to 127 °С after impregnation with ethylene glycol: arrows – the direction of change in the spectra as heating proceeds

Длительная термообработка при температуре 600 °С опала из упорядоченных глобул, содержащего ксерогель титаната бария, приводит к исчезновению фотонной запрещенной зоны (рис. 4). Опал становится мутным и непрозрачным на воздухе и в спиртах. При этом фаза титаната бария методом рентгеновской дифракции не обнаружена, хотя наличие трехвалентных лантаноидов в ксерогеле обеспечивает их люминесценцию, наблюдаемую и ранее для рентгеноаморфных пленок ксерогеля титаната бария. Этот результат отличается от проведенных ранее исследований по изменению положения фотонной запрещенной зоны при синтезе в порах опала ксерогеля оксида титана с последующей термообработкой [10].

Отсутствие фотонной запрещенной зоны также демонстрируют опалы, не имеющие регулярной упаковки монодисперсных глобул. На рис. 5, а приведен спектр отражения опала, полученный методом взрывного прессования монодисперсных глобул. Опал имеет белый цвет и характеризуется коэффициентом отражения не более 2,25 %, практически не зависящим от длины

волны в диапазоне 200–1100 нм. В отличие от упорядоченных трехмерных структур (коллоидных фотонных кристаллов – драгоценных опалов), такие опаловые матрицы сравнительно легко получать. При погружении опаловой матрицы в золь оксида титана, содержащий европий, и последующей термообработке при температуре 450 °С получается композит, демонстрирующий видимую люминесценцию европия при возбуждении УФ-излучением (рис. 5, *b*).

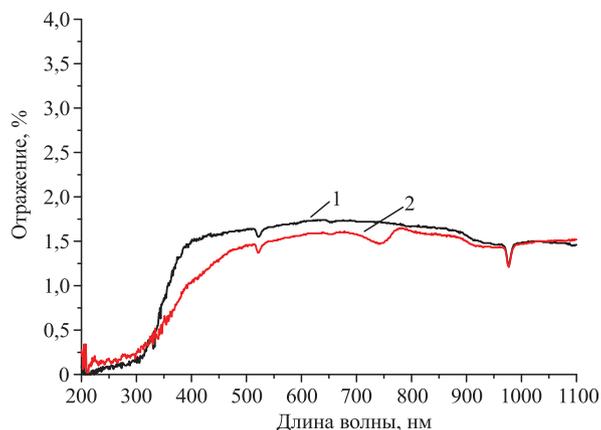


Рис. 4. Спектры отражения опала с ксерогелем титаната бария после длительной термообработки при температуре 600 °С: 1 – на воздухе; 2 – в этаноле

Fig. 4. Reflectance spectra of opal with barium titanate xerogel after prolonged heat treatment at 600 °С: 1 – in air; 2 – in ethanol

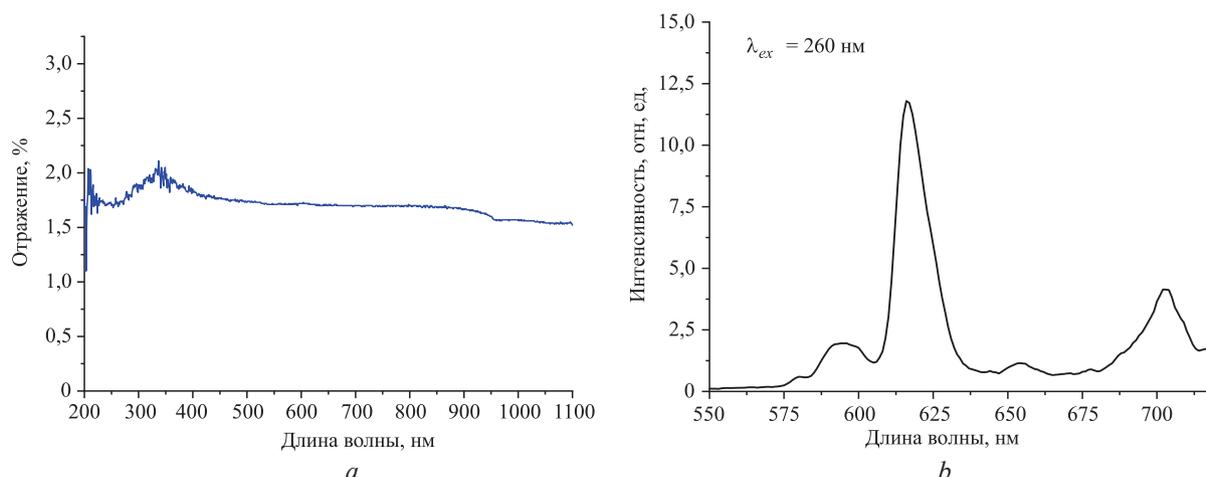


Рис. 5. Спектры опаловой матрицы из неупорядоченной упаковки монодисперсных глобул SiO₂: *a* – отражение до пропитки золем оксида титана; *b* – люминесценция европия после пропитки золем оксида титана и термообработки для $\lambda_{ex} = 260$ нм

Fig. 5. Spectra of the opal SiO₂ matrix from a disordered packing of monodisperse globules: *a* – reflection before impregnation with titanium oxide sol; *b* – luminescence of europium for $\lambda_{ex} = 260$ nm after its impregnation with titanium oxide sol

Заключение

1. Суспензии, состоящие из монодисперсных глобул кремнезема и ксерогеля титаната бария, легированного эрбием и иттербием, обеспечивают формирование матовых рассеивающих покрытий с пониженной прозрачностью, демонстрирующих видимую ап-конверсионную люминесценцию при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 980 нм. Такие покрытия могут применяться для декорирования поверхностей стекол и металлов с дополнительной функцией – люминесценцией, видимой невооруженным глазом.

2. Опаловые матрицы, синтезированные золь-гель-методом и состоящие из регулярной упаковки монодисперсных глобул, содержащие в порах ксерогель, требуют выбора тщательных режимов термообработки для сохранения одновременно фотонной запрещенной зоны и формиро-

вания ксерогеля с требуемой фазой и люминесценцией примесных ионов. Опаловые матрицы, полученные методом взрывного прессования, не имеющие регулярную упаковку глобул, в сочетании с золь-гель-синтезом люминофоров могут при выборе соответствующих примесных ионов найти применение для люминесцентных визуализаторов ИК- и УФ-излучения.

Список литературы

1. Stoeber, W. Controlled Growth of Monodisperse Silica Spheres in the Micron Size Range / W. Stoeber, A. Fink, E. Bohn // *J. Colloid Interface Science*. 1968. Vol. 26. P. 62–69. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(68\)90272-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(68)90272-5).
2. Самойлович, М. И. Способ получения синтетического материала со структурой благородного опала: пат. Рос. Федерации № 2 162 456 С1 / М. И. Самойлович, С. М. Самойлович. Оpubл. 27.01.2001.
3. Photonic Band Gap Phenomenon and Optical Properties of Artificial Opals / V. N. Bogomolov [et al.] // *Phys. Rev. E*. 1997. Vol. 55. P. 7619–7625. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.7619>.
4. Three-Dimensional Photonic Band Gap Structures Doped with Tb³⁺ Ions / N. V. Gaponenko [et al.] // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting'2001*. 2001. P. 214–220. https://doi.org/10.1142/9789812810076_0039.
5. Gaponenko, N. V. Sol-Gel Derived Films in Mesoporous Matrices: Porous Silicon, Anodic Alumina and Artificial Opals / N. V. Gaponenko // *Synthetic Metals*. 2001. Vol. 124, No 1. P. 125–130. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00447-7](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00447-7).
6. Towards 3D Photonic Crystals / V. M. Shelekhina [et al.] // *Synthetic Metals*. 2001. Vol. 124, No 1. P. 137–139. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00451-9](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00451-9).
7. Phase Transition-Governed Opal-VO₂ Photonic Crystal / V. G. Golubev [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2001. Vol. 79, No 14. P. 2127–2129. <https://doi.org/10.1063/1.1406144>.
8. Controlling the Dynamics of Spontaneous Emission from Quantum Dots by Photonic Crystals / P. Lodahl [et al.] // *Nature*. 2004. Vol. 430. P. 654–657. <https://doi.org/10.1038/nature02772>.
9. Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO₃ Film Structures and the Target Form / N. V. Gaponenko [et al.] // *Photonics*. 2023. Vol. 10, No 4. <https://doi.org/10.3390/photonics10040359>.
10. Modification of Erbium Photoluminescence Excitation Spectra for the Emission Wavelength 1.54 μm in Mesoscopic Structures / N. V. Gaponenko [et al.] // *Journal of Luminescence*. 2006. Vol. 121. P. 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2006.07.015>.

References

1. Stoeber W., Fink A., Bohn E. (1968) Controlled Growth of Monodisperse Silica Spheres in the Micron Size Range. *J. Colloid Interface Science*. 26, 62–69. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(68\)90272-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(68)90272-5).
2. Samoylovich M. I., Samoylovich S. M. (2001) Method for Producing Synthetic Material with the Structure of Noble Opal. *Russian Federation Patent No 2 162 456 C1*. Publ. 27.01.2001 (in Russian).
3. Bogomolov V. N., Gaponenko S. V., Germanenko I. N., Kapitonov A. M., Petrov E. P., Gaponenko N. V., et al. (1997) Photonic Band Gap Phenomenon and Optical Properties of Artificial Opals. *Phys. Rev. E*. 55, 7619–7625. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.7619>.
4. Gaponenko N. V., Shelekhina V. M., Prokhorov O. A., Vityaz P. A., Stupak A. P., Ponyavina A. N., et al. (2001) Three-Dimensional Photonic Band Gap Structures Doped with Tb³⁺ Ions. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting'2001*. 214–220. https://doi.org/10.1142/9789812810076_0039.
5. Gaponenko N. V. (2001) Sol-Gel Derived Films in Mesoporous Matrices: Porous Silicon, Anodic Alumina and Artificial Opals. *Synthetic Metals*. 124 (1), 125–130. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00447-7](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00447-7).
6. Shelekhina V. M., Prokhorov O. A., Vityaz P. A., Stupak A. P., Gaponenko S. V., Gaponenko N. V. (2001) Towards 3D Photonic Crystals. *Synthetic Metals*. 124 (1), 137–139. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(01\)00451-9](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(01)00451-9).
7. Golubev V. G., Davydov V. Yu., Kartenko N. F., Kurdyukov D. A., Medvedev A. V., Pevtsov A. B., et al. (2001) Phase Transition-Governed Opal-VO₂ Photonic Crystal. *Appl. Phys. Lett.* 79 (14), 2127–2129. <https://doi.org/10.1063/1.1406144>.
8. Lodahl P., van Driel A. F., Nikolaev I. S., Irman A., Overgaag K., Vanmaekelbergh D., et al. (2004) Controlling the Dynamics of Spontaneous Emission from Quantum Dots by Photonic Crystals. *Nature*. 430, 654–657. <https://doi.org/10.1038/nature02772>.
9. Gaponenko N. V., Staskov N. I., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Karnilava Yu. D., et al. (2023) Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO₃ Film Structures and the Target Form. *Photonics*. 10 (4). <https://doi.org/10.3390/photonics10040359>.

10. Gaponenko N. V., Unuchak D. M., Mudryi A. V., Malyarevich G. K., Gusev O. B., Stepikhova M. V., et al. (2006) Modification of Erbium Photoluminescence Excitation Spectra for the Emission Wavelength 1.54 μm in Mesoscopic Structures. *Journal of Luminescence*. 121, 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2006.07.015>.

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Гапоненко Н. В., д-р физ.-мат. наук, проф., зав. науч.-исслед. лаб. «Нанопотоника» (НИЛ 4.5), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Клещева С. М., канд. геол.-минерал. наук

Лашковская Е. И., мл. науч. сотр. НИЛ 4.5, БГУИР

Лабунув В. А., академик, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Интегрированные микро- и наносистемы», БГУИР

Мартынов И. Л., канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физики микро- и наносистем, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Чистяков А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. физики микро- и наносистем, НИЯУ МИФИ

Каргин Н. И., д-р техн. наук, проф., проректор НИЯУ МИФИ

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

Судник Л. В., д-р техн. наук, зам. дир. науч.-исслед. института импульсных процессов с опытным производством (НИИ ИП с ОП), Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ИПМ)

Лученок А. Р., ст. науч. сотр. НИИ ИП с ОП, ИПМ

Ванг М., д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. исследований электронных материалов, Сианьский университет Цзяо Тун

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: gaponenko@bsuir.by
Гапоненко Николай Васильевич

Information about the authors

Gaponenko N. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of the R&D Laboratory “Nanophotonics” (Lab 4.5), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Kleshcheva S. M., Cand. of Sci.

Lashkovskaya E. I., Junior Researcher at the Lab 4.5, BSUIR

Labunov V. A., Academician, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Chief Researcher at the R&D Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems”, BSUIR

Martynov I. L., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Physics of Micro- and Nanosystems, National Research Nuclear University MEPhI (NRNU MEPhI)

Chistyakov A. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of the Department of Physics of Micro- and Nanosystems, NRNU MEPhI

Kargin N. I., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Vice-Rector of NRNU MEPhI

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

Sudnik L. V., Dr. of Sci. (Tech.), Deputy Director of the Research Institute of Impulse Processes with Pilot Production (PIIP with PP), Powder Metallurgy Institute (PMI)

Luchanok A. R., Leading Researcher of the PIIP with PP, PMI

Wang M., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of Electronic Materials Laboratory, Xi’an Jiaotong University

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: gaponenko@bsuir.by
Gaponenko Nikolai Vasilievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-29-37>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.37

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ГАРМОНИЧЕСКИЙ СМЕСИТЕЛЬ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 78,33 ДО 118,10 ГГц

И. А. ЗАХАРОВ, А. В. ГУСИНСКИЙ, А. В. САЙКОВ, М. М. КАСПЕРОВИЧ,
Д. А. КОНДРАШОВ, М. С. СВИРИД

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

Поступила в редакцию 22.07.2024

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

Аннотация. Рассмотрены вопросы реализации сверхвысокочастотных измерительных смесителей на гармониках со встроенным частотным диплексером и актуальность их применения. Описана математическая модель измерительного гармонического смесителя миллиметрового диапазона длин волн как линейного устройства. Приведены функциональная схема и технические характеристики измерительного гармонического смесителя со встроенным частотным диплексером. Показаны результаты компьютерного моделирования модуля коэффициента передачи диплексера по высокочастотному входу и низкочастотному выходу, а также коэффициента стоячей волны по напряжению измерительного канала гармонического смесителя в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц. Представлена реализация разработанного смесителя в данном диапазоне частот.

Ключевые слова: элемент согласования, волноводная линия передачи с диодом, гармонический смеситель миллиметрового диапазона длин волн, линия типа фин-лайн, диплексер.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Измерительный гармонический смеситель в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц / И. А. Захаров [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 29–37. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-29-37>.

MEASURING HARMONIC MIXER IN THE FREQUENCY RANGE FROM 78.33 TO 118.10 GHz

IVAN A. ZAKHAROV, ALEKSANDER V. GUSINSKY, ALEXEY V. SAIKOV,
MARINA M. KASPEROVICH, DENIS A. KONDRASHOV, MAXIM S. SVIRID

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

Submitted 22.07.2024

Abstract. The issues of realization of ultra-high-frequency measuring mixers on harmonics with a built-in frequency diplexer and the relevance of their application are considered. A mathematical model of a measuring harmonic mixer of the millimeter-wave range as a linear device is described. A functional diagram and technical characteristics of a measuring harmonic mixer with a built-in frequency diplexer are given. The results of computer modeling of the module of the diplexer transmission coefficient by the high-frequency input and low-frequency output, as well as the standing wave ratio by the voltage of the measuring channel of the harmonic mixer in the frequency range from 78.33 to 118.10 GHz are shown. The implementation of the developed mixer in this frequency range is presented.

Keywords: matching element, waveguide transmission line with diode, millimeter wave harmonic mixer, fin-line type line, diplexer.

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

For citation. Zakharov I. A., Gusinsky A. V., Saikov A. V., Kasperovich M. M., Kondrashov D. A., Svirid M. S. (2024) Measuring Harmonic Mixer in the Frequency Range from 78.33 to 118.10 GHz. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 29–37. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-29-37> (in Russian).

Введение

Миллиметровый диапазон длин волн является одним из наиболее перспективных для развития различных технологий, включая телекоммуникации, медицину, радиолокацию, навигацию и мн. др. Для эффективного использования этого диапазона необходимо иметь соответствующие измерительные устройства. Один из важнейших узлов таких устройств – измерительный гармонический смеситель, с помощью которого производится перенос сигнала из высокочастотной области в низкочастотную, пригодную для последующей обработки. В статье приведено описание разработки, реализации и применения измерительного гармонического смесителя со встроенным частотным диплексером (в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц), предназначенного для формирования измерительного сигнала частотой 100 МГц с минимальными потерями преобразования.

Математическая модель измерительного гармонического смесителя

Несмотря на то что по своей природе смесители – сугубо нелинейные устройства, по большей части процесс передачи от входа измерительного сигнала (RF) к низкочастотному выходу (IF) носит линейный характер и может быть смоделирован по аналогии с S-параметрами четырехполосника. Хотя и происходит преобразование частоты, линейность проявляется в том, что удвоение входного уровня влечет удвоение уровня на выходе. В случае модулированного сигнала на входе такой же модулированный сигнал без искажений будет присутствовать на выходе. Нелинейная характеристика диодов позволяет осуществлять амплитудное ограничение RF-сигнала, благодаря чему происходит его перенос на IF, но происходит он линейно. Следует отметить, что n -й Фурье-компонент синусоидального сигнала высокочастотного входа (LO), на одном входе умноженный на косинусоидальный сигнал, на RF-входе даст на выходе IF большое количество частотных составляющих, равных сумме и разности частот двух входных сигналов. Сигнал LO в случае симметричного сигнала будет иметь множество нечетных гармоник, ввиду чего в спектре выходного сигнала IF будут также присутствовать составляющие с частотами, равными сумме и разности каждой из гармоник и входного RF-сигнала, так называемые интермодуляционные составляющие спектра сигнала или продукты сигналов высокого порядка. Таким образом, формируется сигнал суммарной и разностной частот. В результате, если отфильтровать сигнал разностной частоты, будет получен преобразователь (смеситель) входного RF-сигнала «вниз».

Малосигнальная модель для смесителя, которая также применима для гармонических смесителей, основанная на падающих и рассеянных волнах, может быть построена с использованием соотношений, показанных на рис. 1.

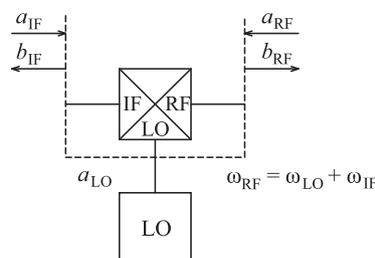


Рис. 1. Схема включения смесителя: a_{IF} , a_{RF} , a_{LO} – падающая волна каналов IF, RF, LO; b_{IF} , b_{RF} – отраженная волна каналов IF, RF; ω_{IF} , ω_{RF} , ω_{LO} – круговая частота каналов IF, RF, LO
Fig. 1. Mixer connection diagram: a_{IF} , a_{RF} , a_{LO} – incident wave of IF, RF, LO channels; b_{IF} , b_{RF} – reflected wave of IF, RF channels; ω_{IF} , ω_{RF} , ω_{LO} – circular frequency of IF, RF, LO channels

В идеальном смесителе, работающем в нормальном режиме, спектр входного сигнала переносится на вход без изменений амплитуды и фазы, а также без отражения от портов. Таким образом,

математическая модель идеального смесителя, работающего в нормальном режиме при $|a_{LO}| = 1$, может быть записана в виде формулы

$$\begin{bmatrix} b_{IF} \\ b_{RF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_{LO}^* \\ a_{LO} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{IF} \\ a_{RF} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Математическая модель (1) описывает амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазо-частотные характеристики (ФЧХ) идеальных смесителей. Однако в реальных смесителях возникают отраженные сигналы на входе и выходе наряду с частотной зависимостью передаточной характеристики, ввиду чего они должны иметь более сложное описание.

Дополнительные влияющие факторы могут быть описаны несколькими способами, как показано на рис. 2. В случае (a) факторы неидеальности характеристик смесителя полностью сосредоточены на стороне порта IF, в (b) – на стороне порта RF, а в (c) они разделены между портами IF и RF так, что факторы, относящиеся к прямому прохождению сигнала, приписываются порту IF, а к обратному прохождению сигнала – RF. Такие варианты представления одинаково верны и отражают параметры четырехполюсника ошибки, который содержит в себе все факторы неидеальности смесителя.

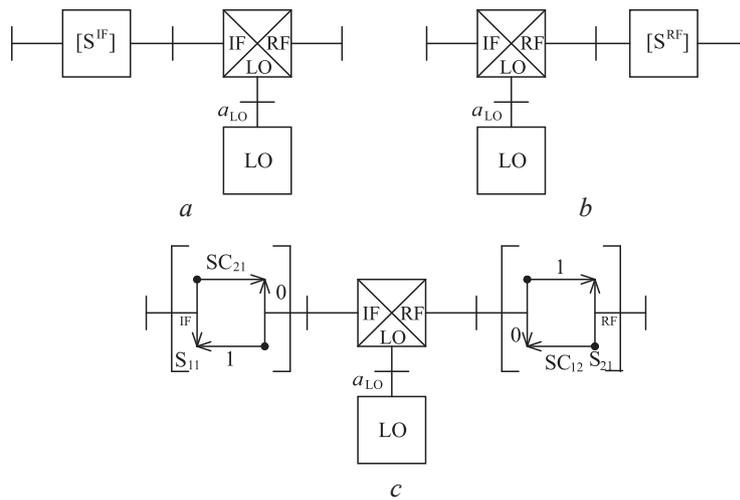


Рис. 2. Факторы неидеальности характеристик смесителя: S^{IF} , S^{RF} – S-матрица каналов IF, RF; SC_{21} , SC_{12} – коэффициент передачи с частотным преобразованием; S_{11} , S_{21} – коэффициент отражения и передачи

Fig. 2. Factors of non-ideality of mixer characteristics: S^{IF} , S^{RF} – S-matrix of IF, RF channels; SC_{21} , SC_{12} – frequency conversion gain; S_{11} , S_{21} – reflection and transmission coefficient

Исходя из рис. 2, можно установить ряд параметров рассеяния, описывающих поведение всех волновых величин для смесителя, работающего в нормальном режиме и имеющего нагрузку с любыми параметрами [1]. Волновые величины на частотах IF и RF для смесителя, работающего в нормальном режиме при $|a_{LO}| = 1$, описываются формулами:

$$\begin{bmatrix} b_{IF} \\ b_{RF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^{IF} & a_{LO}^* \cdot S_{12}^{IF} \\ a_{LO} \cdot S_{21}^{IF} & S_{22}^{IF} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{IF} \\ a_{RF} \end{bmatrix} = [S^{IF}] \cdot \begin{bmatrix} a_{IF} \\ a_{RF} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} b_{IF} \\ b_{RF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^{RF} & a_{LO}^* \cdot S_{12}^{RF} \\ a_{LO} \cdot S_{21}^{RF} & S_{22}^{RF} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{IF} \\ a_{RF} \end{bmatrix} = [S^{RF}] \cdot \begin{bmatrix} a_{IF} \\ a_{RF} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для коэффициентов передачи используется обозначение SC, в котором буква C указывает на то, что выполняется частотное преобразование. Даже несмотря на то, что S-матрицы $[S^{IF}]$ и $[S^{RF}]$ относятся к разным частотам, их элементы имеют одинаковые величины, и можно сказать, что $[S^{IF}] = [S^{RF}]$. Таким образом, действительная характеристика смесителя (четырёхполюсника

ошибки) может «перемещаться» с одной его стороны на другую, как показано на рис. 2, допускающая возможность математического моделирования поведения реального смесителя в каскадном соединении с другими элементами схемы. Например, согласующий переход, фильтр сигнала гетеродина, фильтр сигнала промежуточной частоты (ПЧ).

Для смесителя в нормальном режиме можно изобразить общую эквивалентную схему, в которой все влияющие факторы четырехполюсника ошибки будут перенесены со стороны порта IF на сторону RF, включая влияние согласования источника (рис. 3). В этой эквивалентной схеме смеситель убирается, а источник сигналов изменяет свою частоту, но согласование источника остается прежним.

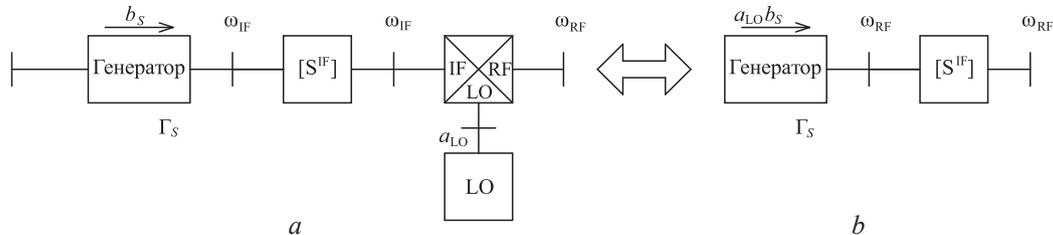


Рис. 3. Реальная (а) и эквивалентная (b) схемы на RF для источника сигналов и смесителя в нормальном режиме: Γ_s – параметр источника; b_s – отраженная волна источника

Fig. 3. Real (a) and equivalent (b) RF circuits for a signal source and mixer in normal mode: Γ_s – source parameter; b_s – reflected source wave

Взаимность смесителей принимает особый смысл в свете математических моделей, описываемых вышеприведенными матрицами. С точки зрения АЧХ о смесителях можно сказать, что они взаимны, т. е. $[SC_{21}] = [SC_{12}]$.

Функциональная схема измерительного гармонического смесителя в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц

Функциональную схему измерительного гармонического смесителя, представленную на рис. 4, можно условно разделить на три части: согласующую часть, волноводно-щелевой переход, диплексер. Согласующая часть представляет собой волноводный аттенюатор WU1 номиналом 10 дБ с поглощающим клином из слюды с резистивным слоем. Главная задача данного аттенюатора – обеспечение согласования, т. е. минимального уровня коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) на RF-входе. Волноводно-щелевой переход W1 обеспечивает переход с волноводной линии передачи на щелевую линию, в которой расположены диодная секция VD1–VD2 на основе диодов Шоттки и фильтр нижних частот Z1 для дополнительного подавления входного СВЧ-сигнала. Диплексер необходим для частотного разделения каналов LO и IF при помощи полосового фильтра Z2, соответствующего полосе рабочих частот гетеродина, и низкочастотного фильтра Z3, служащего для уменьшения просачивания сигнала из канала гетеродина.

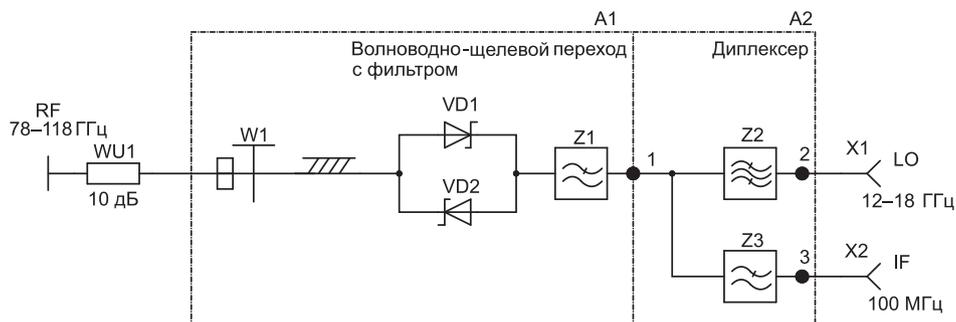


Рис. 4. Функциональная схема измерительного гармонического смесителя
Fig. 4. Functional diagram of the measuring harmonic mixer

На рис. 5 представлен граф, построенный на основе методики, описанной выше. Волноводно-щелевой переход обеспечивает ключевое согласование по RF-входу. Он представляет собой линию типа фин-лайн, эквивалентная схема которой приведена на рис. 6.

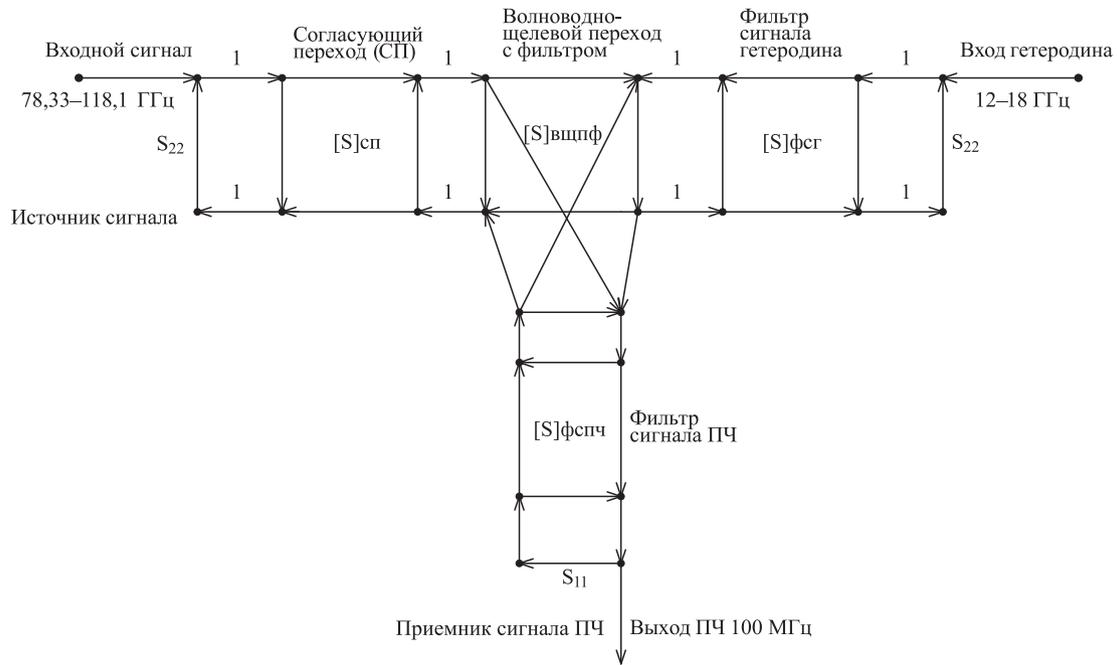


Рис. 5. Граф измерительного гармонического смесителя
Fig. 5. Graph of a measuring harmonic mixer

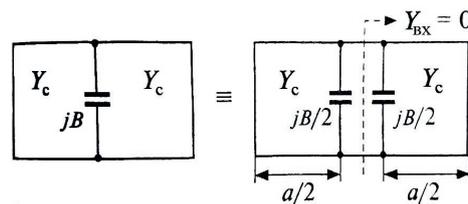


Рис. 6. Эквивалентная схема линии типа фин-лайн:

Y_c – проводимость элементов, входящих в фин-лайн; $Y_{вх}$ – входная проводимость

Fig. 6. Equivalent circuit of a fin-line type line:

Y_c – conductivity of the elements included in the fin-line; $Y_{вх}$ – input conductivity

Эквивалентная схема поперечного сечения линии типа фин-лайн содержит две короткозамкнутые линии передачи длиной $a/2$, где a – широкая стенка волновода, с проводимостью jB , расположенной в центре (рис. 6) [2]. Упрощенная эквивалентная схема диода представлена на рис. 7, где R_s – последовательное сопротивление; C_j , R_j – емкость и сопротивление перехода соответственно. На рис. 8 приведена эквивалентная схема частотного диплекса, который реализован на микрополосковых линиях, являющихся эквивалентами емкости C и индуктивности L .

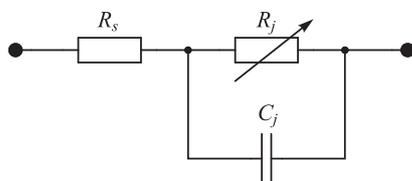


Рис. 7. Упрощенная эквивалентная схема диода
Fig. 7. Simplified diode equivalent circuit

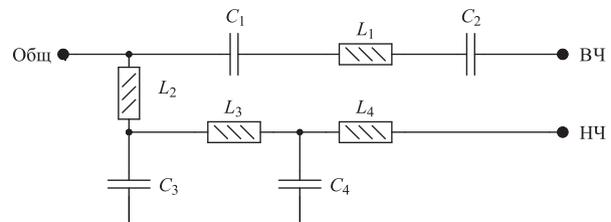


Рис. 8. Эквивалентная схема диплекса
Fig. 8. Diplexer equivalent circuit

Результаты моделирования

С целью определения оптимальных параметров коэффициентов передачи и отражения разработанного устройства, а также его работоспособности и функциональности было проведено трехмерное моделирование электромагнитного поля методом конечных элементов. Модель

включала в себя волноводно-щелевой переход W1 с фильтром Z1 и диплексер. В качестве материала диэлектрика подложки использовалась углеводородная керамика RO4350B. Серия RO4000 сверхвысокочастотных (СВЧ) материалов, с одной стороны, обеспечивает качественные СВЧ-характеристики, как у материалов на основе фторопласта, а с другой, делает технологию совместимой с традиционной технологией обработки армированных текстолитов. Материалы RO4000 представляют собой армированное стекловолокно с высокой температурой стеклования с наполнением из термореактивного полимера с добавлением керамики. В отличие от материалов на основе фторопласта материалы серии RO4000 не требуют специальной химической или плазменной обработки поверхности при подготовке производства металлизированных переходных отверстий [3]. На рис. 9 приведен график моделирования КСВН RF-входа.

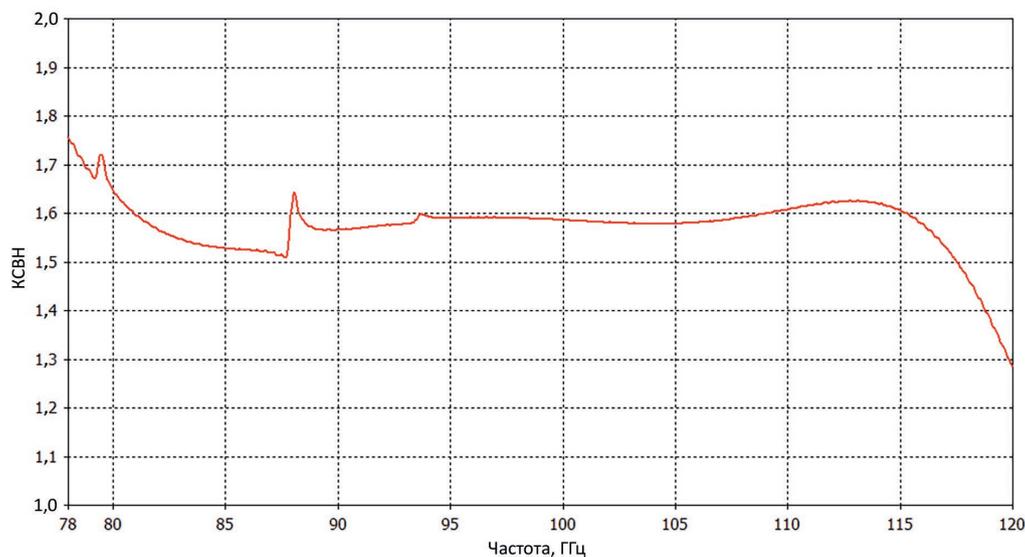


Рис. 9. Коэффициент стоячей волны по напряжению RF-входа
Fig. 9. RF input voltage standing wave ratio

Из рис. 9 видно, что КСВН по RF-входу лежит в допустимых пределах – до значения 2,0. Резонанс в районе 87 ГГц обусловлен тем, что использовалась упрощенная модель смесителя, которая может не учитывать все нюансы.

На рис. 10 представлены зависимости коэффициента передачи от частоты со стороны ИФ-выхода диплексера S_{31} и LO-входа диплексера S_{21} , развязки между каналами LO и ИФ диплексера S_{23} .

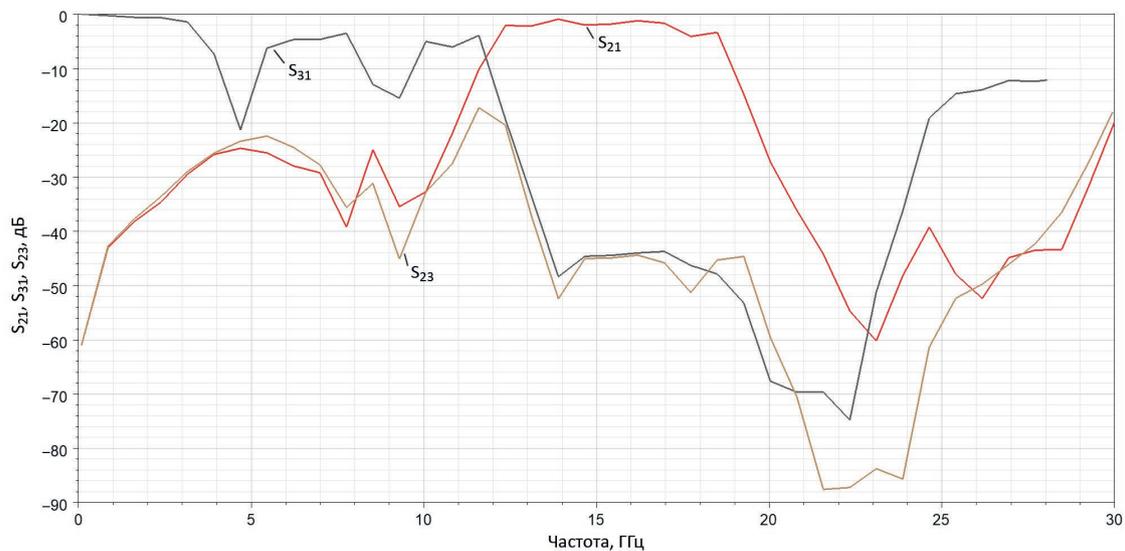


Рис. 10. Переходные характеристики моделируемого диплексера
Fig. 10. Transient characteristics of the simulated diplexer

Из графиков рис. 10 видно, что по высокочастотному каналу обеспечивается заданная полоса пропускания, а также происходит подавление низкочастотной составляющей. В низкочастотном канале обеспечивается заданная рабочая полоса для канала ПЧ и подавляется полоса частот сигнала гетеродина. Развязка между данными каналами является допустимой.

Практическая реализация

Полученные результаты моделирования позволили перейти к практической реализации устройства и определению его характеристик на практике. Схема измерения характеристик смесителя представлена на рис. 11.

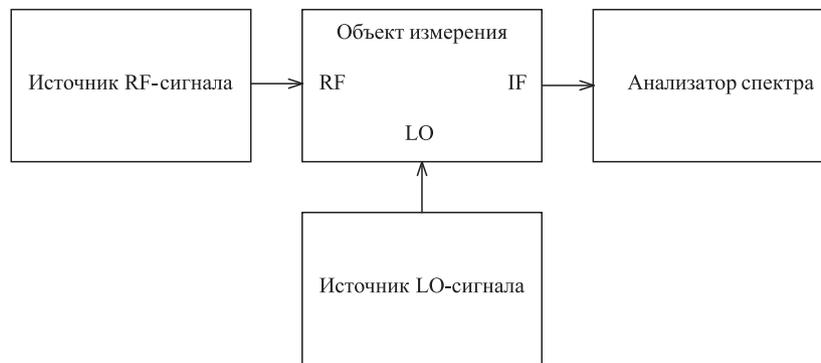


Рис. 11. Схема измерения характеристик смесителя
Fig. 11. Mixer characteristics measurement circuit

В качестве источника RF-сигнала использовался источник сигнала в диапазоне частот 78,33–118,10 ГГц, LO-сигнала – Г4-МВМ-20, приемника сигнала – IF-анализатор спектра Anritsu MS2830A. Уровень сигнала на выходе IF при подаче на вход RF-сигнала с уровнем мощности –10 дБм представлен на рис. 12.

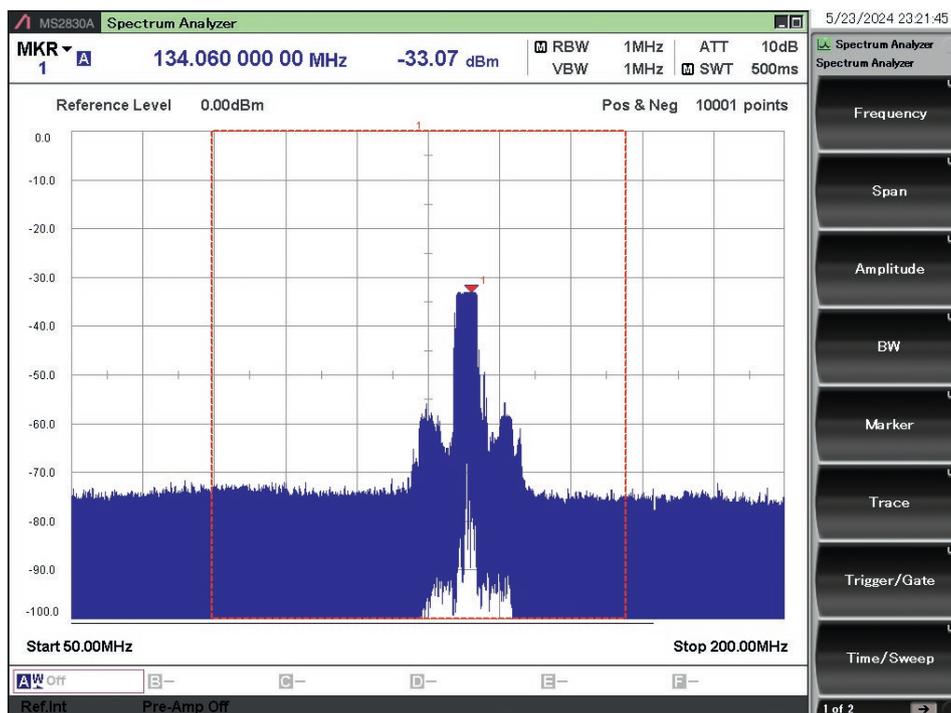


Рис. 12. Уровень сигнала на выходе IF
Fig. 12. IF output level

Технические характеристики разработанного смесителя со встроенным диплексером приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики смесителя
Table 1. Technical characteristics of the mixer being developed

Наименование параметра	Техническая характеристика
Диапазон рабочих частот канала RF, ГГц	От 78,33 до 118,10
Сечение волновода, мм	2,4×1,2
Диапазон рабочих частот канала LO, ГГц	От 11,19 до 16,87
Номер гармоники	7
Уровень мощности канала LO, дБм	От 10 до 13
Диапазон рабочих частот канала IF, ГГц	0,1–1,0
Порт RF	Прямоугольный фланец по ГОСТ 13317–89
Порты LO, IF	Коаксиальный, SMA
Потери преобразования, дБ	От 18 до 30
Допустимая входная мощность, мВт	Не более 1,0

Внешний вид смесителя со встроенным дуплексером показан на рис. 13.



Рис. 13. Внешний вид смесителя со встроенным дуплексером
Fig. 13. External view of a mixer with a built-in diplexer

Разработанный смеситель со встроенным дуплексером позволил уменьшить его массогабаритные показатели, при этом сохраняя технические характеристики. Конструкция обеспечивает формирование сигнала с подавлением комбинационных помех и интерференции между принимаемыми и передаваемыми сигналами.

Заключение

1. Представленный подход к математическому моделированию измерительного гармонического смесителя миллиметрового диапазона длин волн, как линейного устройства, позволяет упростить первичные математические расчеты параметров устройства.

2. Гармонический смеситель со встроенным дуплексером является эффективным и надежным решением для обработки радиочастотных сигналов и имеет ряд преимуществ перед обычным смесителем без дуплексера. Во-первых, позволяет одновременно принимать и передавать сигналы, что упрощает конструкцию системы и уменьшает ее размеры. Во-вторых, встроенный дуплексер улучшает качество сигнала, уменьшая помехи и интерференцию между принимаемыми и передаваемыми сигналами. В-третьих, использование дуплексера дает возможность более точно настроить частоты приема и передачи, что улучшает характеристики устройства.

Список литературы

1. Дансмор, Д. П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей / Д. П. Дансмор. М.: Техносфера, 2018.
2. Шаров, Г. А. Основы теории сверхвысокочастотных линий передачи, цепей и устройств / Г. А. Шаров. М.: Горячая линия – Телеком, 2016.
3. Rogers Corporation [Electronic Recourse]. Mode of access: <https://rogerscorp.com/>. Date of access: 21.06.2024.

References

1. Dunsmore D. P. (2018) *Engineer's Handbook. Microwave Device Parameters Measurements Using Advanced Vector Network Analysis Techniques*. Moscow, Technosfera Publishing House (in Russian).
2. Sharov G. A. (2016) *Fundamentals of the Theory of Microwave Transmission Lines, Circuits and Devices*. Moscow, Hotline – Telecom Publ. (in Russian).
3. *Rogers Corporation*. Available: <https://rogerscorp.com/> (Accessed 21 June 2024).

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Захаров И. А., асп. каф. информационно-измерительных систем, мл. науч. сотр. научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Гусинский А. В., д-р техн. наук, зав. каф. информационно-измерительных систем, гл. науч. сотр. Центра 1.9, БГУИР

Сайков А. В., науч. сотр. Центра 1.9, БГУИР

Касперович М. М., науч. сотр. Центра 1.9, БГУИР

Кондрашов Д. А., нач. Центра 1.9, БГУИР

Свирид М. С., зам. нач. Центра 1.9, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 262-09-88
E-mail: iv.andr.zakharov@gmail.com
Захаров Иван Андреевич

Information about the authors

Zakharov I. A., Postgraduate at the Department of Information and Measuring Systems, Junior Researcher at the Scientific, Production and Educational Innovation Center of Microwave Technologies and Their Metrological Support (Center 1.9), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Gusinsky A. V., Dr. of Sci. (Tech.), Head of the Department of Information and Measuring Systems, Chief Researcher at the Center 1.9, BSUIR

Saikov A. V., Researcher at the Center 1.9, BSUIR

Kasperovich M. M., Researcher at the Center 1.9, BSUIR

Kondrashov D. A., Head of the Center 1.9, BSUIR

Svirid M. S., Deputy Chief of the Center 1.9, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 262-09-88
E-mail: iv.andr.zakharov@gmail.com
Zakharov Ivan Andreevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-38-44>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.3.049.77:621.373.8

ВЫБОР ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

А. И. ЛАППО

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

Поступила в редакцию 11.06.2024

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

Аннотация. Среди перспективных технологических направлений реализации многокристалльных модулей является сборка 3D-модулей. Особенность данной технологии – расположение компонентов сборки не только в горизонтальной плоскости, но и по вертикали. Формирование контактных соединений между компонентами 3D-модуля может осуществляться с помощью проволочного монтажа, а также по технологии поверхностного монтажа. Для реализации последнего необходимо формирование переходных отверстий в кремниевой пластине. При создании переходных отверстий между слоями многокристалльного модуля используется фокусированная энергия лазерного луча. Поскольку диаметр отверстий может быть больше диаметра лазерного луча, необходимо перемещать луч по заданной траектории. Для выбора траектории перемещения сфокусированного лазерного луча осуществлено моделирование визуализаций движения лазера при формировании отверстия для скоростей 0,5 и 5,0 мм/с. Моделирование выполнялось в COMSOL Multiphysics 5.6, что позволило получить распределение тепловых полей при лазерной прошивке отверстий в кремниевой подложке.

Ключевые слова: моделирование, траектория, нагрев, лазерный луч, тепловые поля, переходное отверстие, кремниевая пластина, 3D-модуль.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лаппо, А. И. Выбор траектории движения лазерного луча для формирования переходных отверстий в кремниевой подложке / А. И. Лаппо // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 38–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-38-44>.

SELECTING THE TRAJECTORY OF THE LASER BEAM TO FORM VIAS IN THE SILICON SUBSTRATE

ALIAKSANDR I. LAPO

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

Submitted 11.06.2024

Abstract. One of the promising technological directions for the implementation of multi-crystal modules is the assembly of 3D modules. The peculiarity of this technology is the arrangement of the assembly components not only in the horizontal plane, but also vertically. The formation of contact connections between the components of the 3D module can be carried out using wire mounting, as well as using surface mounting technology. To implement the latter, it is necessary to form vias in the silicon wafer. When creating vias between the layers

of the multi-crystal module, the focused energy of the laser beam is used. Since the diameter of the holes can be larger than the diameter of the laser beam, it is necessary to move the beam along a given trajectory. To select the trajectory of the focused laser beam, a simulation of the visualization of the laser movement during the formation of a hole for the speeds of 0.5 mm/s and 5 mm/s was carried out. Modeling was performed in COMSOL Multiphysics 5.6, which made it possible to obtain the distribution of thermal fields during laser flashing of holes in the silicon substrate.

Keywords: modeling, trajectory, heating, laser beam, thermal fields, via, silicon wafer, 3D module.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Lapo A. I. (2024) Selecting the Trajectory of the Laser Beam to Form Vias in the Silicon Substrate. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 38–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-38-44> (in Russian).

Введение

Применение лазерного излучения для технологических операций без контактного воздействия на материал имеет несколько преимуществ, таких как точное следование технологическим режимам и контроль над объемом подводимой энергии. Высокая энергетическая плотность лазерного излучения позволяет быстро нагревать материалы до высокой температуры, включая температуру испарения, что дает возможность использовать одно технологическое оборудование для различных операций по обработке изделий [1].

При создании переходных отверстий между структурами многокристального модуля использовалась фокусированная энергия лазерного луча. Поскольку диаметр отверстий может быть больше диаметра лазерного луча, луч следует перемещать по заданной траектории. Перемещение луча можно осуществлять путем точного перемещения изделия, закрепленного на столе, относительно неподвижного лазерного луча, или путем отклонения луча с помощью системы зеркал.

В случае создания отверстий в кремниевой подложке можно выделить две проблемы: выбор технологических режимов работы лазера (мощность, частота импульсов, скорость перемещения лазерного пучка) и выбор оптимальной траектории перемещения луча. Технология формирования точечных отверстий несовершенна, поэтому получаемые отверстия имеют коническую форму, которая определяется отношением разницы диаметров отверстий к толщине подложки. Для получения качественного отверстия конусообразность не должна превышать 0,1. Учитывая это, использование траектории движения лазерного луча в форме окружности является неэффективным, и возникает задача разработки траектории движения, заполняющей ограниченную окружность.

Выбор технологических режимов

Для операции создания переходных отверстий в кремниевой подложке применяется лазерное оборудование – оптоволоконный лазер ULPN-355-10-1-10-M [2]. Лазер работает в импульсном режиме со следующими характеристиками:

- мощность лазера – 10 Вт;
- длительность импульса – 1,2 нс;
- частота – 150 Гц;
- диаметр луча – 0,005 мм;
- скорость движения луча – 0,5 или 5,0 мм/с;
- длина волны – 355 нм.

Моделирование лазерного нагрева при сверлении отверстий

Поскольку лазерное излучение является импульсным, следовательно, по ходу движения луча будут образовываться области, на которых не будет происходить воздействие на материал. Для моделирования траектории движения лазера предложено несколько вариантов движения:

- вариант 1 – гипотрохоида (рис. 1):

$$\begin{cases} x = (r - mr) \cos(mt) + h \cos(t - mt), \\ y = (r - mr) \sin(mt) - h \sin(t - mt) \end{cases} \quad (1)$$

– вариант 2 – спираль (рис. 2):

$$\begin{cases} x = 4\pi \cos(\theta) + at \cos(t + q), \\ y = 4\pi \sin(\theta) + at \sin(t + q), \end{cases} \quad (2)$$

– вариант 3 – внешняя гипотрохоида (рис. 3):

$$\begin{cases} x = (r - mr) \cos(mt) + h \cos(t - mt), \\ y = (r - mr) \sin(mt) + h \sin(t - mt), \end{cases} \quad (3)$$

где t – время; x, y – координаты; r, m, a, q, h – коэффициенты, определяющие форму траектории.

Для моделирования траектории движения лазера был выбран диаметр 0,1 мм. Для каждого контура получено четыре варианта зависимости от скорости движения луча (0,5 или 5,0 мм/с) с перекрытием слоев (рис. 1–3).

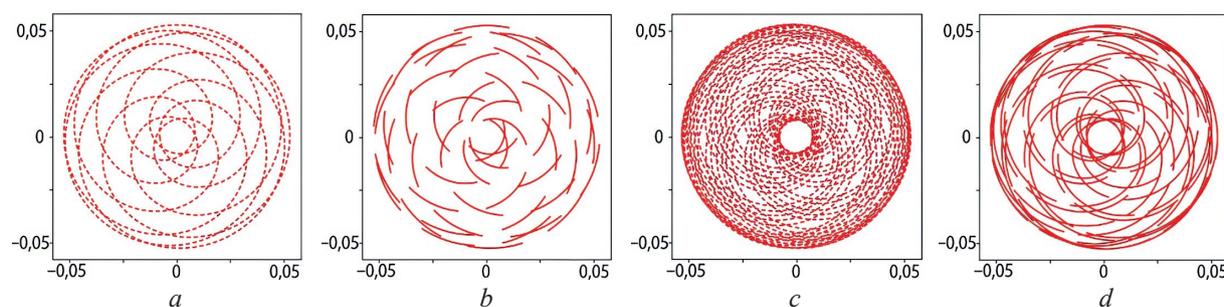


Рис. 1. Визуализация траектории движения лазера по гипотрохоиде для формирования отверстия при скорости движения луча: a, c – 0,5 мм/с; b, d – 5,0 мм/с

Fig. 1. Visualization of the laser trajectory along the hypotrochoid to form a hole at the beam speed: a, c – 0.5 mm/s; b, d – 5.0 mm/s

Движение луча по гипотрохоиде (вариант 1) за один проход не имеет перекрытия (рис. 1). Чтобы получить перекрытие участков, которые должны быть обработаны, добавлено несколько проходов (рис. 1, c, d). Для движения луча со скоростью 0,5 мм/с потребовалось совершить четыре прохода, для скорости 5,0 мм/с – достаточно два прохода по траектории.

Визуализация движения луча по спирали (вариант 2) за один проход представлена на рис. 2, a, b . Чтобы получить перекрытие участков (рис. 2, c, d), потребовалось минимальное количество повторения контуров, равное четырем, для скоростей 0,5 и 5,0 мм/с.

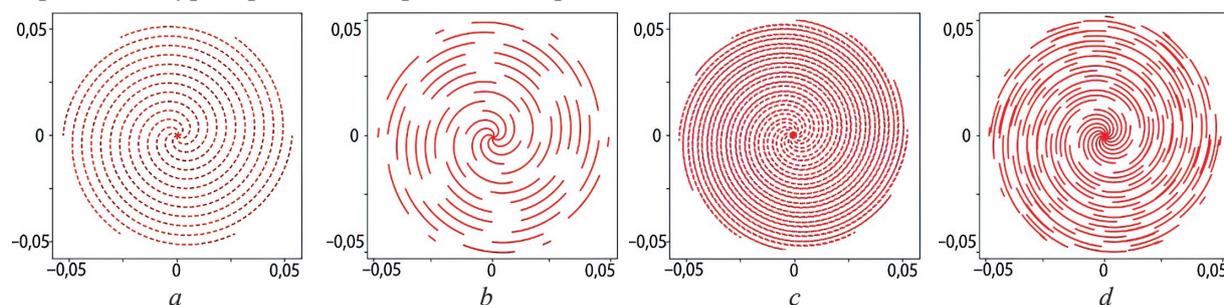


Рис. 2. Визуализация траектории движения лазера по спирали для формирования отверстия при скорости движения луча: a, c – 0,5 мм/с; b, d – 5,0 мм/с

Fig. 2. Visualization of the laser's spiral path to form a hole at the beam speed: a, c – 0.5 mm/s; b, d – 5.0 mm/s

Для внешней гипотрохоиды (вариант 3) результат за один проход представлен на рис. 3. Чтобы получить перекрытие участков (рис. 3, c, d) для скоростей 0,5 и 5,0 мм/с, потребовалось три раза повторить движение по контуру. Все приведенные траектории не позволяют получить замкнутый контур за один проход, для этого требуется несколько повторений движения по контуру. При моделировании движения лазера по траектории, которая проходит более двух контуров, можно заметить, что каждый последующий слой не перекрывает в точности нижележащий слой,

а располагается с некоторым смещением. Данную особенность нельзя назвать недостатком модели, поскольку при физическом процессе формирования отверстия сложно получить высочайшую точность позиционирования луча, чтобы в точности повторить несколько контуров.

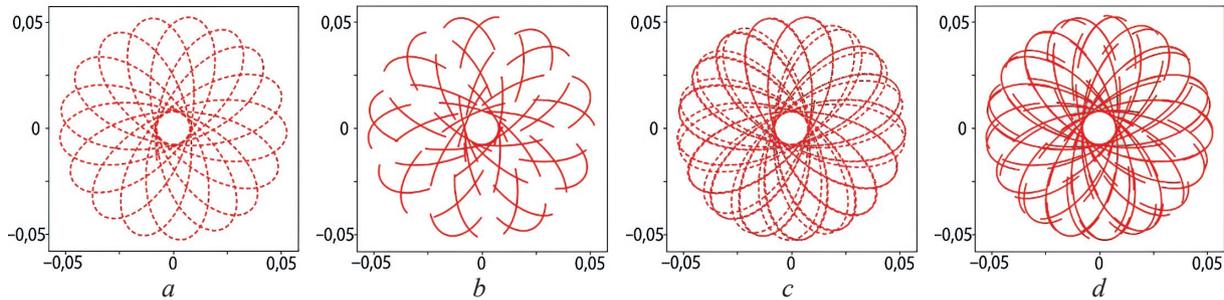


Рис. 3. Визуализация траектории движения лазера по внешней гипотрохоиде для формирования отверстия при скорости движения луча: $a, c - 0,5$ мм/с; $b, d - 5,0$ мм/с
Fig. 3. Visualization of the laser trajectory along the outer hypotrochoid to form a hole at the beam speed: $a, c - 0.5$ mm/s; $b, d - 5.0$ mm/s

Для движения луча по гипотрохоиде (вариант 1) со скоростью 0,5 мм/с потребовалось совершить четыре прохода, при этом получились четкий широкий внешний контур и равномерное заполнение площади обрабатываемой области. Для скорости 5,0 мм/с достаточно двух проходов по траектории, также характерна широкая замкнутая область внешнего контура, но внутренняя область разделена на небольшие замкнутые сегменты, что позволит быстро получить отверстие и минимизировать количество проходов луча.

При спиральном движении луча (вариант 2) не получилось создать замкнутый контур, но отмечено равномерное распределение лучей по всему полю обработки материала для скорости 0,5 мм/с. Внешняя гипотрохоида (вариант 3) показала схожие результаты с гипотрохоидой (вариант 1), но для достижения потребовалось больше времени на слой и больше слоев контуров.

Моделирование тепловых полей при формировании отверстий

Целью моделирования являлось получение зависимостей распределения тепла на поверхности кремниевой пластины, подверженной лазерному нагреву. Для выбранной длины волны лазера предполагалось, что поглощающая способность равна излучающей способности. Следовательно, все лазерное излучение будет уходить на нагрев пластины [3]. Диаметр формируемого отверстия составлял 0,1 мм. Температура поверхности зависела от мощности, поглощенной единицей площади.

Особенностью задач, связанных с нагревом материалов лазерным излучением, является то, что распределение излучения и, следовательно, тепловой источник обладают резко изменяющимися пространственно-временными характеристиками [4]. Поэтому идеализация свойств тепловых источников, часто используемая в расчетных схемах для математического аппарата, может приводить к отклонениям расчетных данных от экспериментальных. Таким образом, функция гауссовского импульса позволяет описать профиль излучения лазерного источника и задать нормальное распределение плотности мощности падающего лазерного излучения. Решив уравнение теплопроводности, получаем распределение температуры по поверхности при использовании источника с гауссовским профилем [5]:

$$T(x, y, z, t) = \frac{2P}{\rho c (4\pi a)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(\tau + t)\sqrt{t}} e^{-\left(\frac{z^2}{4a\tau} + \frac{x^2 + y^2}{4a\left(t + \frac{a}{4r}\right)}\right)} d\tau, \quad (4)$$

где P – мощность излучения, введенная в материал через площадку; ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость; a – коэффициент теплопроводности; r – радиус пятна излучения; t – текущее время; τ – начальное время.

Результаты исследований и их обсуждение

Для моделирования процесса лазерного нагрева применялся программный комплекс COMSOL Multiphysics 5.6. Настройки выбирались в соответствии с заранее заданными технологическими режимами. По результатам моделирования для создания отверстия в ходе прохождения лазером по заданной траектории со скоростью движения луча 0,5 мм/с были получены тепловые поля (рис. 4). Для достижения температуры плавления кремния потребовалось перекрытие базовых траекторий одна на одну с некоторым смещением.

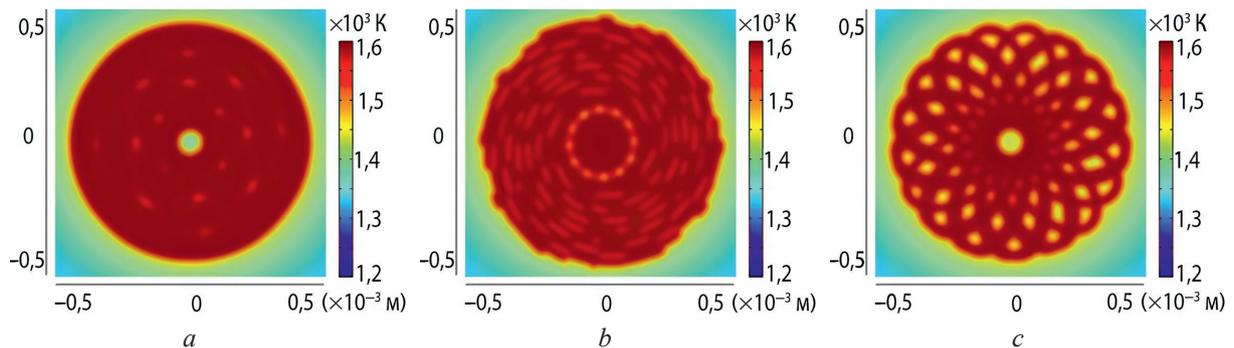


Рис. 4. Тепловые поля в зоне нагрева для скорости движения луча 0,5 мм/с по траектории:
a – гипотрохоида; *b* – спираль; *c* – внешняя гипотрохоида

Fig. 4. Thermal fields in the heating zone for a beam speed of 0.5 mm/s along the trajectory:
a – hypotrochoid; *b* – spiral; *c* – external hypotrochoid

Для варианта прохождения лазерного луча по гипотрохоиде (рис. 4, *a*) время, при котором получается относительно равномерное поле нагрева, составило 3,68 с. Поле нагрева имеет ровный круглый контур с незначительной областью в центре с температурой ниже температуры плавления – около 1400 °С. Есть области с температурой ~1550 °С, которые распределены по поверхности менее плотно, но равномерно. Эти недостатки обусловлены меньшим перекрытием лазерного луча в данных точках из-за особенности траектории движения лазера.

В случае теплового поля, полученного при движении лазерного луча по спирали (рис. 4, *b*), характерны неровные края и наличие областей с температурой ~1550 °С, которые плотно и равномерно распределены от края к центру нагреваемой области. Время операции нагрева составило 3,79 с.

Для теплового поля, полученного при движении лазерного луча по внешней гипотрохоиде (рис. 4, *c*), характерны неровные края и наличие областей, имеющих температуру ~1450 °С, которые плотно и равномерно распределены от края к центру нагреваемой области. Время операции нагрева – 4,77 с.

Если сравнивать три полученных тепловых поля по скорости операции и равномерности распределения теплового воздействия, оптимальный результат получен для движения лазерного луча по траектории гипотрохоиды (рис. 4, *a*). Вариант движения лазерного луча по траектории внешней гипотрохоиды (рис. 4, *c*) оказался самым худшим из-за увеличенного на 30 % времени операции и наличия значительного числа областей, где температура ниже температуры плавления кремния. Это потенциально может ухудшить качество формируемого отверстия.

По результатам моделирования для создания отверстия при прохождении лазером по заданным траекториям со скоростью движения луча 5 мм/с были получены тепловые поля (рис. 5). Все траектории имеют перекрытие с некоторым смещением, что необходимо для достижения температуры плавления.

Для теплового поля, полученного при движении лазерного луча по гипотрохоиде (рис. 5, *a*), характерны ровные края и наличие областей, имеющих температуру около 1450 °С и распределенных плотно, но не равномерно от края к центру нагреваемой области. Время операции нагрева составило 2,21 с. В случае теплового поля, полученного при движении лазерного луча по спирали (рис. 5, *b*), характерны неровные края и отсутствие областей, имеющих температуру ниже температуры плавления. Время операции нагрева – 2,27 с. Для теплового поля, полученного при движении лазерного луча по внешней гипотрохоиде (рис. 5, *c*), характерны неровные края и наличие областей, имеющих температуру ~1450 °С и распределенных плотно и равномерно от края к центру нагреваемой области. Время операции нагрева составило 3,18 с.

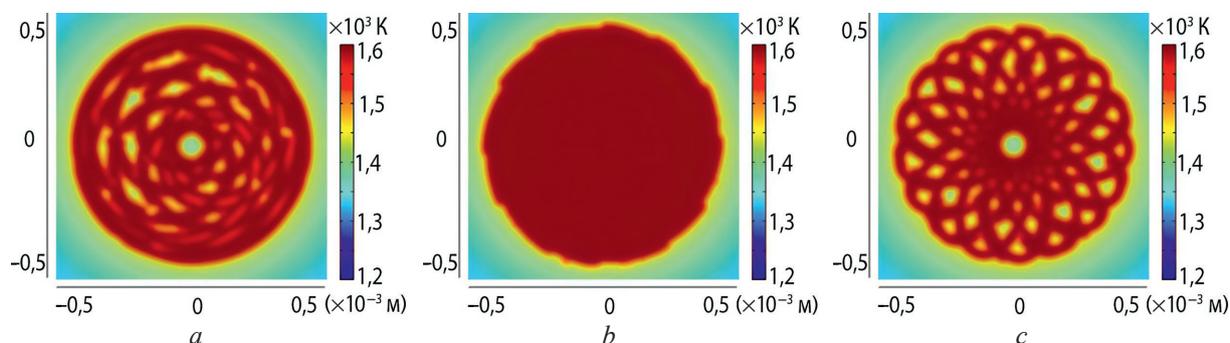


Рис. 5. Тепловые поля в зоне нагрева для скорости движения луча 5,0 мм/с по траектории:
a – гипотрохоида; *b* – спираль; *c* – внешняя гипотрохоида

Fig. 5. Thermal fields in the heating zone for a beam speed of 5.0 mm/s along the trajectory:
a – hypotrochoid; *b* – spiral; *c* – external hypotrochoid

Если сравнивать три полученных тепловых поля по скорости операции и равномерности распределения теплового воздействия, то оптимальный результат достигается при движении лазерного луча по траектории спирали. Вариант движения лазерного луча по траектории внешней гипотрохоиды оказался самым худшим из-за увеличенного на 40 % времени операции и наличия значительного числа областей, где температура ниже температуры плавления кремния, что потенциально может ухудшить качество формируемого отверстия.

При сравнении полученных тепловых полей, имеющих одинаковую траекторию, но разную скорость движения лазера, отмечено, что при скорости 5,0 мм/с время операции сокращается в среднем на 40 %. В случае движения по гипотрохоиде более равномерный нагрев получается при меньшей скорости. При движении по спирали лучшее распределение тела по зоне воздействия достигается на большей скорости. Для внешней гипотрохоиды скорость движения не оказывает существенного влияния на распределение тепловых полей.

По результатам моделирования наиболее оптимальный вариант контура для операции сверления микроотверстий в кремниевой подложке – движение по гипотрохоиде (рис. 1).

Заключение

1. Лазерный нагрев является перспективным методом формирования отверстий в кремнии при сборке 3D-электронных модулей с высокой плотностью соединений благодаря его высокой удельной энергии и возможности локального нагрева.

2. Путем моделирования тепловых полей в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.6 при лазерной обработке кремниевых подложек получены параметры лазерного излучения и траектории движения лазерного луча. Исходя из результатов моделирования, наиболее вероятно создание качественного отверстия при движении по гипотрохоиде со скоростью движения луча 0,5 мм/с и при движении по спирали со скоростью движения луча 5,0 мм/с, поскольку здесь наблюдается равномерное распределение лазерных лучей по всему контуру. Получение отверстий при движении по внешней гипотрохоиде на практике нерационально для любой скорости движения луча, поскольку наблюдается значительная площадь просветов с температурой ниже температуры точки плавления.

Список литературы

1. Мухина, Е. 3D-сборка: технология сквозных отверстий в кремнии / Е. Мухина, П. Башта // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2009. № 2. С. 92–93.
2. ULPN-355-10-1-10-M – IPG Photonics Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pdf.directindustry.com/pdf/ipg-photonics-corporation/ulpn-355-10-1-10-m/29249-947816.html>. Дата доступа: 29.05.2024.
3. Вейко, В. П. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / В. П. Вейко, М. Н. Либензон, Г. Г. Червяков. М.: Физматлит, 2008.
4. Ланин, В. Л. Формирование отверстий в кремниевой подложке 3D-электронного модуля лазерным излучением / В. Л. Ланин, В. Т. Фам, А. И. Лаппо // *Доклады БГУИР*. 2021. Т. 19, № 3. С. 58–65. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-58-65>.

5. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. И. Жиганов, А. И. Мискоров. М.: Изд-во Моск. гос. технич. ун-та им. И. Э. Баумана, 2006.

References

1. Mukhina E., Bashta P. (2009) 3D Assembly: Through-Hole Technology in Silicon. *Electronics, Science, Technology, Business*. (2), 92–93 (in Russian)
2. ULPN-355-10-1-10-M – IPG Photonics Corporation. Available: <https://pdf.directindustry.com/pdf/ipg-photonics-corporation/ulpn-355-10-1-10-m/29249-947816.html> (Accessed 29 May 2024).
3. Veiko V. P., Libenzon M. N., Chervyakov G. G. (2008) *Interaction of Laser Radiation with Matter*. Moscow, Fizmatlit Publ. (in Russian).
4. Lanin V. L., Pham V. T., Lappo A. I. (2021) Through-Silicon-Via Formation of 3D Electronic Modules by Laser Radiation. *Doklady BGUIR*. 19 (3), 58–65. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-58-65> (in Russian).
5. Grigoryants A. G., Zhiganov I. I., Miskorov A. I. (2006) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University (in Russian).

Сведения об авторе

Лаппо А. И., ст. преп. каф. информационных технологий автоматизированных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-23
E-mail: lappo@bsuir.by
Лаппо Александр Игоревич

Information about the author

Lappo A. I., Senior Lecturer at the Information Technologies in Automated Systems Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-23
E-mail: lappo@bsuir.by
Lappo Aliaksandr Igaravich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-45-51>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО КАК ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКА ИСКУССТВЕННОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

А. О. ЗЕНЕВИЧ, С. В. ЖДАНОВИЧ, Т. А. МАТКОВСКАЯ, Е. В. НОВИКОВ

Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 17.07.2024

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

Аннотация. Показана возможность использования телекоммуникационного оптического волокна как основы для создания датчика освещенности. Датчик освещенности представляет собой отрезок оптического волокна, намотанный на цилиндрическую основу виток к витку. К выходному торцу этого отрезка волокна подключен фотоприемник. При сопоставлении возможности использования в датчике одномодового и многомодового телекоммуникационного оптического волокна отмечено, что для создания такого датчика наиболее подходит многомодовое оптическое волокно. Установлено, что чувствительность датчика к световому потоку возрастает с уменьшением радиуса изгиба оптического волокна и с увеличением количества витков датчика. Получены зависимости чувствительности датчика к световому потоку от количества витков и их диаметра, которые позволяют разрабатывать конкретные конструктивные решения таких датчиков.

Ключевые слова: датчик освещенности, одномодовое и многомодовое оптические волокна, световой поток, лампы освещенности.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Оптическое волокно как основа для создания датчика искусственной освещенности / А. О. Зеневич [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 45–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-45-51>.

OPTICAL FIBER AS A BASIS FOR CREATION LIGHT SENSOR

ANDREY O. ZENEVICH, SERGEY V. ZHDANOVICH,
TATIANA A. MATKOVSKAIA, EVGENEY V. NOVIKOV

Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 17.07.2024

Abstract. The possibility of using telecommunication optical fiber as a basis for creating a light sensor is shown. The light sensor is a section of optical fiber wound on a cylindrical base turn to turn. A photodetector is connected to the output end of this fiber section. When comparing the possibility of using single-mode and multimode telecommunication optical fiber in the sensor, it is noted that multimode optical fiber is most suitable for creating such a sensor. It is established that the sensitivity of the sensor to the luminous flux increases with a decrease in the bending radius of the optical fiber and with an increase in the number of turns of the sensor. Dependences of the sensitivity of the sensor to the luminous flux on the number of turns and their diameter are obtained, which allow developing specific design solutions for such sensors.

Keywords: light sensor, single-mode and multimode optical fibers, luminous flux, light lamps.

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

For citation. Zenevich A. O., Zhdanovich S. V., Matkovskaia T. A., Novikov E. V. (2024) Optical Fiber as a Basis for Creation Light Sensor. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 45–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-45-51> (in Russian).

Введение

В настоящее время датчики освещенности используются для автоматического контроля работы систем, в которых предполагаются включение, выключение, настройка и регулировка уровня освещения, а также в приборах с функцией автоматической регулировки яркости изображений для оптимального восприятия последних человеком. Большинство таких датчиков являются электрическими устройствами [1–5] и не могут применяться в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

Для использования в пожаро- и взрывоопасных помещениях подходят волоконно-оптические датчики, в которых фоточувствительный элемент сопрягается с оптическим волокном, а последнее служит только для передачи информационного сигнала [6]. Помимо этого, информацию о состоянии таких датчиков можно определять на достаточно больших расстояниях (до 25 км). Поэтому цель исследований авторов – определение возможности использования оптического волокна для создания датчиков освещенности, в которых чувствительным элементом является непосредственно волокно.

Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве объектов исследования использовались одномодовое и многомодовое оптические волокна. Исследования были выполнены на экспериментальной установке, структурная схема которой показана на рис. 1.

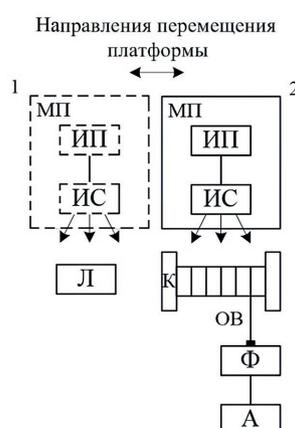


Рис. 1. Экспериментальная установка: ИП – источник питания; ИС – источник света; МП – механическая платформа; Л – люксметр; К – катушка; ОВ – оптическое волокно; Ф – фотоприемник; А – амперметр; 1, 2 – положения механической платформы
Fig. 1. Experimental setup: ИП – power supply; ИС – light source; МП – mechanical platform; Л – luxmeter; К – optical fiber reel; ОВ – optical fiber; Ф – photodetector; А – ammeter; 1, 2 – mechanical platform position

Экспериментальная установка функционирует следующим образом. На механической платформе МП размещены сменный источник света ИС, подключенный к источнику питания ИП. Механическая платформа обеспечивает перемещение источника света относительно люксметра Л и катушки датчика К и имеет два фиксированных положения. В положении 1 световой поток источника подается на люксметр, который измеряет величину освещенности, а в положении 2 источник света освещает катушку, и производятся измерения параметров датчика. При перемещении механической платформы сохраняется одинаковая величина светового потока. На цилиндрическую катушку наматывается отрезок оптического волокна ОВ виток к витку в один слой. К выходному торцу этого отрезка оптического волокна подключен фотоприемник Ф. Электрический ток, протекающий через фотоприемник, измеряется амперметром А.

Определение фототока, создаваемого при освещении фотоприемника источником света, выполняется следующим образом: вначале измеряется электрический ток I_p , протекающий через

фотоприемник в отсутствие освещения катушки, затем измеряется электрический ток I , протекающий через фотоприемник при наличии освещения катушки, после чего вычисляется значение фототока по формуле $I_{\phi} = I - I_r$.

В качестве фотоприемника используется фотодиод InGaAs с диапазоном спектральной чувствительности 0,5–1,7 мкм. Такой широкий спектральный диапазон был выбран для того, чтобы регистрировалось как видимое, так и ближнее инфракрасное излучение, создаваемое источником света. Также в данном спектральном диапазоне находятся «окна прозрачности» исследуемых оптических волокон [7–9].

Диаметр катушки может изменяться в пределах от 5 до 40 мм, его изменение приводит к изменению диаметра витка оптического волокна. Диапазон диаметров выбран таким потому, что при диаметрах менее 5 мм может наступить излом оптического волокна, а при более 40 мм фототок фотоприемника достигает некоторого минимального значения, которое уже не изменяется с дальнейшим увеличением диаметра.

В экспериментальной установке использовались следующие источники света: лампа накаливания, светодиодные лампы (теплый белый и нормальный белый свет), галогенная и люминесцентная лампы. Эти лампы были выбраны для исследований, поскольку они достаточно часто используются для освещения помещений.

Для оценки влияния изменения числа витков на фототок при постоянном диаметре витка использовалась величина S , которая определялась по следующей формуле:

$$S = \frac{\Delta I_{\phi}}{\pi d \Delta N} = \frac{I_{2\phi} - I_{1\phi}}{\pi d (N_2 - N_1)}, \quad (1)$$

где d – диаметр витка; ΔI_{ϕ} – изменение фототока; ΔN – изменение числа витков оптического волокна; $I_{1\phi}$, $I_{2\phi}$ – фототоки для числа витков оптического волокна N_1 и N_2 соответственно.

Все измерения, результаты которых представлены в статье, выполнялись в соответствии с требованиями [10]. При этом обеспечивались следующие условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 гПа.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе исследования получены значения фототоков при одинаковой величине освещенности катушки различными лампами с минимальным из исследуемых диаметром витка 5 мм. При этом число витков составляло 10. Данные о фототоках, полученные при значении освещенности 4000 лк, представлены в табл. 1. Такая достаточно большая освещенность характерна для зрительной работы наивысшей точности [11]. Кроме того, это минимальная освещенность, при которой удавалось зарегистрировать фототок для всех типов ламп, используемых при проведении исследований, для 10 витков диаметром 5 мм. Далее в исследованиях использовалась эта величина освещенности.

Таблица 1. Значения фототоков при использовании разных типов ламп освещения
Table 1. The values of the photocurrents when using different types of lighting lamps

Тип волокна	Фототок, нА, для лампы				
	накаливания	галогенной	светодиодной		люминесцентной
			нормальный белый	теплый белый	
Одномодовое	0,41	0,14	0,02	0,01	0,03
Многомодовое	14,50	5,00	0,05	0,04	0,23

Как следует из табл. 1, наибольшее значение фототока получено для ламп накаливания, а наименьшее – для светодиодных ламп (теплый белый), независимо от вида оптического волокна. Такое отличие в значениях фототока для разных ламп освещения связано с различным спектральным составом излучения этих ламп. Для спектра ламп накаливания и галогенных ламп характерно наличие излучения ближнего инфракрасного диапазона от 0,8 до 1,7 мкм [12]. В спектре излучения других исследуемых ламп этот диапазон практически отсутствует [13]. Следует отметить, что для диапазона 0,8–1,7 мкм наблюдались меньшие потери мощности оптического излучения в оптическом волокне, чем для волн видимого спектра излучения. Также для видимого

спектра излучения чувствительность фотоприемника была несколько меньше, чем для инфракрасного диапазона 0,8–1,7 мкм.

Для всех видов освещенности большее значение фототока наблюдалось для многомодовых оптических волокон, чем для одномодовых. Это связано с тем, что диаметр сердцевины многомодового волокна больше, чем у одномодового. Поэтому при одинаковых значениях освещенности на фотоприемник поступают разные значения светового потока оптического излучения при использовании одномодового и многомодового оптических волокон. Это приводит к возникновению разных фототоков в фотоприемнике. Большее значение фототока наблюдается для большего светового потока оптического излучения, характерного для многомодового оптического волокна.

Для постоянного значения освещенности увеличение диаметра витка при одном и том же количестве витков приводит к уменьшению фототока, что связано с ростом коэффициента отражения света от боковой поверхности оптического волокна при увеличении диаметра витка этого волокна. Увеличение количества витков без изменения их диаметра ожидаемо приводит к росту величины фототока при постоянном значении освещенности, что связано с расширением площади освещаемой поверхности чувствительного элемента оптического датчика. Это наблюдалось для всех типов исследуемых оптических волокон.

В табл. 2 приведены значения S для одномодового и многомодового оптических волокон для всех рассматриваемых видов ламп при диаметре витка 5 мм. Для многомодового оптического волокна при одних и тех же диаметре и количестве витков значения фототоков превосходили значения фототоков для одномодового оптического волокна, так как диаметр многомодового оптического волокна, как уже отмечалось, больше, чем одномодового. Поэтому общая площадь боковой поверхности оптического волокна, через которую оптическое излучение проникает в сердцевину этого волокна, больше для многомодовых, чем для одномодовых оптических волокон.

Таблица 2. Значения параметра S при использовании разных типов ламп освещения
Table 2. The values of the S parameter when using different types of lighting lamps

Тип волокна	Значение S , нА/мкм, для лампы				
	накаливания	галогенной	люминесцентной	светодиодной	
				нормальный белый	теплый белый
Одномодовое	0,86	0,27	0,04	0,02	0,01
Многомодовое	38,54	10,67	0,64	0,14	0,13

С учетом того, что для создания датчиков освещенности использовалось многомодовое оптическое волокно, на рис. 2 показаны зависимости фототока от диаметра витка d для этого волокна. Зависимости получены при постоянном значении освещенности 4000 лк и 15-ти витках оптического волокна. Как следует из графиков, увеличение диаметра витка приводит к уменьшению значения фототока для всех исследуемых ламп. Для других значений освещенности и количества витков оптического волокна вид зависимостей сохранялся.

Характер зависимостей $I_{\text{ф}}$ от d для одномодового и многомодового оптических волокон был одинаковым. Однако для многомодового оптического волокна значения фототоков для одинаковых диаметров d превосходили значения фототоков для одномодового оптического волокна.

Как видно из рис. 2, наибольшее значение фототока регистрировалось при освещении лампой накаливания, наименьшее – светодиодной лампой (теплый белый свет) во всем исследуемом интервале d . Как было отмечено выше, при увеличении диаметра витка более 40 мм зависимость фототока от диаметра витка принимает постоянные значения. В таком случае величина фототока меньше по сравнению с наличием витков с диаметром от 5 до 40 мм. Это свидетельствует о том, что оптическое излучение может проникать в оптическое волокно через его боковую поверхность даже в отсутствие витков.

На рис. 3 показаны зависимости величины S от диаметра катушки при освещении лампой накаливания для одномодового и многомодового оптических волокон. Как видно из графиков, уменьшение диаметра витка приводит к росту S . Это связано с тем, что при меньших диаметрах витка наблюдаются большие значения фототока для одинаковой освещенности (рис. 2) и изменения фототока $\Delta I_{\text{ф}}$. Во всем исследуемом диапазоне диаметров витка значение S для многомодовых оптических волокон превосходило это же значение для одномодовых. Для других ламп освещения характер зависимостей величины S от диаметра катушки был аналогичным.

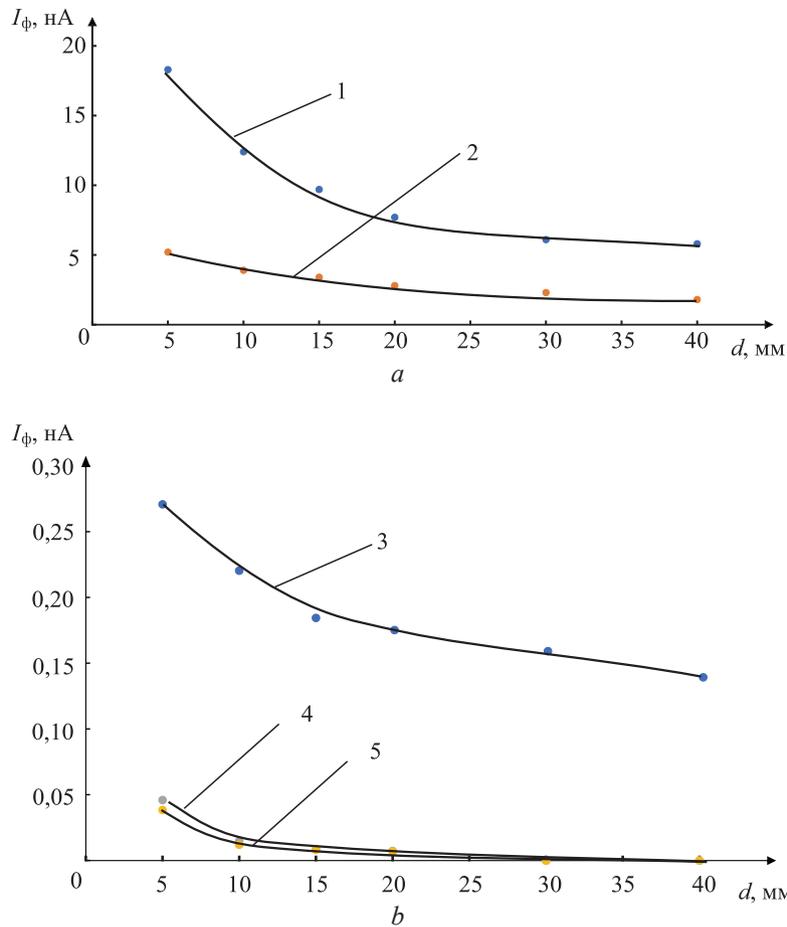


Рис. 2. Зависимость фототока от диаметра витка для многомодового оптического волокна для разных видов ламп: 1 – накаливания; 2 – галогенная; 3 – люминесцентная; 4, 5 – светодиодная, нормальный белый и теплый белый соответственно
Fig. 2. Dependence of photocurrent on the diameter of the turn for multimode optical fiber for different types of lamps: 1 – incandescent; 2 – halogen; 3 – fluorescent; 4, 5 – LED, normal white and warm white respectively

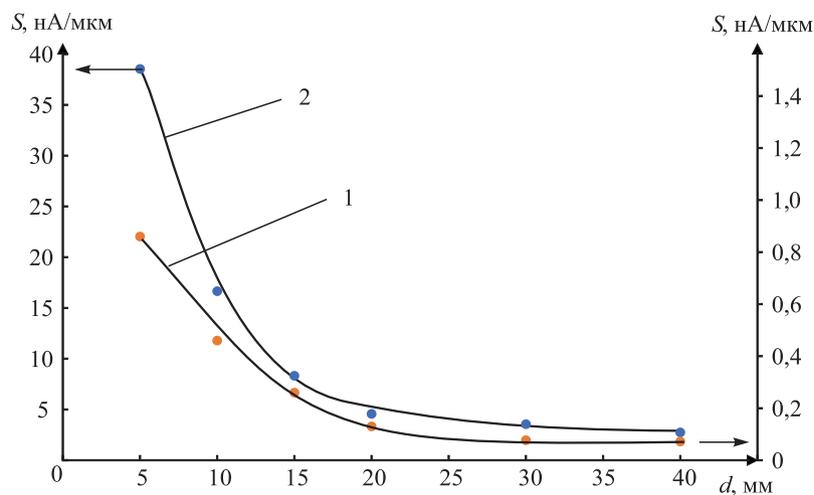


Рис. 3. Зависимость S от диаметра катушки при освещении лампой накаливания для одномодового (1) и многомодового (2) оптических волокон
Fig. 3. Dependence of the S on the diameter of the coil under illumination with an incandescent lamp for single-mode (1) and multimode (2) optical fibers

Заключение

1. Показана возможность применения телекоммуникационного оптического волокна как основы для создания датчика освещенности, который представляет собой оптическое волокно, намотанное на цилиндрическую поверхность виток к витку. Для создания такого датчика лучше всего подходит многомодовое телекоммуникационное оптическое волокно.

2. Установлено, что величина фототока, формируемого датчиком, зависит от количества витков и их диаметра. Значение фототока возрастает при постоянной освещенности с уменьшением радиуса изгиба оптического волокна и с увеличением числа витков.

3. Зависимости чувствительности датчика к световому потоку от количества витков и их диаметра позволяют разрабатывать конкретные конструктивные решения таких датчиков.

Список литературы

1. Панкрашкин, А. Датчики уровня освещенности, приближения и цвета от компании Avago Technologies / А. Панкрашкин // Компоненты и технологии. 2006. № 7. С. 68–72.
2. Сысоева, С. Датчики окружающего света от компании ROHM Semiconductor – готовое решение для оптимальных систем / С. Сысоева // Компоненты и технологии. 2010. № 8. С. 138–144.
3. Papalias, T. A. Making Sense of Light Sensors / T. A. Papalias, M. Wong // Intersil Corp. 2007. <https://www.eetimes.com/making-sense-of-light-sensors>.
4. Верхулевский, К. Датчики видимого света компании Microsemi / К. Верхулевский, Ю. Шаропин // Компоненты и технологии. 2007. № 6. С. 56–60.
5. Котюк, А. Ф. Датчики в современных измерениях / А. Ф. Котюк. М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006.
6. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоши [и др.]; пер. с япон. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. М.: Техносфера, 2010.
8. Govind, P. Agrawal Fiber-Optic Communication Systems / P. Govind. New York: Wiley-Interscience, 2002.
9. Скляр, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О. К. Скляр. СПб.: Лань, 2021.
10. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий: ГОСТ ISO/IEC 17025–2019.
11. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-153–2009 (02250).
12. Биске, К. Субъективные оценки цветопередачи в зависимости от спектра излучения источников света / К. Биске, К. Вандал, К. Юнгнич // Светотехника. 2007. № 5. С. 14–17.
13. Бугров, В. Е. Оптоэлектроника светодиодов / В. Е. Бугров, К. А. Виноградова. СПб.: НИУ ИТМО, 2013.

References

1. Pankrashkin A. (2006) Light, Proximity and Color Sensor from Avago Technologies. *Components and Technologies*. (7), 68–72 (in Russian).
2. Sysoeva S. (2010) Ambient Light Sensors from ROHM Semiconductor – a Ready-Made Solution for Optimal Systems. *Components and Technologies*. (8), 138–144 (in Russian).
3. Papalias T. A., Wong M. (2007) Making Sense of Light Sensors. *Intersil Corp*. <https://www.eetimes.com/making-sense-of-light-sensors>.
4. Verhulevsky K., Sharopin Y. (2007) Visible Light Sensors from Microsemi. *Components and Technologies*. (6), 56–60 (in Russian).
5. Kotyuk A. F. (2006) *Sensors in Modern Measurements*. Moscow, Radio i Svyaz, Goryachaya Liniya – Telekom Publ. (in Russian).
6. Okoshi T., Okamoto K., Otsu M., Nishihara H., Kyuma K., Hatate K. (1990) *Fiber Optic Sensors*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. (in Russian).
7. Dmitriev S. A., Slepov N. N. (2010) *Fiber Optic Technology: Current State and New Prospects*. Moscow, Technosphere Publ. (in Russian).
8. Govind P. (2002) *Agrawal Fiber-Optic Communication Systems*. New York, Wiley-Interscience.
9. Sklyarov O. K. (2021) *Fiber-Optic Networks and Communication Systems*. St. Petersburg, Lan Publ. (in Russian).
10. GOST ISO/IEC 17025–2019. *General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories* (in Russian).
11. Technical Code of Established Practice 45-2.04-153–2009 (02250). *Natural and Artificial Lighting. Building Design Standards* (in Russian).

12. Biske K., Vandaal K., Jungnich K. (2007) Subjective Assessments of Color Rendering Depending on the Emission Spectrum of Light Sources. *Lighting Engineering*. (5), 14–17 (in Russian).
13. Bugrov V. E., Vinogradova K. A. (2013) *LED Optoelectronics*. St. Petersburg, NRU ITMO Publ. (in Russian).

Вклад авторов

Зеневич А. О. осуществил научное руководство исследованием, сформулировал научные гипотезы, проверенные посредством эксперимента, принял участие в интерпретации результатов исследования.

Жданович С. В. принял участие в разработке методики проведения исследования, анализе и интерпретации результатов исследования.

Матковская Т. А. произвела настройку экспериментальной установки, провела измерение и обработку результатов, подготовила статью к опубликованию.

Новиков Е. В. разработал методику проведения исследования, принял участие в интерпретации его результатов, подготовил статью к опубликованию.

Authors' contribution

Zenevich A. O. carried out scientific management of the research, formulated scientific hypotheses tested by experiment, took part in the interpretation of the research results.

Zhdanovich S. V. took part in the development of research methodology, analysis and interpretation of research results.

Matkovskaia T. A. adjusted the experimental setup, measured and processed results, and prepared the article for publication.

Novikov E. V. developed the methodology for conducting the study, took part in the interpretation of its results, prepared the article for publication.

Сведения об авторах

Зеневич А. О., д-р техн. наук, проф., ректор Белорусской государственной академии связи (БГАС)

Жданович С. В., канд. техн. наук, доц., зав. отраслевой лабораторией перспективных информационно-коммуникационных технологий, БГАС

Матковская Т. А., асп. БГАС

Новиков Е. В., канд. техн. наук, доц., дир. Института современных технологий связи

Адрес для корреспонденции

220114, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2
Белорусская государственная академия связи
Тел.: +375 29 509-02-29
E-mail: tandem7m@gmail.com
Матковская Татьяна Александровна

Information about the authors

Zenevich A. O., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Rector of the Belarusian State Academy of Communications (BSAC)

Zhdanovich S. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Industry Laboratory of Perspective Information and Communication Technologies, BSAC

Matkovskaia T. A., Postgraduate, BSAC

Novikov E. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Director of the Institute of Modern Communication Technologies

Address for correspondence

220114, Republic of Belarus,
Minsk, F. Skorina St., 8/2
Belarusian State Academy of Communications
Tel.: +375 29 509-02-29
E-mail: tandem7m@gmail.com
Matkovskaia Tatiana Alexandrovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-52-61>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.82

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С НАЗЕМНЫМИ РАДИОСИСТЕМАМИ

В. И. МОРДАЧЕВ, Д. А. ЦИОНЕНКО

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

Поступила в редакцию 22.05.2024

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

Аннотация. Для анализа электромагнитной совместимости низкоорбитальных группировок спутниковой связи (НГСС) с наземными радиосистемами проведена оценка плотности потока мощности радиочастотного электромагнитного излучения, создаваемого НГСС у поверхности Земли. Оценка основана на анализе системных характеристик НГСС, параметров космических аппаратов и земного сегмента (абонентских терминалов, шлюзовых станций). Проанализированы условия, при которых излучение космических аппаратов может приводить к помехам функционирования наземных фиксированных служб связи, в том числе радиорелейных линий связи, использующих те же частоты на вторичной основе. Установлено, что при увеличении количества космических аппаратов и шлюзовых станций в одной НГСС вероятность создания помех функционированию радиорелейной линии со стороны этой НГСС уменьшается из-за увеличения минимального угла места обслуживания абонентских терминалов. Однако увеличение количества развернутых НГСС требует ужесточения требований к функционированию каждой из них для предотвращения помех.

Ключевые слова: негеостационарные системы спутниковой связи, радиоэлектронные средства, радиорелейная связь, электромагнитная совместимость, электромагнитное излучение, диаграмма направленности, модели наихудшего случая.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена в рамках научного проекта № 23-3172 при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Оценка электромагнитной совместимости низкоорбитальных группировок спутниковой связи с наземными радиосистемами / В. И. Мордачев, Д. А. Ционенко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 52–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-52-61>.

EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF LOW-ORBIT SATELLITE COMMUNICATION CONSTELLATIONS WITH TERRESTRIAL RADIO SYSTEMS

VLADIMIR I. MORDACHEV, DZMITRY A. TSYANENKA

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

Submitted 22.05.2024

Abstract. To analyze the electromagnetic compatibility of low-orbit satellite constellations of communication (LOSCC) with ground-based radio systems, the power flux density of radio-frequency electromagnetic radiation generated by LOSCC near the Earth's surface was estimated. The estimate is based on the analysis

of LOSCC system characteristics, spacecraft and ground segment (subscriber terminals, gateway stations) parameters. The conditions under which spacecraft radiation can cause interference with the functioning of terrestrial fixed communication services, including radio relay communication lines, using the same frequencies on a secondary basis were analyzed. It was found that with an increase in the number of spacecraft and gateway stations in the LOSCC, the probability of interference with the functioning of the radio relay line from this LOSCC decreases due to an increase in the minimum elevation angle of subscriber terminals. However, an increase in the number of deployed LOSCCs requires stricter requirements for the functioning of each of them to prevent interference.

Keywords: non-geostationary systems of satellite communication, radioelectronic equipment, radio relay communications, electromagnetic compatibility, electromagnetic radiation, radiation pattern, worst-case models.

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

Gratitude. The work was carried out within the framework of scientific project No 23-3172 with the financial support of the Ministry of Education of the Republic of Belarus.

For citation. Mordachev V. I., Tsyantenka D. A. (2024) Evaluation of Electromagnetic Compatibility of Low-Orbit Satellite Communication Constellations with Terrestrial Radio Systems. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 52–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-52-61> (in Russian).

Введение

Развитие технологий широкополосного доступа в интернет, интернета вещей, связи машина-машина, автоматической идентификации, навигации и позиционирования повышает спрос на услуги высокоскоростной передачи данных. Это определяет темпы наращивания многочисленных низкоорбитальных группировок спутниковой связи (НГСС). Развиваются действующие группировки спутниковой связи (Globalstar second-generation, Orbcomm OG2, Iridium NEXT) [1], введены в эксплуатацию группировки Starlink SpaceX (4408 космических аппаратов (КА) в соответствии с заявкой [2]) и OneWeb (планируемое количество КА – 716 [3]). По состоянию на начало 2024 г., на орбитах находилось 12 597 КА, из них 4714 составляют группировку Starlink Gen1, выведены на орбиту 936 КА Starlink V2 Mini и 620 КА OneWeb. В стадии проектирования находится ряд НГСС, наиболее крупные из которых – Astra (13 620 КА), Project Kuiper (7784 КА), Guo Wang (12 992), Stellar, Hughes, Orbit20, Hanwa Systems, Genesat, Efir/Sfera [1]. Поданы заявки на расширение и обновление группировок Starlink V2 (29 988 КА [4]) и OneWeb (47 844 КА и не менее 200 шлюзовых станций (ШС) [5]). Таким образом, общее число КА НГСС в ближайшее время может превысить 100 000.

Такой бурный рост количества КА, излучение которых направлено к земной поверхности, может привести к увеличению суммарной территориальной плотности нисходящего трафика спутниковой связи в 10^2 – 10^3 раз. Увеличение плотности потока мощности (ППМ) электромагнитного (ЭМ) излучения, которое создается НГСС на поверхности Земли, может привести к помехам функционированию наземных радиослужб различного статуса, использующих полосы частот НГСС на вторичной основе [6], в частности, радиорелейных линий (РРЛ) связи. Анализ электромагнитной совместимости (ЭМС) НГСС и РРЛ предлагается осуществлять следующим образом.

1. Определить ППМ на земной поверхности в пределах области облучения (пятна), создаваемого одним лучом антенны КА, на основе требований к качеству услуг связи НГСС.

2. Осуществить проверку соответствия ППМ каждого луча КА требованиям Статьи 21 Регламента радиосвязи [6] для полос частот, используемых для связи КА по нисходящим каналам с абонентскими терминалами (АТ) (10,7–12,7 ГГц) и ШС (17,8–19,3 ГГц).

3. Оценить мощность, принимаемую антенной РРЛ от совокупности лучей одной НГСС, создающей электромагнитный фон (ЭМФ), на основе рассчитанной ППМ одного луча и огибающих (справочных) диаграмм направленности (ДН) антенн РРЛ [7] с учетом многолучевого характера обслуживания абонентов НГСС, количества спутников в НГСС и распределения спутников по орбитам.

4. Обобщить полученные результаты на несколько НГСС, создающих ЭМФ в рассматриваемой области на поверхности Земли. Сравнить эти результаты с пределами, указанными в [6], и сделать вывод о возможности возникновения помех, создаваемых излучением НГСС, функционированию наземных фиксированных служб (ФС).

5. Сформулировать рекомендации для обеспечения ЭМС НГСС и наземных ФС.

Методика анализа электромагнитной совместимости низкоорбитальных группировок спутниковой связи с наземными радиосистемами

Расчет ППМ, создаваемой одним лучом КА, на поверхности Земли. В НГСС, которые осуществляют широкополосный доступ в интернет, обслуживание абонентов на поверхности Земли осуществляется в пределах лучей, сформированных антеннами КА. Каждый луч, которому соответствует частотный канал заданной ширины, имеет узкий главный лепесток (ГЛ) и облучает определенный участок земной поверхности (пятно луча). Для уменьшения уровня внутрисистемных помех соседние лучи соответствуют различным частотным каналам и поляризациям. Как правило, в нисходящих каналах НГСС используется излучение с правой и левой круговой поляризацией [2, 3].

ППМ на земной поверхности в пределах пятна, создаваемого одним лучом КА, может быть определена на основе требований к качеству предоставляемых услуг связи и системных параметров НГСС. Исходными данными для оценки ППМ являются: скорость передачи информации, ширина полосы частот радиоканала, который соответствует одному лучу, характеристики элементов системы (рабочая температура, коэффициент усиления (КУ) антенн КА, АТ и ШС, коэффициент шума радиоприемников наземного сегмента).

Скорость передачи информации C_R по каналу с шириной полосы Δf_1 определяется отношением мощности полезного сигнала P_s , принимаемого АТ, к суммарной мощности шума и помех P_n , которая зависит от характеристик приемника и условий приема:

$$P_n = P_0 K_N (1 + K_C), P_0 = k T_0 \Delta f_1, K_C = P_{in} / P_0, \quad (1)$$

где P_0 – уровень теплового шума, Вт; K_N – коэффициент шума радиоприемника, ед.; K_C – коэффициент превышения мощностью помех уровня теплового шума приемника; k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T_0 – температура приемника (выбрана равной стандартной температуре $T_0 = 290$ К); P_{in} – мощность помех, Вт.

Минимальная мощность полезного сигнала P_s на входе приемника, необходимая для обеспечения скорости передачи информации C_R по одному каналу шириной Δf_1 , определяется по формуле

$$P_s = P_n (2^{C_R / \Delta f_1} - 1). \quad (2)$$

Эта же мощность может быть выражена через ППМ излучения, которое падает на облучаемую антенну приемника, находящегося в пятне луча [8]:

$$P_s = Z_T A_{effR} F_R(\delta, \varphi) |\xi|^2 (1 - |\Gamma_R|^2), \quad (3)$$

где Z_T – ППМ, Вт/м², которую должна обеспечить излучающая антенна КА для создания заданной скорости передачи информации C_R ; $F_R(\delta, \varphi)$ – нормированная ДН приемной антенны по мощности, ед., в направлении спутника с углом места δ и азимутом φ ; ξ – поляризационный фактор, ед.; Γ_R – коэффициент отражения токовых волн от нагрузки приемной антенны, ед.; A_{effR} – эффективная площадь приемной антенны, м²:

$$A_{effR} = \lambda_i^2 D_{nR} / 4\pi; G_{Rmax} = D_{nR} \eta_R, \quad (4)$$

λ_i – длина волны, соответствующая i -му лучу, $\lambda_i = c/f_i$; c – скорость ЭМ-волн в вакууме; G_{Rmax} – КУ приемной антенны в максимуме ДН; D_{nR} – коэффициент направленного действия приемной антенны, ед.; $\eta_R = 1 - \text{КПД}$ приемной антенны, ед.

Полагается, что передающая антенна КА и приемные антенны АТ и ШС имеют одинаковую рабочую поляризацию, т. е. $|\xi|^2 = 1$, они согласованы с нагрузкой в рабочей полосе частот $\Gamma_R = 0$, и ГЛ ДН приемной антенны ориентирован вдоль луча КА, обслуживающего данную область, $F_R(\delta, \varphi) = 1$. Тогда, подставляя (1) в (2) и приравнивая полученное выражение к (3) при учете (4), для ППМ Z_T , которая создается лучом КА, передающим информацию со скоростью C_R в полосе Δf_i , на несущей $f_i = c/\lambda_i$ получаем:

$$Z_{Ti} = 4\pi k T_0 (2^{C_R / \Delta f_i} - 1) \Delta f_i f_i^2 K_N K_\Sigma / (c^2 G_{Rmax}). \quad (5)$$

Анализ соответствия характеристик излучения НГСС требованиям [6]. Статья 21 [6] содержит ограничения, выполнение которых обеспечивает защиту наземной ФС от помех, связанных с передачей информации по нисходящим каналам «КА–АТ» в полосе частот 10,7–12,7 ГГц

и «КА–ШС» в полосе 17,7–19,3 ГГц ([2, 3, 6]). Ограничения наложены на предельные значения ППМ, которые создаются излучениями антенн КА НГСС на поверхности Земли в зависимости от угла места δ спутника.

Сравним результаты, полученные с применением (5) при подстановке данных, характерных для системы Starlink Gen1 [2, 9, 10], с ограничениями Статьи 21 [6]. Полоса частот 10,7–12,7 ГГц, используемых в системе Starlink Gen1 для связи по нисходящему каналу, разбита на восемь частотных полос по 240 МГц [9]. Таким образом, при применении двух поляризаций каждый КА Starlink Gen1 может одновременно передавать информацию по 16 лучам нисходящих каналов «КА–АТ». Согласно [2, 9], максимальная скорость передачи информации спутника этой группировки по одному лучу составляет $C_{R\text{ AT max}} = 850$ Мбит/с. Тогда для указанной ширины канала при максимальной C_R , температуре приемника $T_0 = 290$ К и при $K_N = 1,5$ и $K_C = 0,5$ отношение сигнал-шум равно 10,6, и мощность на выходе приемной антенны АТ составит $P_{\text{sAT}} = 2,3 \cdot 10^{-11}$ Вт (2).

В качестве антенн АТ в НГСС Starlink Gen1 используются активные фазированные антенные решетки [2, 9, 10], которые имеют размеры порядка 0,4×0,4 м [9, 10] и $A_{\text{eff AT}} = 0,148$ м² при частоте 12,7 ГГц. Рассчитанная по (5) ППМ, которую создает излучающая антенна КА в пятне вертикального луча при $C_{R\text{ AT max}} = 850$ Мбит/с, равна $Z_{\text{AT/4k}} = -146$ дБ (Вт/м²/4кГц) (для опорной полосы 4 кГц). Для того чтобы максимальная скорость передачи информации в луче была постоянна при изменении его положения в зоне обслуживания КА, эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) его антенны должна изменяться в соответствии с формулой

$$E_{Ti} = G_{Ti}(f_i, \chi_{T0i}, \psi_{T0i})P_{Ti} = 4\pi R_i^2(\beta)Z_{Ti}, \quad (6)$$

где β – угол между направлением от КА к центру Земли и от КА в точку расположения АТ, $\beta = \arcsin(R_E \cos \delta / (H_S + R_E))$; R_E – радиус Земли; H_S – высота орбиты спутника; R_i – расстояние от КА до АТ вдоль i -го луча, м; χ_{T0i} , ψ_{T0i} – углы отклонения ГЛ i -го луча антенны КА в системе отсчета, связанной с КА.

Обслуживание АТ в НГСС Starlink Gen1 реализовано в диапазоне углов места спутника δ от 25° (минимальный угол места КА) до надира ($\delta = 90^\circ$). На рис. 1 показано сравнение ППМ на поверхности Земли (для опорной полосы 1 МГц), создаваемой одним лучом КА НГСС OneWeb (линия 1) и Starlink Gen1 – с учетом автоматической регулировки ЭИИМ (6) (линия 2), а также с ограничениями на ППМ Статьи 21 [6] (линия 3), для разных полос частот при значениях параметров моделирования: $C_R = 850$ Мбит/с; $H_S = 550$ км для Starlink Gen1; $H_S = 1200$ км для OneWeb.

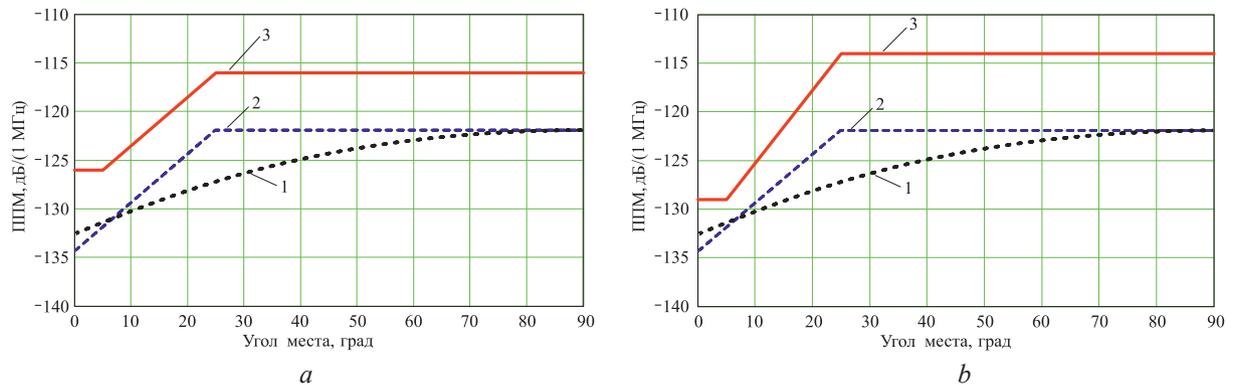


Рис. 1. Сравнение плотности потока мощности, создаваемой одним лучом космического аппарата в полосах частот 10,7–11,7 ГГц (а) и 11,7–12,7 ГГц (б): 1 – OneWeb; 2 – Starlink Gen1; 3 – с ограничениями Статьи 21 [6]

Fig. 1. Comparison of the power flux density generated by a single spacecraft beam in the frequency bands of 10.7–11.7 GHz (a) and 11.7–12.7 GHz (b): 1 – OneWeb; 2 – Starlink Gen1; 3 – with limitations of Article 21 [6]

Оценка ППМ на поверхности Земли при отсутствии регулировки мощности луча в зависимости от угла наклона, как это реализовано, например, в НГСС OneWeb первого поколения, осуществляется на основе подхода наихудшего случая, который соответствует наименьшим потерям при распространении ЭМ-волн в свободном пространстве: $L_{fs} = 10 \cdot \log(4\pi R^2) = 133$ дБ, где кратчайшее расстояние от спутника OneWeb, находящегося в точке надира, до поверхности Земли $R(0) = H_S = 1200$ км. Полагая, что ППМ на поверхности Земли при передаче данных на АТ

при $\delta = 90^\circ$ с максимальной скоростью 850 Мбит/с равна $Z_{AT/4k} = -146$ дБ (Вт/м²/4кГц), получаем, что максимальная ЭИИМ нисходящего канала $E_{4k} = -13,4$ дБ (Вт/4кГц) [3]. Считая, что ЭИИМ поддерживается на этом уровне для всех направлений, и учитывая потери, связанные только с увеличением расстояния до точки наблюдения (ТН) при отклонении луча от надира, получаем, что требования Статьи 21 [6] удовлетворяются с запасом не менее 5 дБ даже для наихудшего случая, соответствующего максимальной ЭИИМ (рис. 1, линия 2).

Рассмотрим соответствие излучения действующих НГСС требованиям Статьи 21 [6] для полосы частот 17,7–19,3 ГГц. В НГСС Starlink Gen1 для связи КА с ШС в этой полосе используются два частотных канала общей шириной 1,3 ГГц [2]. В рамках модели наихудшего случая примем, что скорость передачи информации в канале «КА–ШС» равна максимальной скорости передачи информации по одному лучу «КА–АТ», умноженной на количество лучей каждого КА (для каждой из поляризаций): $C_{RG\max} = N_{R\text{AT}} C_{R\text{AT}\max}$. При одинаковых условиях приема на антенны ШС и АТ ($T_0 = 290$ К; $K_N = 1,5$; $K_C = 0,5$) и количестве лучей $N_{R\text{AT}} = 8$ в НГСС Starlink Gen1 для максимальной скорости передачи информации по каналу «КА–ШС» получаем $C_{RG\max} = 5,1$ Гбит/с, и для соответствующей мощности сигнала на выходе антенны ШС $P_{SG} = 4,3 \cdot 10^{-10}$ Вт. Учитывая, что эффективная площадь антенны ШС Starlink $A_{effR} = 1,4$ м² [10], максимальное значение ППМ на поверхности Земли, создаваемой КА, расположенным на высоте 550 км над ШС, рассчитанное по (5), $-Z_G = 3 \cdot 10^{-10}$ Вт/м² или $Z_{G/1M} = -126,3$ дБ (Вт/м²/1МГц). Это значение совпадает со значением, приведенным в [2], что подтверждает адекватность разработанной модели и правильность оценок параметров системы Starlink Gen1. На рис. 2 показано сравнение ППМ, создаваемой одним КА Starlink Gen1 в диапазоне 17,7–19,7 ГГц с ограничениями [6] для группировки из 4408 КА (линия 1), при регулировке ЭИИМ (линия 2), без регулировки ЭИИМ (линия 3) при значениях параметров моделирования: $H_S = 550$ км; $Z_G = 3,03 \cdot 10^{-10}$ Вт/м².

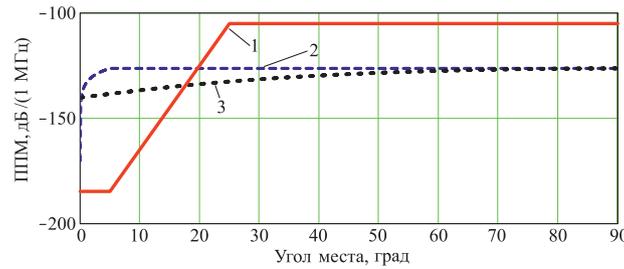


Рис. 2. Сравнение плотности потока мощности, создаваемой одним космическим аппаратом Starlink Gen1 в полосе 17,7–19,7 ГГц: 1 – с ограничениями [6]; 2, 3 – при регулировке и без регулировки эквивалентной изотропно излучаемой мощности соответственно

Fig. 2. Comparison of the power flux density generated by one Starlink Gen1 spacecraft in the 17.7–19.7 GHz band: 1 – with limitations [6]; 2, 3 – with and without adjustment of the equivalent isotropically radiated power, respectively

Модель наихудшего случая для расчета мощности излучения, принятой антенной РРЛ. Значение ППМ, созданное в пятне ГЛ луча КА, рассчитывается по (5) для лучей нисходящих каналов связи «КА–АТ» и «КА–ШС». ППМ вне пятна ГЛ луча получается умножением формулы (5) на значение нормированной ДН антенны КА при заданных углах χ_T, ψ_T отклонения от направления ГЛ. Мощность излучения, принятая антенной РРЛ по одному лучу (i – номер луча), определяется по (3) при подстановке в нее ППМ с учетом направления прихода луча от КА, задаваемой ДН $F_T(\chi_T, \psi_T)$ антенны КА, КУ $G_{RC\max}$ антенны РРЛ и ее нормированной ДН $F_{RC}(\delta, \varphi)$. Полагается, что $\Gamma_R = 0$, так как рабочие частоты НГСС и РРЛ совпадают, тогда:

$$P_{in\ i} = \frac{G_{RC\max}}{G_{R\max\ i}} B(C_R, \Delta f_i, K_{N1}, K_{C1}) F_{RC}(\delta_{RCi}, \varphi_{RCi}) F_{Ti}(\chi_{Ti}, \psi_{Ti}) \cdot |\xi_{i2}|^2 k T_{0R} \Delta f_i, \quad (7)$$

где $B(C_R, \Delta f_i, K_{N1}, K_{C1})$ – коэффициент, зависящий только от системных параметров НГСС:

$$B(C_R, \Delta f_i, K_{N1}, K_{C1}) = (2^{C_R/\Delta f_i} - 1) K_{N1} (1 + K_{C1}). \quad (8)$$

Для анализа воздействия излучения космического сегмента НГСС на объекты, расположенные на поверхности Земли, в Статье 22 [6] и в [11] вводится понятие суммарной эквивалентной ППМ (ЭППМ). В общем случае суммарная ЭППМ, создаваемая всеми лучами НГСС в (испыта-

тельной) ТН на поверхности Земли, изменяется с течением времени, и для ее вычисления операторами НГСС [2, 3] используется программное обеспечение, представленное в [11, 12]. Для оценки наихудшего возможного сценария, при котором ЭППМ в ТН имела бы максимальный уровень, необходимо выполнять статистическое моделирование [13]. Полученный результат сравнивается с пределами, установленными для процента времени, в течение которого ЭППМ, создаваемая излучениями всех КА в ТН, может превышать значение, заданное в Статье 22 [6]. В частности, анализ критерия помех для защиты ФС от изменяющихся во времени совокупных помех со стороны других служб радиосвязи, совместно использующих полосу частот 17,7–19,3 ГГц, основан на методике [14]. В основе методики лежит определение отношения помеха/шум I/N ($I/N = K_{CRC} = P_{in}/P_{0RC}$ (1)) для приемников указанной службы и его анализ для случаев длительного и кратковременного превышения предельных значений. Здесь в качестве мощности шума P_{in} выступает мощность, излученная совокупностью лучей всех КА всех НГСС и принятая антенной ФС, например, антенной РРЛ.

Полагая, что все антенны рассматриваемой НГСС, выполняющие одинаковые функции, идентичны ($G_{Rmax\ i} = G_{Rmax}$) и рабочая температура приемников НГСС и РРЛ на земной поверхности одинакова ($T_{0R} = T_{0RC}$), для коэффициента помеха/шум запишем:

$$K_{CRC} = \frac{G_{RCmax} \Delta f_i}{G_{Rmax} \Delta f_{RC}} B(C_R, \Delta f, K_{N1}, K_{\Sigma 1}) |\xi_{12}|^2 \sum_{i=1}^{N_V} F_{RC}(\delta_{RCi}, \Phi_{RCi}) F_{Ti}(\chi_{Ti}, \Psi_{Ti}), \quad (9)$$

где N_V – количество спутников НГСС, облучающих главными и боковыми лепестками (БЛ) область, в которой расположена антенна РРЛ; Δf_{RC} – ширина рабочей полосы частот РРЛ связи; ξ_{12} – поляризационный фактор, учитывающий влияние излучения антенн КА НГСС на антенны РРЛ, выбирается одинаковым для всех антенн КА и РРЛ.

Результаты анализа и их обсуждение

Анализ влияния связи «КА–ШС» на антенны РРЛ в рамках модели наихудшего случая. В рамках такой модели для связи «КА–ШС» полагается, что при штатном режиме работы ШС устанавливает связь со всеми КА, которые имеют угол места больший, чем минимальный угол, заданный для рассматриваемой НГСС (например, не менее 5° для Starlink Gen1 [2]). Для связи КА с ШС нет пространственного разделения по лучам, так как ШС представляет собой локализованный на малой площади комплекс антенн [10], $\Delta f_{RG} = 1,3$ ГГц. ГЛ параболических антенн КА, предназначенных для связи с ШС, постоянно направлены в область расположения ШС: $F_{Ti}(\chi_{Ti}, \Psi_{Ti}) = 1$. Скорость передачи информации по каналу «КА–ШС» максимальна. Движение спутников по орбитам является упорядоченным: расстояние между КА одинаковы на каждой орбите, сдвиги между КА на соседних орбитах одной оболочки постоянны. Для обеспечения максимального значения принятой мощности положим также, что направление ГЛ антенны РРЛ, расположенной вблизи ШС, лежит в плоскости, касательной к земной поверхности, и в плоскости одной из орбит НГСС. В этой плоскости $\varphi = 0^\circ$, а угол прихода излучения от КА к ШС равен углу прихода излучения на антенну РРЛ и углу места δ КА (рис. 3, а). На рис. 3 показано мгновенное положение КА, ближайших к ШС, обеспечивающее максимальную мощность помех со стороны НГСС станции РРЛ для параметров $H_S = 550$ км и $N_V = 1584$.

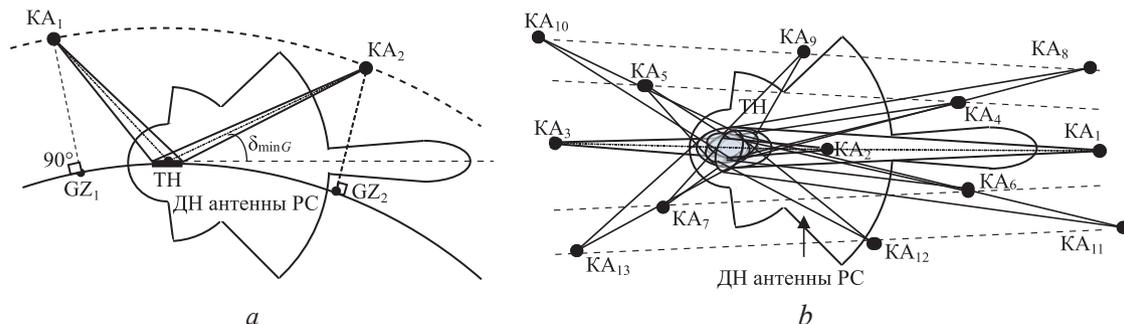


Рис. 3. Мгновенное положение космических аппаратов:

а – в вертикальной плоскости; б – в проекции на поверхность Земли

Fig. 3. Instantaneous position of spacecraft: a – in the vertical plane; b – in projection onto the Earth's surface

Для НГСС Starlink Gen1 при высоте орбиты $H_S = 550$ км и $\delta_{\min AT} = 25^\circ$ радиус зоны обслуживания АТ одним КА будет равен 941 км. Тогда для непрерывного обслуживания АТ минимальное количество КА на одной орбите N_{01} должно быть не менее 22, и угол, определенный из центра Земли, между спутниками на одной орбите составляет $16,3^\circ$. Для полного покрытия земной поверхности в одной оболочке Starlink Gen1 используется $N_{orb} = 72$ орбиты, и угол между узлами орбит составляет $2,5^\circ$. При $\delta_{\min G} = 5^\circ$ для связи КА с ШС получаем, что в НГСС Starlink Gen1 каждая ШС может установить связь с КА не более чем на 15 орбитах. Мгновенные положения КА на соседних орбитах отличаются на угол сдвига $\Delta\alpha = 8,8^\circ$, поэтому в наихудшем случае (рис. 3, б) одновременно на двух из ближайших к ШС орбит будет обслуживаться по три КА, на пяти орбитах – по два КА и на остальных – по одному КА.

Проведем анализ ЭМС для антенн РРЛ средней и низкой эффективности [7]. Антенна средней эффективности (типа 1) характеризуется шириной ГЛ по уровню -3 дБ $\theta_{3dB1} = 1^\circ$ (ДН считается аксиально симметричной). Антенна низкой эффективности (типа 2) имеет $\theta_{3dB2} = 3^\circ$. Тогда отношения диаметров антенн к длине волны соответственно $D_1/\lambda = 70$, $D_2/\lambda = 23$ и максимальные значения КУ: $G_{RC\max1} = 44,5$ дБи, $G_{RC\max2} = 35$ дБи [7, с. 4]. Нормированные ДН антенн РРЛ типов 1 и 2 средней эффективности с шириной ГЛ $\theta_{3dB1} = 1^\circ$ [7] и низкой эффективности с шириной ГЛ $\theta_{3dB2} = 3^\circ$ представлены на рис. 4.

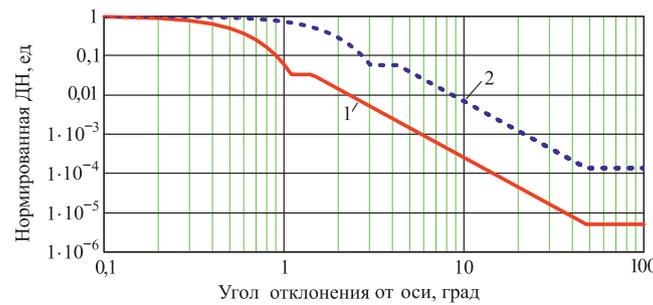


Рис. 4. Нормированная диаграмма направленности антенны:

1, 2 – средней и низкой эффективности соответственно

Fig. 4. Normalized radiation pattern of the radio relay line antenna:

1, 2 – medium and low efficiency, respectively

Согласно (9) учтем, что все лучи КА, направленные к ШС, имеют один и тот же тип рабочей поляризации – круговую [2, 3], а антенны РРЛ – линейную рабочую поляризацию [7]. Тогда на основании оценки наихудшего случая [15] поляризационная развязка $|\xi_{12}|^2 = 0,5$. Коэффициент, зависящий от системных параметров НГСС, $-B(C_R, \Delta f_{RG}, K_{N1}, K_{\Sigma 1}) = 82,24$ для $C_{RG\max} = 5,1$ Гбит/с и $\Delta f_{RG} = 1,3$ ГГц (на каждую поляризацию). Ширину рабочей полосы частот РРЛ Δf_{RC} выберем 500 МГц, тогда $\Delta f_{RG}/\Delta f_{RC} = 2,6$. Для антенн ШС $G_{R\max} = 47,7$ дБи [10]. Для определения суммы в (9) необходимы значения ДН антенны РРЛ для углов, под которыми видны КА из точки расположения ШС. Углы могут быть оценены на основании параметров НГСС Starlink Gen1: $\delta_{КА1} = 5,0^\circ$, $\delta_{КА4} = 20,3^\circ$, $\delta_{КА6} = 17,2^\circ$, $\delta_{КА8} = 5,7^\circ$, $\delta_{КА9} = 40,2^\circ$, $\delta_{КА12} = 35,1^\circ$. Углы отклонения от оси ГЛ антенны РРЛ для остальных КА больше 48° , и для них значение F_{RC} постоянно (рис. 4). Используя нормированную ДН для антенн РРЛ, представленную на рис. 4, для антенн РРЛ типа 1 в наихудшем случае получаем $K_{CRC1} = 0,305$ (или $-5,5$ дБ), а для типа 2 – $K_{CRC2} = 0,916$ (или $-0,38$ дБ).

Полученные значения для наихудшего случая являются мгновенными, которые соответствуют заданному положению антенн КА и ШС (рис. 3). Для сравнения с пределами, заданными в [14], следует оценить время, в течение которого превышаются значения I/N при движении спутников по орбитам. Зависимость от времени угла $\delta(t)$, характеризующего отклонение луча КА от оси ГЛ антенны РРЛ, определяется формулой

$$\delta_i(t) = \left| \arccos \left(\frac{(R_E + H_S) \sin(\omega t + \Delta\alpha_i)}{\sqrt{(2R_E H_S (1 - \cos(\omega t + \Delta\alpha_i))) + H_S^2}} \right) \right|, \quad (10)$$

где ω – угловая скорость КА на орбите (рад/с), зависящая от высоты орбиты, $\omega \sim (R_E + H_S)^{3/2}$; t – начальное время ($t = 0$), соответствует прохождению КА № 1 надира: $\delta_1(0) = 90^\circ$.

Поскольку КА НГСС в каждой орбитальной плоскости распределены равномерно, одно и то же пространственное расположение КА и максимальный K_{CRC} в ТН будут повторяться с пе-

риодом $T_{\text{НКА}} = 2\pi/(N_{01}\omega)$ (для Starlink Gen1 – $T_{\text{НКА}} = 270$ с). Используя формулу (9) и нормированную ДН антенны РРЛ (рис. 4), получаем, что I/N не превысит -10 дБ до тех пор, пока $\delta_{i1}(t) \geq 6,4^\circ$ для РРЛ с антеннами типа 1, и $\delta_{i2}(t) \geq 13,1^\circ$ – для типа 2. Используя (10), получаем, что время, за которое угол δ изменится от $6,4^\circ$ до $5,0^\circ$, составит 3,1 с. Изменению δ от $13,1^\circ$ до $5,0^\circ$ соответствует промежуток времени 18 с. Конфигурация, соответствующая наихудшему случаю (рис. 3), обусловлена излучением КА с номерами 1, 8 и 6. Возможные конфигурации, при которых будет наблюдаться превышение I/N значения -10 дБ, обусловлены излучениями спутников с номерами 4, 6, 11. Остальные конфигурации КА на орбитах не дают превышения I/N над уровнем -10 дБ.

Время превышения I/N над значением -10 дБ составляет 9,3 с, что соответствует 3,6 % от общего времени для антенн РРЛ типа 1. Для антенн РРЛ типа 2 время превышения I/N над значением -10 дБ равно 50 с, т. е. 18,8 % всего времени. Таким образом, параметры излучения НГСС Starlink Gen1 удовлетворяют требованиям [14] для долговременных оценок времени превышения (превышение значения I/N уровня -10 дБ может быть реализовано не более чем в 20 % времени). Результаты также коррелируют с данными, приведенными в [2], которые получены численным моделированием с применением ПО [12] и с учетом неравномерности трафика по времени [13].

При анализе краткосрочных превышений следует рассмотреть следующую ситуацию: ГЛ луча КА, реализующего связь по каналу «КА–ШС», направлен на ШС (под углом не менее 5°), при этом БЛ этого луча облучают антенну РРЛ таким образом, что это излучение принимается ГЛ антенны РРЛ (рис. 5). Для реализации данного процесса рассматриваемая антенна РРЛ должна находиться позади антенны ШС на линии, соединяющей ШС и точку GZ , соответствующую КА, который облучает рассматриваемую область. При высоте орбиты $H_S = 550$ км расстояние между антенной РРЛ типа 1 и ШС должно быть в интервале 391–500 км, а между антенной РРЛ типа 2 и ШС – 187–500 км (антенна РРЛ находится позади ШС).

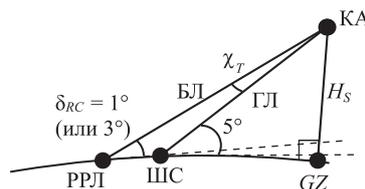


Рис. 5. Геометрическая модель задачи о кратковременных превышениях значений I/N , заданных в [14]
Fig. 5. Geometric model of the problem of short-term excesses of I/N values specified in [14]

Учитывая, что максимальная ППМ на внутренней границе пятна, создаваемого БЛ антенны КА, $0,5Z_G = 1,5 \cdot 10^{-10}$ Вт/м², то $I/N_{\text{max1}} = 12$ дБ – для антенн РРЛ типа 1 и $I/N_{\text{max2}} = 2$ дБ – для типа 2. Полученные результаты соответствуют значениям, приведенным в [2]. ППМ, которая создается БЛ антенны КА, изменяется со скоростью, определяемой изменением $F_T(\chi_T, \psi_T)$. Изменение этой функции при движении спутника по орбите связано с изменением направления ГЛ, поскольку луч от КА постоянно направлен на ШС:

$$\left| \frac{dF_T(\chi_T, \psi_T)}{dt} \right| = \left| \frac{dF_T(\chi_T, \psi_T)}{d\chi_T} \cdot \frac{d\chi_T}{dt} \right|, \quad (11)$$

и $d\psi/dt = 0$ в рассматриваемой плоскости, где I/N достигает максимальных значений.

Используя рис. 5, получаем, что при $H_S = 550$ км $\chi_{T1} = 0,515^\circ$ – для антенн типа 1 и $\chi_{T2} = 0,327^\circ$ – для типа 2. Применяя модель антенн типа 2 к антеннам КА и зная, что диаметр $D_{\text{КА}} \approx 20\lambda$ при КУ порядка 31–35 дБи [10], определим скорость убывания $F_T(\chi_T, 0)$ с увеличением угла χ_T по рис. 4 для антенн типа 2 (линия 2): $dF(\chi)/d\chi = 7,33$ град⁻¹. Средняя величина $\langle d\chi/dt \rangle$ определяется из (10), и для малых углов χ равна 0,45 град/с. Тогда процент времени краткосрочного превышения I/N_{max} для антенн РРЛ типа 1 равен 0,06 и для типа 2 – 0,037. Следовательно, излучение КА Starlink Gen1 удовлетворяет требованиям [14] для краткосрочного времени превышения заданных уровней.

Анализ влияния связи «КА–АТ» на антенны РРЛ в рамках модели наихудшего случая. Для каналов связи «КА–АТ» в полосе частот 10,7–12,7 ГГц анализ осуществляется на основе вероятности превышения ЭППМ, созданного излучениями антенн КА НГСС, значений ЭППМ, заданных в [6]. Для этих каналов связи расчет ЭММП в модели наихудшего случая следует осуществлять с учетом следующих технологических особенностей НГСС:

– обслуживание всех АТ на поверхности Земли в пределах пятна, которое создает ГЛ луча (определенный по уровню 3 дБ), осуществляется одновременно только одним лучом одного КА рассматриваемой НГСС. Остальные лучи КА, которые обслуживают АТ, принадлежащие соседним пятнам, могут облучать рассматриваемую область только БЛ;

– обслуживание АТ осуществляется с максимально возможной скоростью передачи информации в луче. Например, для НГСС Starlink Gen1 постоянство скорости обслуживания АТ обусловлено регулированием мощности в луче, который постоянно направлен на АТ при перемещении КА. При достижении минимального угла места КА ($\delta_{\min} = 25^\circ$) АТ переключается на луч следующего КА и т. д. [10]. Для НГСС OneWeb пятна лучей перемещаются вместе с КА, и происходит последовательное переключение АТ с одного луча КА на следующий луч этого же КА, а затем на лучи следующего КА и $\delta_{\min} = 40^\circ$ [3].

В силу этих особенностей и того, что δ_{\min} для лучей КА, которые обслуживают АТ, существенно превосходит ширину ГЛ $\theta_{3\text{дБ}}$ антенн РЛЛ, и ГЛ этих антенн направлены параллельно поверхности Земли, влияние каналов связи «КА–АТ» на РЛЛ минимально. Это связано с тем, что активные фазированные антенные решетки, используемые на КА для связи с АТ, обладают низким уровнем БЛ, и прием излучения этих БЛ антеннами РЛЛ минимизирован при штатном режиме работы НГСС.

Заключение

1. Разработанная модель наихудшего случая для оценки плотности потока мощности, создаваемой излучениями космических аппаратов низкоорбитальных группировок спутниковой связи (НГСС) на поверхности Земли, позволяет оценить электромагнитную совместимость НГСС и наземных систем фиксированных служб. Адекватность модели подтверждена совпадением результатов расчетов, проведенных с ее использованием, с результатами компьютерного моделирования по методикам [11, 12]. Преимущество модели – ее вычислительная эффективность, позволяющая рассчитать характеристики излучения каждой НГСС на основе ее системных параметров и обобщить полученные результаты на совокупность НГСС.

2. Режимы работы различных НГСС не согласованы друг с другом, и итоговые значения плотности потока мощности на земной поверхности, значения процентов времени превышения заданных уровней эквивалентной плотности потока мощности (и I/N) могут быть определены суммированием результатов, полученных для каждой из НГСС. Например, если на одном и том же участке земной поверхности осуществляется обслуживание абонентских терминалов несколькими НГСС с максимальной скоростью передачи данных, то пределы, приведенные в Статье 21 [6], могут оказаться превышенными, хотя излучение каждой НГСС соответствует ее требованиям. Такая ситуация может наблюдаться при высокой пространственной плотности абонентских терминалов.

3. На основании анализа можно сформулировать следующие рекомендации для обеспечения электромагнитной совместимости совокупности НГСС и наземных фиксированных служб:

– необходимо обеспечить работу всех НГСС исключительно в штатном режиме, когда при углах места космических аппаратов меньших, чем регламентированные, излучение этих аппаратов в направлении земной поверхности отсутствует;

– при развитии и модернизации НГСС целесообразно увеличивать значение минимальных углов места космических аппаратов, при которых осуществляются обслуживание абонентских терминалов и связь со шлюзовыми станциями, обеспечивать пространственную избирательность лучей космических аппаратов. Это может быть достигнуто при уменьшении, по возможности, высоты орбит космических аппаратов, увеличении их количества на орбите (и числа орбит) и увеличении количества шлюзовых станций;

– целесообразно, по возможности, ограничить количество НГСС, одновременно обслуживающих одну и ту же территорию. Допустима одновременная работа не более трех НГСС при условии предоставления услуг качеством, не ниже чем Starlink Gen1, каждой из них;

– при использовании в наземных радиорелейных линиях на вторичной основе полос частот НГСС следует избегать установки антенн радиорелейных линий вблизи шлюзовых станций и ориентации их главного лепестка вдоль плоскости орбиты НГСС;

4. Перспективным направлением развития НГСС является обеспечение связи между спутниками на орбите, как это предусмотрено в проекте Starlink V2 [4]. Это позволит существенно уменьшить плотность потока мощности на земной поверхности за счет резкого уменьшения облучений космических аппаратов к шлюзовым станциям.

Список литературы / References

1. *NewSpace Index*. Available: <https://www.newspace.im> (Accessed 31 October 2024).
2. LLC SAT-MOD-20200417-00037. *Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings*. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20200417-00037> (Accessed 23 November 2023).
3. SAT-LOI-20160428-00041. *Application for Fixed Satellite Service by WorldVu Satellites Limited. Attachment*. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOI-20160428-00041/1134939> (Accessed 14 December 2023).
4. LLC FCC SAT-LOA-20200526-00055. *Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings*. Available: <https://fcc.report/IBFS/FCC SAT-LOA-20200526-00055> (Accessed 23 November 2023).
5. *OneWeb Non-Geostationary Satellite System (LEO). Phase 2: Modification to Authorized System. Attachment B. Technical Information to Supplement Schedule S*. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MPL-20200526-00062/2379706> (Accessed 10 November 2023).
6. Radio Regulations (2020) ITU. 1. Geneva, Switzerland.
7. F.699-8. *Reference Radiation Patterns for Fixed Wireless System Antennas for Use in Coordination Studies and Interference Assessment in the Frequency Range from 100 MHz to 86 GHz*. Rec. ITU-R. 2018.
8. Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. (2022) Influence of Spatial Selectivity of Radiation of Base Stations on the Level of Electromagnetic Background Created by Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 20 (7), 56–64. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-56-64> (in Russian).
9. Pekhterev S. (2020) *Global Broadband Satellite Internet Network Starlink*. Available: <https://www.comnews.ru/content/209438/2020-10-07/2020-w41/enciklopediya-starlink> (Accessed 10 November 2023) (in Russian).
10. Pekhterev S. (2023) *Mini-Encyclopedia Starlink. Part 3. NCC, Gateways, Subscriber Terminal*. Available: <https://novosti-kosmonavtiki.ru/articles/76678/> (Accessed 14.12.2023) (in Russian).
11. S.1592. Methodology to Assess Compliance of Non-Geostationary Fixed-Satellite Service Satellite Systems in Circular Orbits with the Additional Operational Limits on Downlink Equivalent Power Flux-Density in Article 22 of the Radio Regulations. *Rec. ITU-R*.
12. S.1503-2. Functional Description to be Used in Developing Software Tools for Determining Conformity of Non-Geostationary-Satellite Orbit Fixed-Satellite System Networks with Limits Contained in Article 22 of the Radio Regulations. *Rec. ITU-R*.
13. S.1588. Methodologies for Calculating Aggregate Downlink Equivalent Power Flux-Density Produced By Multiple Non-Geostationary Fixed-Satellite Service Systems into a Geostationary Fixed-Satellite Service Network. *Rec. ITU-R*.
14. F.1495-2. Interference Criteria to Protect the Fixed Service from Time Varying Aggregate Interference from Other Radiocommunication Services Sharing the 17.7–19.3 GHz Band on a Co-Primary Basis. *Rec. ITU-R*.
15. Bogdanor J. L., Pearlman R. A., Siegel M. D. (1974) *Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program. Volume I. User's Manual Engineering Section*. Rome Air Development Center, Griffiss AFB NY.

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

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

Ционенко Д. А., канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр. НИЛ 1.7, 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 17 293-84-38
E-mail: emc@bsuir.by
Ционенко Дмитрий Александрович

Information about the authors

Mordachev V. I., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Research Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment” (Lab 1.7), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Tsyankenka D. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the Lab 1.7, 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 17 293-84-38
E-mail: emc@bsuir.by
Tsyankenka Dzmitry Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-62-69>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.142.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРИКЛАДНОЙ ЛОГИКИ

Ю. О. ГЕРМАН, О. В. ГЕРМАН

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

Поступила в редакцию 21.07.2024

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

Аннотация. Рассматривается использование эвристического нейросетевого решателя для решения NP-трудных задач (определения (не)противоречивости системы логических уравнений). Эта проблема актуальна и важна, например, при выполнении экспресс-анализа непротиворечивости базы знаний экспертной системы, принятии решений на основе нечетких логических моделей, распознавании многомерных объектов и др. Обученная нейросеть выполняет роль высокоэффективного эвристического решателя, причем количество уравнений и переменных, используемых в логической модели, мало влияет на скорость принятия решений нейросетью, одновременно вероятность точного решения для параметрически определенного класса задач близка к единице. Под параметрически определенным классом задач понимается множество задач, описываемых многомерными векторами параметров, удовлетворяющих некоторому общему закону распределения вероятностей. Одно такое семейство параметров, предложенное и использованное для обучения нейросети, приведено в статье. Показано, как генерировать противоречивые и непротиворечивые экземпляры индивидуальных систем логических уравнений. Проведена серия более чем из 200 экспериментов по апробации модели, получены границы доверительного интервала вероятности правильного решения, что позволяет судить об эффективности модели. Показано, как применить нейросеть для проверки (не)противоречивости логической модели знаний. Построенная модель может быть эффективно дополнена новыми векторами параметров и применена в различных областях прикладных исследований.

Ключевые слова: нейросеть, система логических уравнений, эвристический поиск решения, проверка непротиворечивости.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Герман, Ю. О. Использование нейросетей для решения задач прикладной логики / Ю. О. Герман, О. В. Герман // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 62–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-62-69>.

USAGE OF NEURAL NETWORKS FOR SOLVING APPLIED LOGIC PROBLEMS

JULIA O. GERMAN, OLEG V. GERMAN

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

Submitted 21.07.2024

Abstract. The article deals with heuristic neural network-based solver for NP-hard problems (determining the (in)consistency of a system of logical equations). This problem is relevant and important, for example, when performing express analysis of the consistency of the knowledge base of an expert system, decision-making based on fuzzy logic models, recognition of multidimensional objects, etc. The trained neural network plays the role of a highly efficient heuristic solver, and the number of equations and variables used in the logical model has little

effect on the speed of decision-making by the neural network, while the probability of an exact solution for a parametrically defined class of problems is close to one. A parametrically defined class of problems is understood as a set of problems described by multidimensional vectors of parameters that satisfy some general law of probability distribution. One such family of parameters, proposed and used for training a neural network, is given in the article. It is shown how to generate inconsistent and consistent instances of individual systems of logical equations. A series of more than 200 experiments to test the model was carried out, the limits of the confidence interval of the probability of a correct decision were obtained, which allows us to evaluate the effectiveness of the model. It is shown how to implement a neural network to check the (in)consistency of a logical knowledge model. The constructed model can be effectively supplemented with new parameter vectors and applied in various fields of applied research.

Keywords: neural network, system of logical equations, heuristic search for a solution, consistency check.

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

For citation: German Ju. O., German O. V. (2024) Usage of Neural Networks for Solving Applied Logic Problems. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 62–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-62-69> (in Russian).

Введение

Известно [1, 2], что задачи, связанные с решением систем логических уравнений (СЛУ), в частности задачи выполнимости булевых формул (SAT – satisfyability), в общем случае трудно-решаемы. Использование нейросетей для решения СЛУ активно исследовалось в [3–7]. В [2–4] отмечены основные недостатки нейросетей для точного решения SAT: необходимость огромного обучающего множества с миллионами экземпляров, критическая зависимость от обучающей выборки; время поиска решения может быть даже больше, чем у классических несетевых решателей, и др. Обучение нейросетевых решателей выполняется как на основе уже собранных известных решений (benchmarks), так и с использованием точных решателей типа MiniSat и др. В первом случае разработчик «привязан» к параметрам (способам генерации) SAT в используемом конкретном наборе, причем доступные наборы определяют в общем разные параметризованные классы SAT. Второй вариант требует значительных временных затрат на обучение.

Нейросетевые решатели (типа NeuroSAT, WALKSAT-Net и др.) для приближенного поиска решения связаны со следующими проблемами: возможность заикливания, остановка на локальном минимуме с потерей ответа, чувствительность к параметрам задачи. Такие решатели обладают серьезным недостатком – не всегда имеется возможность оценить истинность найденного решения (в случае невыполнимости). В [7] отмечается, что ни в классе точных, ни в классе приближенных решателей для SAT нет наилучшего. Согласно теореме Воррана и Hastad, нет эффективного статистически оптимального алгоритма для SAT. Поэтому требуется, например, выбор самого решателя под индивидуальные SAT либо использование группы приближенных решателей с выбором решения из найденного множества и т. п. Интерес представляет построение приближенного нейросетевого решателя, обученного для определенного параметризованного класса SAT как для самостоятельного использования, так и в коллективном контексте. Таких параметризованных классов необозримо много, поэтому выбор параметров определяет параметризованный класс, а не наоборот. Например, в [5] отмечено, что число параметров для обучения сети достигало 48, но не указано, что это предел.

Учитывая экспоненциальную вычислительную сложность SAT (на данный момент), параметризованный нейросетевой классификатор с фиксированным числом параметров не способен обеспечить (даже статистически) оптимальное решение для теоретически неограниченного числа задач SAT. Пусть построен точный классификатор на основе обученной нейросети с фиксированным числом параметров F . Тогда он будет решать задачу SAT за полиномиальное от размера описания SAT время, что невозможно, если SAT экспоненциально сложна. Размер входного описания вектора параметров зависит только от формата числового представления параметров и растет как логарифмическая функция $O(F \cdot \log_{10} \text{MaxSize})$, где MaxSize – максимальное по абсолютной величине возможное значение параметра (на 64-разрядной ЭВМ это 2^{64}). В данной статье число параметров равно восьми при статистически приемлемых результатах распознавания параметризованного класса, что в целом отрицает идею существенного наращивания их числа. Рассмотрим некоторый параметризованный класс SAT и построим для него приближенный нейросетевой решатель. Предлагается (это – первая цель исследований авторов) новая техника

генерации выполнимых и невыполнимых SAT, которой можно «охватить» весьма широкий диапазон параметризованных классов SAT. При этом время решения SAT даже сравнительно больших размеров (несколько сот переменных и несколько тысяч уравнений) оказывалось в пределах одной секунды на ноутбуке с частотой 2,5 ГГц.

Оценка эффективности приближенных SAT-решателей строится не так, как для точных, для которых критическими являются факторы потребляемого времени и памяти (в SATContest время решения ограничено, статистический анализ решателя не производится, полученные решения сравниваются с решениями, доставляемыми точным решателем). Общеизвестные подходы типа SATContest не отменяют стандартный статистический анализ, основанный на сборе и обработке экспериментальных данных для исследуемого параметризованного класса SAT (вторая цель исследований авторов).

Предварительные определения и данные

Дизъюнкт – это логическая формула, связывающая булевские переменные или их отрицания посредством операции логического ИЛИ (дизъюнкции) [1, 8]. Задача SAT заключается в установлении того, имеет решение данная система дизъюнктов или нет (т. е. является противоречивой).

Для обучения нейросети решению SAT нужно сгенерировать обучающее множество индивидуальных задач SAT, для которых заранее известно, имеют они решение или нет. Задача SAT должна быть представлена в обучающей таблице вектором параметров. Использовались следующие параметры (атрибуты): **A1** – отношение числа дизъюнктов к числу переменных; **A2** – среднее число переменных в дизъюнкте; **A3** – отношение числа вхождений переменных с отрицанием к общему числу вхождений переменных в дизъюнктах; **A4** – отношение числа дизъюнктов, содержащих только негативные или только позитивные переменные, к общему числу дизъюнктов; **A5** – отношение числа двухлитерных дизъюнктов к общему числу дизъюнктов; **A6** – отношение сумм длин всех дизъюнктов к произведению числа дизъюнктов на число переменных (длина дизъюнкта равна числу указанных в нем переменных с отрицанием или без; тавтологические дизъюнкты не рассматривались); **A7** – отношение числа вхождений переменных без отрицания к числу вхождений переменных с отрицанием; **A8** – отношение атрибута **A1** к **A7** ($A1/A7$). Так, для СЛУ

$$\begin{aligned} D1 &= x_1 \vee \sim x_2 \vee \sim x_3; \\ D2 &= \sim x_1 \vee \sim x_4; \\ D3 &= x_2 \vee x_4; \\ D4 &= x_3 \vee x_4; \\ D5 &= x_1 \vee x_2; \\ D6 &= \sim x_3 \vee \sim x_4 \end{aligned} \tag{1}$$

имеем вектор параметров

Параметр	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Значение	1,50	2,16	0,46	0,83	0,83	0,54	1,17	1,28

СЛУ (1) непротиворечива и имеет одно из решений: $x_1, x_2, x_3, \sim x_4$.

Выбор параметров – это задача исследователя. Для приближенного нейросетевого решателя важно статистически удовлетворительное итоговое решение, при этом и число параметров, и их информативность смещаются на второй план. Иногда задачу отбора параметров возлагают на саму генеративную нейросеть. Для того чтобы автоматизировать процесс накопления данных, задачу SAT сведем к задаче о минимальном покрытии 0,1-матрицы [8]. Соответствующая матрица показана на рис. 1.

Каждый дизъюнкт представлен отдельным столбцом. В ячейке столбца пишем «1», если переменная в этой строке входит в данный дизъюнкт (с учетом знака). Присоединяем к матрице дополнительные столбцы-тавтологии вида $x_i \vee \sim x_i$. Покрытием является множество строк, таких, что в каждом столбце матрицы покрытия хотя бы одна из этих строк содержит «1». Покрытие минимально, если оно минимально возможного размера. Имеет место следующий результат: если система дизъюнктов выполнима, то минимальное покрытие соответствующей 0,1-матрицы содержит ровно n строк (n – число переменных) [8]. В рассматриваемом примере минимальное покрытие содержит четыре строки.

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	DD1	DD2	DD3	DD4
x_1	1				1		1			
x_2			1		1			1		
x_3				1					1	
x_4			1	1						1
$\sim x_1$		1					1			
$\sim x_2$	1							1		
$\sim x_3$	1					1			1	
$\sim x_4$		1				1				1

Рис. 1. Матрица покрытия для системы логических уравнений (1)
Fig. 1. Covering matrix for system of logical equations (1)

Генерировались матрицы покрытия на основе Python-скрипта случайным образом на основе биномиального закона распределения вероятностей pr появления «1» в ячейках, чтобы определять числовые значения показателей А1–А8. Вероятности pr случайно выбирались из значений, равномерно распределенных на фиксированном интервале (см. ниже). При этом требовалось обеспечить наличие хотя бы одной «1» в столбце, что практически имеет место при $m \times pr \geq 1$ (m – число строк матрицы, $m = 2n$; n – число переменных).

Если решение есть, проверяем, сгенерирована ли хотя бы одна «1» в ячейках, соответствующих переменным из наперед заданного решения. Если ни одна из сгенерированных единиц не соответствует значению переменной в заданном решении, то «перебрасываем» любую случайно сгенерированную «1» в произвольно выбираемую ячейку, соответствующую элементу решения. Если решения для исходной системы дизъюнктов нет, то следует искусственно присоединить к матрице 0,1-подматрицу SM с $(n + 1)$ -столбцами; SM заполняется так, чтобы в каждой строке было не более одной единицы, но не было нулевых столбцов. Очевидно, возможности заполнения такой матрицы ограничены, поскольку имеются столбцы с одной единственной единицей. Для устранения этого недостатка можно ввести дополнительную переменную (-ные), например z , и расширить матрицу (рис. 2), определив условие $\sim z = 1$. Для этого вводятся два фиктивных дизъюнкта DD7 и DD8:

$$x_1 \vee z \text{ и } \sim x_1 \vee z. \quad (2)$$

	DD1	DD2	DD3	DD4	DD5	DD6	DD7	DD8
x_1	1						1	
x_2	1							
x_3		1						
x_4			1					
x_5			1					
z							1	1
$\sim x_1$				1				1
$\sim x_2$				1				
$\sim x_3$					1			
$\sim x_4$					1			
$\sim x_5$						1		
$\sim z$		1				1		

Рис. 2. Минимальное покрытие с не менее чем шестью строками
Fig. 2. Minimum coverage with at least six lines

Минимальное покрытие представленной подматрицы SM не может содержать пять и менее строк. То есть исходная система дизъюнктов на переменных $x_1 \dots \sim x_5$ не имеет допустимого решения даже с учетом фиктивной переменной z в (2). Описанная техника позволяет эффективно генерировать выполнимые и невыполнимые системы дизъюнктов случайным образом, что особенно важно для больших по размеру матриц СЛЮ. Число фиктивных переменных можно увеличить, действуя по аналогии.

Результаты экспериментов и статистический анализ

Для построения нейросети сгенерировано случайным образом 47 0,1-матриц покрытия с заранее известными решениями Target = 0 (SAT невыполнима) и Target = 1 (SAT выполнима). Использовали csv-файл с обучающим набором и Python-код, приведенный ниже:

```
import pandas as pd
from sklearn.neural_network import MLPClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
import pickle
# Read the CSV file into a DataFrame
data = pd.read_csv('c:/neuralex5.csv')
# Separate the features (X) and the target variable (y)
X = data.drop('Target', axis=1)
y = data['Target']
# Create an MLP classifier
mlp = MLPClassifier(hidden_layer_sizes=(50, 50), max_iter=1000, random_state=42)
# Train the classifier
mlp.fit(X, y)
X_test=[[1.5,2.16,0.61,0.83,0.83,0.54,1.17,1.28]]
y_pred = mlp.predict(X_test)
# Evaluate the classifier on the test set
print("y_pred:", y_pred)
accuracy = mlp.score(X, y)
print("accuracy=", accuracy)
# Save the model to a file
filename = 'c:/neuralnet_model.pkl'
with open(filename, 'wb') as file:
    pickle.dump(mlp, file)
    print('neuralnet model saved')
```

Модель созданной нейросети сохранена в файле c:/neuralnet_model.pkl. Было проведено 200 экспериментов. Размеры генерируемых матриц в каждом эксперименте выбирались случайно и варьировались от 10×10 до 600×2000 (строк × столбцов) со случайно определяемой плотностью единичных элементов в пределах [0,01–0,20] (табл. 1). В 200 экспериментах решение было потеряно в восьми случаях.

Таблица 1. Экспериментальный состав
Table 1. Experiment composition

Число строк	Число столбцов	Плотность единичных элементов	Число матриц
[10, 20]	[10, 30, 80]	[0,10–0,20]	50
[40, 60]	[80, 100, 150]	[0,015–0,060]	60
[100, 400, 600]	[1000, 2000]	[0,01–0,03]	90

Для каждого эксперимента значение SAT устанавливалось точно, как объяснено выше. Таким образом, и ложно отрицательные, и ложно положительные ответы трактовались как потеря решения нейросетью. Общее число экспериментов N определялось на основе формулы, используемой как для нормального, так и для биномиального (Бернулли) распределения:

$$N = (Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2(k + 1)/f^2, \quad (3)$$

где $Z_{\alpha/2}$ – z-оценка для соответствующего уровня значимости (например, $Z_{\alpha/2} = 1,96$ для $\alpha = 0,05$); Z_{β} – z-оценка для желаемой статистической мощности (например, $Z_{\beta} = 0,84$ для 80%-ной мощности); k – число независимых критериев (предикторов), $k = 7$; f – величина эффекта, $f = R/\sqrt{1 - R^2}$; R – значение множественного коэффициента корреляции между предикторами и выходной переменной.

Так, для $R \in [0,3-0,4]$, что соответствует средней величине эффекта, получим $N \in [157-209]$. Использовали скрипт Python для оценки доверительного интервала (confidence interval) вероятности биномиального распределения неверного ответа построенной нейросети на основе результатов экспериментов и метод

```
# Calculate confidence interval
confidence_interval = sms.DescrStatsW(data).tconfint_mean()
класса statsmodels.stats.api as sms с выводом результата Confidence Interval:
(0.012607200785124728, 0.06739279921487527).
```

Доверительный интервал для вероятности ошибки заключения нейросети по данным экспериментов вычисляется по формуле

$$\text{mean} - t_{\alpha/2} \cdot \text{std_err}, \text{mean} + t_{\alpha/2} \cdot \text{std_err}, \quad (4)$$

где mean – среднее значение; std_err – стандартное отклонение; $t_{\alpha/2}$ – критическое значение t -распределения для заданного уровня значимости (обычно 95 %, что соответствует ошибке не более 5 %).

Формула (4) может быть использована для биномиального распределения, которое приближенно аппроксимируется нормальным при числе испытаний не менее 30.

Массив data фиксирует случаи неверного заключения нейросети там, где стоит «1». Таким образом, если индивидуальная задача SAT попадает в параметризованный класс, определяемый обучающей таблицей, то вероятность правильного итогового решения достаточно высока. Гипотеза о принадлежности индивидуального вектора (**A1**, ..., **A8**) данному классу векторов может быть проверена с помощью статистических критериев. Формула для расчета t -критерия Стьюдента в случае проверки гипотезы о принадлежности многомерного объекта выборке на основе евклидова расстояния выглядит следующим образом:

$$t = (d - \mu) / (s/n^{0.5}), \quad (5)$$

где t – t -статистика; d – евклидово расстояние между многомерным объектом и центром выборки (центроидом); μ – среднее значение расстояния до центроида в выборке; s – стандартное отклонение расстояний в выборке; n – размер выборки (количество объектов в выборке).

Используя таблицу критических значений статистики t -критерия Стьюдента, находим соответствующее значение t для заданного уровня значимости ($\alpha = 0,05$) и числа степеней свободы ($df = n - 1$). Для принятия объекта в выборку вычисленное по (5) значение не должно превосходить $t_{\text{кр}}$.

Пример практической задачи

Механизм принятия решений на основе нейросети можно реализовать в продукционной экспертной системе с базой знаний вида «если $f_1 \& f_2 \& \dots \& f_n$, то g », где посылки f_i – суть значения (условия, ограничения) некоторых параметров, а g – заключение. Необходимо привести параметры и заключение к булевским переменным (в общем случае). Область изменения каждого параметра разбивается на интервалы $I_{j1}, I_{j2}, \dots, I_{jk}$; каждый интервал I_{ji} представляется одной и только одной булевой переменной x_{ji} . То же выполняется и для заключений при введении переменных g_1, g_2, \dots, g_r согласно классу (области) соответствующего заключения. В систему (базу) знаний включаются условия: $\sum_i x_{ji} = 1, \sum_p g_p \leq 1$ (нельзя получить два разных заключения, но можно ни одного). Первое заменяется системой дизъюнктов: $x_{j1} \vee x_{j2} \vee \dots \vee x_{jk}; \sim x_{j1} \vee \sim x_{j2}; \sim x_{j1} \vee \sim x_{j3}; \dots; \sim x_{jk-1} \vee \sim x_{jk}$ ($j = 1, J$), второе – на $\sim g_1 \vee \sim g_2; \sim g_1 \vee \sim g_3; \dots; \sim g_{r-1} \vee \sim g_r$.

Одна из важных задач – выполнить экспресс-анализ базы знаний на непротиворечивость. Здесь возможны разные постановочные варианты. В простейшем случае противоречивость иллюстрируется наличием, например, продукционных правил вида $x_p = a \& x_q = b \rightarrow y$ с входным набором $\text{IN}_\alpha = \{x_p = a, x_q = b\}$ и $x_p = a \rightarrow \sim y$ с входным набором $\text{IN}_\beta = \{x_p = a\}$, $\text{IN}_\beta \subseteq \text{IN}_\alpha$ и включающими заключениями y и $\sim y$. Для проверки нужно (временно) исключить условие $\sum_p g_p \leq 1$ и попеременно добавлять в систему знаний конъюнкции $g_i \& g_k$, проверяя выполнимость системы дизъюнктов. Если для какой-то пары $g_i \& g_k$ система выполнима, то легко проверить, имеет

место $\text{IN}_i \subseteq \text{IN}_k$ или нет. Более сложный случай предполагает, что посылки правил могут состоять из произвольных логических формул. Здесь проверка непротиворечивости представляет самостоятельную задачу.

Заключение

1. Нейронную сеть как эвристический решатель можно использовать для задач SAT весьма большого размера. При этом предложенный вектор параметров схватывает «усредненные» характеристики матрицы покрытия, т. е. не «чувствителен» к размерам задачи, конкретному виду SAT, размерам противоречивой части в случае невыполнимости и др. Речь идет о среднестатистической SAT в рамках параметризованного класса задач.

2. Предложен эффективный способ генерации выполнимых и невыполнимых SAT, который можно использовать для обучения нейросети на системах очень больших размеров, генерируемых для интересующих исследователя вероятностных распределений единичных элементов в матрицах покрытия.

3. Техника анализа статистического решателя реализуется в рамках стандартной статистической парадигмы, а не путем сравнения с точным решателем. Приближенные нейросетевые решатели можно интегрировать в точные, например, используя поиск на основе техники разрешения конфликтов – CDCL (conflict-driven clause learning) (одно из первых алгоритмических решений было предложено в [9]). Альтернативный вариант – коллективное применение приближенных решателей.

Список литературы

1. Garey, M. R. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness / M. R. Garey, D. S. Johnson. New York: W. H. Freeman and Co., 1979.
2. Handbook of Satisfiability / A. Biere [et al.] // IOS Press. Amsterdam, 2021.
3. Selsam, D. Guiding High Performance SAT Solvers with Unsat-Core Predictions / D. Selsam, N. Bjorner // arXiv. 2019. P. 1–19.
4. Machine Learning for SAT: Restricted Heuristics and New Graph Representations / M. Shirokikh [et al.] // arXiv. 2023. P. 1–17.
5. Machine Learning Methods in Solving the Boolean Satisfiability Problem / W. Guo [et al.] // arXiv. 2022. P. 1–8.
6. Menai, M. B. Solving the Maximum Satisfiability Problem Using an Evolutionary Local Search Algorithm / M. B. Menai, M. Batouche // The International Arab Journal of Information Technology. 2005. Vol. 2, No 2. P. 154–161.
7. An Overview of Modern Learning Techniques in Constraint Solving / A. Popescu [et al.] // Journal of Intelligent Information Systems. 2022. Vol. 58. P. 91–118.
8. Герман, О. В. Введение в теорию экспертных систем и обработку знаний / О. В. Герман. Минск: ДизайнПро, 1995.
9. Птичкин, В. А. Об эвристическом усилении метода резолюций / В. А. Птичкин, О. В. Герман, В. Г. Найденко // Автоматика и вычислительная техника. 1993. Вып. 21. С. 88–93.

References

1. Garey M., Johnson D. S. (1979) *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York, W. H. Freeman and Co. Publ.
2. Biere A., Heule M., van Maaren H., Walsh T. (2021) *Handbook of Satisfiability*. IOS Press. Amsterdam.
3. Selsam D., Bjorner N. (2019) Guiding High Performance SAT Solvers with Unsat-Core Predictions. *arXiv*. 1–19.
4. Shirokikh M., Shenbin M., Alekseev A., Nikolenko S. (2023) Machine Learning for SAT: Restricted Heuristics and New Graph Representations. *arXiv*. 1–17.
5. Guo W., Zhen H.-L., Li X., Yuan M., Jin Y. (2022) Machine Learning Methods in Solving the Boolean Satisfiability Problem. *arXiv*. 1–8.
6. Menai M. B., Batouche M. (2005) Solving the Maximum Satisfiability Problem Using an Evolutionary Local Search Algorithm. *The International Arab Journal of Information Technology*. 2 (2), 154–161.
7. Popescu A., Seda P.-E., Felfernig A., Uta M., Alas M., Le V.-M. (2022) An Overview of Modern Learning Techniques in Constraint Solving. *Journal of Intelligent Information Systems*. 58, 91–118.

8. German O. V. (1995) *Introduction to the Theory of Expert Systems and Knowledge Processing*. Minsk, DesignPro Publ. (in Russian).
9. Ptichkin V. A., German O. V., Naydenko V. G. (1993) On Heuristic Strengthening the Resolution Method. *Automatics and Computing Technique*. (21), 88–93 (in Russian).

Вклад авторов

Герман Ю. О. выполнила тестирование модели нейросети и сбор экспериментальных данных. Написала введение, заключение, указала способ применения t -критерия Стьюдента для параметризованного класса задач выполнимости булевых формул.

Герман О. В. определил общую концепцию работы, указал способ генерации индивидуальных задач выполнимости булевых формул с наперед известным ответом об их выполнимости/невыполнимости.

Author's contribution

German Yu. O. performed testing of the neural network model and collection of experimental data. Wrote the introduction, conclusion, indicated the method of applying the Student's t -test for a parameterized class of satisfiability problems for Boolean formulas.

German O. V. defined the general concept of the work, indicated a method for generating individual SAT problems with a priori known answer about their satisfiability/unsatisfiability.

Сведения об авторах

Герман Ю. О., канд. техн. наук, доц. каф. информационных технологий автоматизированных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Герман О. В., канд. техн. наук, доц. каф. информационных технологий автоматизированных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 612-42-32
E-mail: ovgerman@tut.by
Герман Олег Витольдович

Information about the authors

German Ju. O., Cand. of Sci., Associate Professor at the Information Technologies in Automated System Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

German O. V., Cand. of Sci., Associate Professor at the Information Technologies in Automated System 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 29 612-42-32
E-mail: ovgerman@tut.by
German Oleg Vitoldovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-70-80>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.511.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ С ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

М. П. БАТУРА, Л. Ю. ШИЛИН, Д. П. КУКИН

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

Поступила в редакцию 15.11.2024

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

Аннотация. Представлено математическое описание импульсных систем и устройств фазовой синхронизации с использованием метода переменных состояния. Проанализирована обобщенная структурная схема импульсной системы с фазовым управлением. Предложено математическое описание процессов, протекающих в системе в следующих режимах работы – количество импульсов из цепи обратной связи и количество импульсов со входа устройства равны, частота выходного сигнала меньше заданной, а также в режиме частотного детектирования при значительном превышении частоты сигнала цепи обратной связи. Рассмотренные математические модели исследуемого класса устройств учитывают нелинейный характер систем, работающих в режиме частотного фазового детектирования, а при моделировании процессов на ЭВМ существенно сокращают время расчетов.

Ключевые слова: импульсные системы, устройства фазовой синхронизации, режим работы, кусочно-непрерывные математические модели.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Батура, М. П. Математическое моделирование систем фазовой синхронизации с импульсной модуляцией / М. П. Батура, Л. Ю. Шилин, Д. П. Кукин // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 70–80. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-70-80>.

MATHEMATICAL MODELING OF PHASE-LOCKING SYSTEMS WITH PULSE MODULATION

MIKHAIL P. BATURA, LEONID YU. SHILIN, DMITRY P. KUKIN

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

Submitted 15.11.2024

Abstract. The paper presents a mathematical description of pulse systems and phase synchronization devices using the state variable method. The generalized structural diagram of a pulse system with phase control is analyzed. A mathematical description of the processes occurring in the system in the following operating modes – the number of pulses from the feedback circuit and the number of pulses from the device input are equal, the output signal frequency is less than the specified one is proposed, as well as the frequency detection mode with a significant excess of the feedback circuit signal frequency. The considered mathematical models of the studied class of devices take into account the nonlinear nature of systems operating in the frequency phase detection mode, and significantly reduce the calculation time when modeling processes on a computer.

Keywords: pulse systems, phase synchronization devices, operating mode, piecewise continuous mathematical models.

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

For citation. Batura M. P., Shilin L. Yu., Kukin D. P. (2024) Mathematical Modeling of Phase-Locking Systems with Pulse Modulation. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 70–80. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-70-80> (in Russian).

Введение

Импульсные системы и устройства фазовой синхронизации находят широкое применение в промышленности и различных областях науки и техники, так как обладают рядом неоспоримых достоинств: высокой точностью и коэффициентом полезного действия, малыми габаритами и весом, простотой схемотехнической реализации, широким диапазоном рабочих частот. Но практическое применение различных модификаций импульсных систем и устройств фазовой синхронизации невозможно без их глубокого и всестороннего исследования на основе использования математических моделей систем фазовой синхронизации (СФС) с дискретизацией по времени и уровню и применения при анализе и синтезе таких методов, в которых эти эффекты учитывались бы в полной мере. Создание таких моделей является сложной задачей, а аналитические исследования их, как правило, либо затруднены, либо вообще невозможны; поэтому высокоточные математические модели ориентированы на работу с ЭВМ. При этом возникает необходимость создания моделей с различной точностью моделирования скорости расчетов.

В настоящее время на должном уровне разработана только теория традиционных аналоговых систем и устройств фазовой синхронизации. Результаты исследований в этой области опубликованы в большом количестве статей и обобщены в ряде монографий. Что касается класса дискретных СФС, включающих импульсные системы фазовой синхронизации (ИСФС), то их теория находится лишь в стадии развития и еще далека от завершения. Хорошо изучены ИСФС с амплитудно-импульсными модуляциями первого рода (АИМ-1), цифровые и гибридные системы. В меньшей степени развита теория СФС с широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляциями первого (ШИМ-1, ЧИМ-1) и второго рода (ЧИМ-2, ШИМ-2). Классификация этих модуляций дана в соответствии с [1–3]. Анализ нелинейных моделей проводился для систем первого порядка по приближенным моделям [4–9], системы более высокого порядка исследовались в линейном либо непрерывном варианте.

Построение математической модели

Точные математические модели ИСФС, учитывающие нелинейности элементов системы, нелинейность модуляции, импульсные свойства системы, требуют применения сложных математических процедур и, как следствие, значительных временных затрат. Для упрощения математической модели ИСФС можно предположить, что переходные процессы в системе протекают медленно, что можно записать в виде условия медленности

$$\bar{T}_n = \bar{T}_{n-1} + \Delta\bar{T}_n, \quad (1)$$

где $\Delta\bar{T}_n = \frac{\Delta T_n}{T_0}$, $\Delta T_n \ll T_{n-1}$; T_0 – период входного сигнала в установившемся режиме.

Выражение (1) допускает режимы, связанные с большими изменениями периода выходного сигнала системы, поэтому оно не эквивалентно условию

$$\frac{T_n - T_0}{T_0} \ll 1. \quad (2)$$

Более жесткое условие (2) предполагает квантование по времени с постоянным периодом, что справедливо при «малых» отклонениях частоты выходного сигнала от стационарного значения, и сводит модель СФС к амплитудно-импульсной системе. Если при соблюдении условия медленности пренебречь импульсным характером процессов, то математическое моделирование (ММ) СФС сводится к широко известным моделям непрерывных систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Авторами предлагаются упрощенные кусочно-непрерывные ММ СФС с использованием метода переменных состояния, которые впервые были получены в [10, 11].

Обобщенная структурная схема ИСФС для получения упрощенной ММ приведена на рис. 1, где $\varphi_{вх}(t)$ – начальная фаза входного сигнала; $\varphi_{вх1}(t), \varphi_{вх2}(t), \dots, \varphi_{вхN}(t)$ – начальная фаза входного сигнала после блока делителя частоты с фиксированным коэффициентом деления (ДФКД); $\varphi_{ос1}(t), \varphi_{ос2}(t), \dots, \varphi_{осN}(t)$ – начальная фаза сигнала цепи обратной связи; $\varphi_{\varepsilon1}(t), \varphi_{\varepsilon2}(t), \dots, \varphi_{\varepsilonN}(t)$ – сигнал фазового рассогласования; $\varphi_{\omega}(t)$ – начальная фаза выходного сигнала; $\varphi_g(t)$ – начальная фаза возмущающего воздействия, приведенная к выходу устройства; $\varphi_z(t)$ – начальная фаза выходного сигнала до появления возмущающего воздействия; ДПКД1, ДПКД2, ..., ДПКДN – делитель частоты с переменным коэффициентом деления; М1, М2, ..., MN – модуляторы входного сигнала; ЦФК1, ЦФК2, ..., ЦФKN – цепи фильтрации и коррекции; ДСУ1, ДСУ2, ..., ДСУN – дискретные сравнивающие устройства; С – суммирующее устройство; ОУ – объект управления; ПНЧ – преобразованная непрерывная часть устройства.

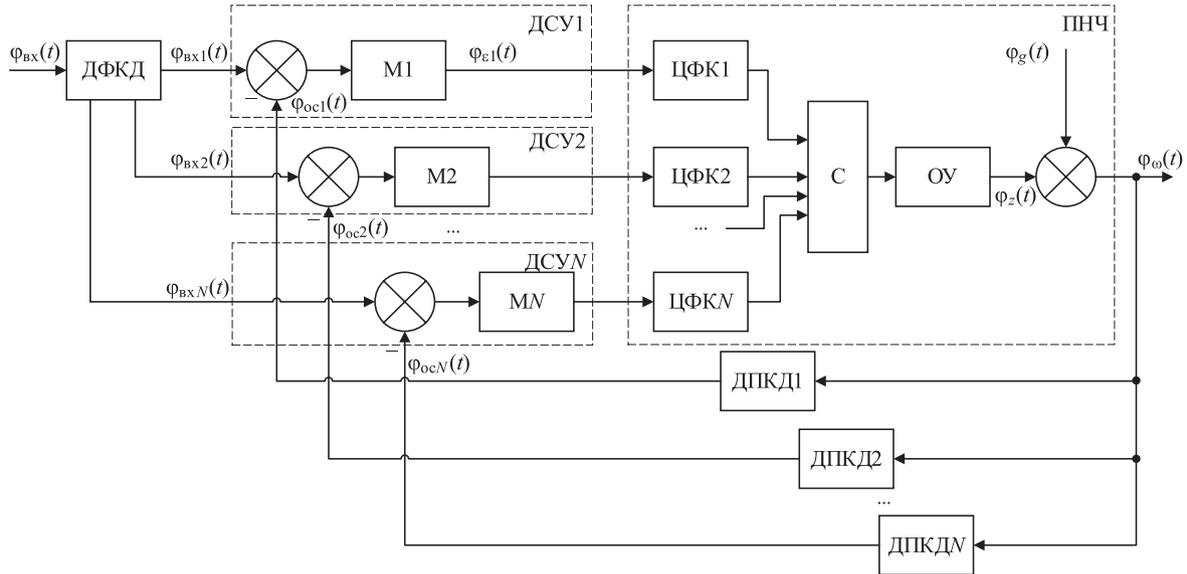


Рис. 1. Обобщенная структурная схема импульсных систем фазовой синхронизации
Fig. 1. Generalized structural diagram of pulse phase synchronization systems

Временные диаграммы на рис. 2 поясняют принцип работы и построения математической модели ИСФС для триггерного ДСУ (а–г) и ДСУ типа «выборка-запоминание» (а, b, d, e–h). Рассмотрим основные принципы построения упрощенных математических моделей многоконтурных ИСФС, обобщенная схема которых изображена на рис. 1. Положим, что ЦФК1, ЦФК2, ..., ЦФKN, сумматор и объект управления в ПНЧ имеют передаточные функции $W_1(p), W_2(p), \dots, W_N(p)$ вида

$$W_N(p) = \frac{Q_N(p)}{M_N(p)} = \frac{\prod_{i=m+1}^{m+r} (T_{Ni}p + 1)}{\prod_{i=1}^m (T_{Ni}p + 1)}, \quad (3)$$

где T_{Ni} – постоянная времени числителя $Q_N(p)$ ($i = m + 1, m + r$) и знаменателя $M_N(p)$ ($i = \overline{1, m}, r \leq m$); p – оператор передаточной функции в преобразовании Лапласа.

Уравнения состояния ПНЧN с передаточной функцией вида (3) имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{X}_N(t) = A_N X_N(t) + B_N \varepsilon(t); \\ e_N = C_N X_N(t) + d_{0N} \varepsilon(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $X_N(t)$ – вектор переменных состояния; $\varepsilon(t)$ – амплитуда управляющего импульса на рабочем периоде (рис. 2, г); e_N – модулирующая функция; A_N – матрица размерностью $m \times m$:

$$A_N = \text{diag} \{P_{N1}, \dots, P_{Nm}\}, P_{Ni} = \frac{1}{T_{Ni}}, i = \overline{1, m}; \quad (5)$$

P_{Ni} – величина, обратная T_{Ni} ; B_N, C_N – векторы ($B_N, C_N \in R^m$); R^m – вещественное m -мерное пространство; d_{0N} – коэффициент:

$$\begin{aligned}
 B_{Ni} &= (b_{N1}, \dots, b_{Nm}), b_{Ni} = \frac{Q_N(p)}{M_N(p)} \mid P = P_{Ni}, i = \overline{1, m}; \\
 C_N &= (C_{N1}, \dots, C_{Nm}), C_{i1} = 1, i = \overline{1, m}; \\
 d_{0N} &= \lim W_N(p) = \begin{cases} 0, & m > r \\ \frac{\prod_{i=m+1}^{m+r} T_{Ni}}{\prod_{i=1}^m T_{Ni}}, & m = r. \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

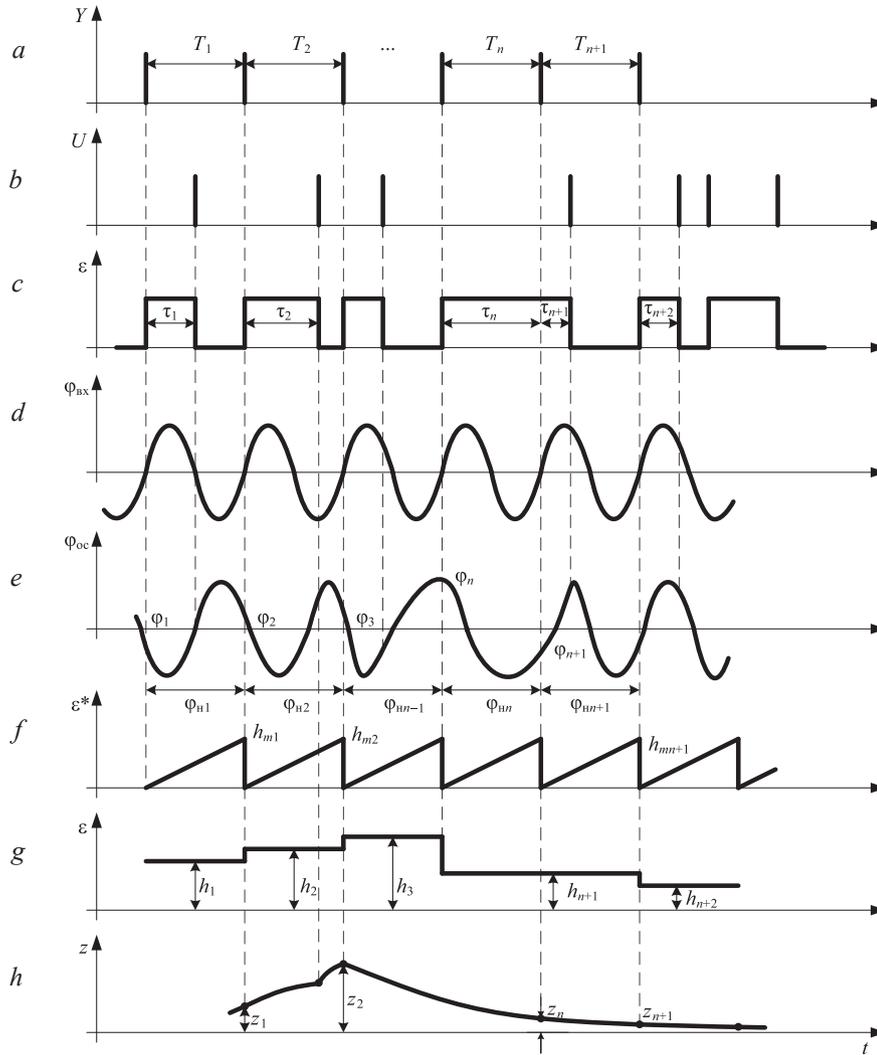


Рис. 2. Временные диаграммы импульсных систем фазовой синхронизации:

a, b – входной и выходной сигналы; *c* – управляющие импульсы; *d* – начальная фаза входного сигнала; *e* – фазовое изменение сигнала цепи обратной связи; *f* – характеристика фазового рассогласования; *g* – амплитуда управляющего импульса на рабочем периоде; *h* – сигнал на выходе объекта управления

Fig. 2. Timing diagrams of pulse phase synchronization systems: *a, b* – input and output signals; *c* – control pulses; *d* – initial phase of the input signal; *e* – phase change of the feedback circuit signal; *f* – phase error characteristic; *g* – amplitude of the control pulse during the working period; *h* – signal at the output of the control object

Решая N уравнений (4) на временном интервале T , получим систему из N уравнений разомкнутой СФС вида

$$X_N(t) = \Phi_N(t-t_0)X_N(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi_N(t-\lambda)B_N\varepsilon(\lambda)d\lambda.
 \tag{7}$$

где t – время; t_0 – время прихода опорного импульса; $\Phi_N(t-t_0) = \exp[A_N(t-t_0)] = \text{diag}[\exp(P_{N1}(t-t_0)) \times \dots \times \exp(P_{Nm}(t-t_0))]$; λ – переменная интегрирования широтно-импульсной модуляцией.

Запишем систему уравнений для триггерного фазового детектора с однополярной широтно-импульсной модуляцией, работающего по закону:

$$\varepsilon_1(t) = \begin{cases} 0, t \in [nT + \tau_n; nT + kT]; \\ h, t \in [nT + kT; nT + kT + \tau_{n+k}], \end{cases} \quad (8)$$

где k – количество импульсов входного сигнала за время τ_n ; n – текущий номер периода; τ_n, τ_{n+k} – длительность двух соседних импульсов фазового рассогласования; h – амплитудное значение.

Рассмотрим три режима работы фазового детектора.

Первый – режим частотного детектирования, при котором количество импульсов из цепи обратной связи и количество импульсов со входа равны. Такой режим называется режимом синхронной работы (синхронизма) или фазового детектирования. Он является основным рабочим режимом, его временные диаграммы показаны на рис. 3.

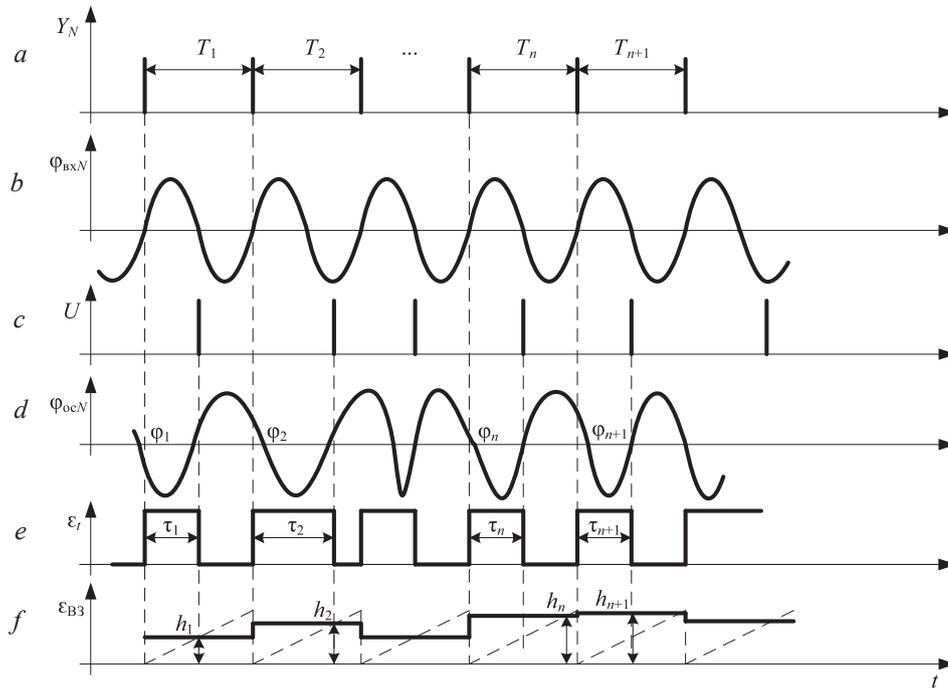


Рис. 3. Временные диаграммы первого режима: a – входной сигнал N -го канала; b – начальная фаза входного сигнала N -го канала; c – выходной сигнал; d – фазовое изменение сигнала цепи обратной связи N -го канала; e – управляющие импульсы; f – амплитуда управляющего импульса на рабочем периоде

Fig. 3. Timing diagrams of the first mode: a – input signal of the N -th channel; b – initial phase of the input signal of the N -th channel; c – output signal; d – phase change of the signal of the feedback circuit of the N -th channel; e – control pulses; f – amplitude of the control pulse during the working period

На рис. 2, e показан сигнал, отображающий фазовое изменение сигнала цепи обратной связи. Это является абстракцией, поскольку фаза сигнала может быть определена только в моменты $t_1, t_2, \dots, t_n, t_{n+1}$, так как этот сигнал является импульсным. Величины $\varphi_{н1}(t), \varphi_{н2}(t), \dots, \varphi_{нn-1}(t)$ обозначают набег фаз сигнала цепи обратной связи за периоды T_1, T_2, \dots, T_{n-1} соответственно:

$$\begin{aligned} \varphi_{н1}(t) &= \varphi_2 - \varphi_1; \\ \varphi_{н2}(t) &= \varphi_3 - \varphi_2; \\ &\dots \\ \varphi_{нn-1}(t) &= \varphi_n - \varphi_{n-1}. \end{aligned}$$

Если соблюдается условие (1) (для технических СФС оно выполняется практически всегда), то за период T_{n-1} набег фазы сигнала обратной связи составляет $\varphi_{нn-1}(t)$ и за время τ_n будет равен $2\pi - (\varphi_n/N_d)$ (где N_d – коэффициент деления ДПКД). Длительность импульса τ_n на n -такте

с учетом того, что сигнал фазового рассогласования N -го канала равен $\varphi_{\Sigma N} = \varphi_{\text{вх}N} - \varphi_{\text{ос}N}$, будет определяться по формуле

$$\tau_{n,N} = \frac{2\pi N_{\text{Д}} - \varphi_n}{\varphi_{\text{н}n-1}}. \quad (9)$$

Второй – режим частотного детектирования, при котором частота выходного сигнала меньше заданной (количество импульсов из цепи обратной связи меньше количества импульсов со входа). Временные диаграммы второго режима показаны на рис. 4.

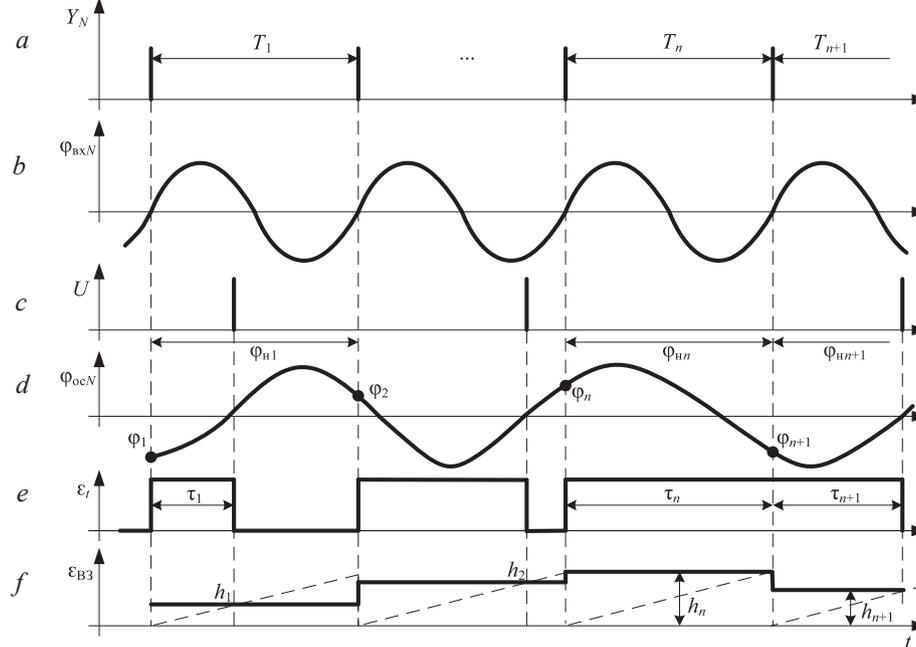


Рис. 4. Временные диаграммы второго режима: $a-f$ – то же, что на рис. 3

Fig. 4. Timing diagrams of the second mode: $a-f$ – the same as in Fig. 3

Для рассматриваемого режима $\varphi_{\text{н}n} < 2\pi N_{\text{Д}}$ или, другими словами, режим существует при выполнении следующего неравенства:

$$2\varphi_n - \varphi_{n-1} < 2\pi N_{\text{Д}N}. \quad (10)$$

В случае выполнения неравенства (10) длительность импульса τ_{nN} равна длительности периода на данном такте квантования

$$\tau_{nN} = T_{n-1,N}. \quad (11)$$

Третий – режим частотного детектирования, при котором частота сигнала цепи обратной связи много больше частоты входного сигнала. Режим характеризуется выполнением неравенства (10), также необходимо, чтобы фаза сигнала обратной связи дважды за период входного сигнала равнялась нулю. В данном режиме длительность импульса τ_n определяется по формуле (9). Временные диаграммы третьего режима показаны на рис. 5.

Выполнив операцию интегрирования для (7) с учетом закона модуляции (8), получим уравнения для разомкнутой системы на интервалах:

– $[nT; nT + \tau_n]$:

$$X_N(t) = \Phi_N(t - nT) \left(X_N(nT) + A_N^{-1} B_N h_{nN} \right) - A_N^{-1} B_N h_{nN}; \quad (12)$$

– $[nT + \tau_n; nT + kT]$:

$$X_N(t) = \Phi_N(t - nT - \tau_n) X_N(nT + \tau_n) = \Phi_N(t - nT) (X_N(nT) + (1 - \Phi_N(\tau_n))). \quad (13)$$

Набег фазы за период T_n определяется из уравнения

$$\varphi_{\text{н}n} = \frac{1}{N_{\text{Д}}} \left(\int_{nT}^{nT+T_n} (C_N X_N(t) + d_0 \varepsilon_N(t)) dt + \varphi_g(t) \right), \quad (14)$$

где $\varphi_g(t)$ – начальная фаза возмущающего воздействия, приведенная к выходу устройства на периоде T_n (рис. 1).

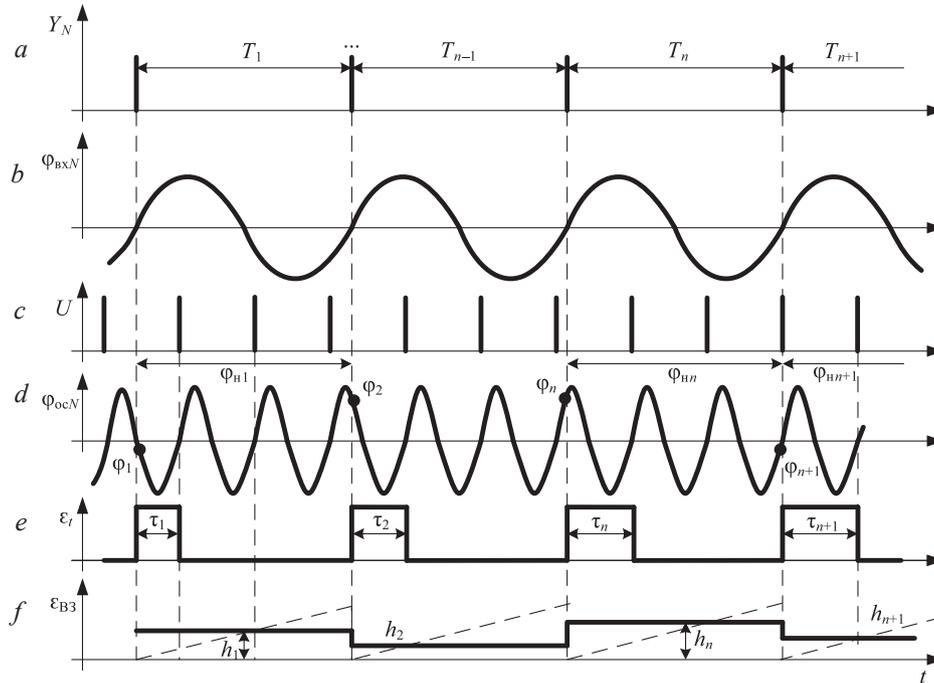


Рис. 5. Временные диаграммы третьего режима: $a-f$ – то же, что на рис. 3

Fig. 5. Timing diagrams of the third mode: $a-f$ – the same as in Fig. 3

После определения набег фазы на периоде T_n можно рассчитать значение начальной фазы сигнала в момент $t = nT + T_n$

$$\varphi_{n+1,N} = \varphi_{n,N} + \varphi_{\text{вн}}. \quad (15)$$

Выходная фаза исследуемого устройства

$$\varphi_{\text{вн}} = \varphi_{\text{вн}} + \varphi_{\text{гн}}. \quad (16)$$

Поскольку в СФС выходной координатой является частота (хотя настоящая математическая модель может работать только в координатах фазы), необходимо определить значение выходного сигнала из следующего уравнения:

$$w_n = \frac{\varphi_{\text{вн}} + \varphi_{\text{гн}}}{T_n}. \quad (17)$$

Установившийся режим характеризуется постоянством выходной координаты $\varphi_{\text{вн}}$, w_n , неизменностью длительности импульсов τ_n , τ_{n+1} , набегам фаз $\varphi_{\text{вн}}$, $\varphi_{\text{вн}+1}$ и т. д. Таким образом, в установившемся режиме в математической модели существуют следующие координаты:

$$\varphi_{\text{вн}} = \varphi_{\text{вн}+1} + \varphi_w^*; \quad (18)$$

$$\tau_{n+1} = \tau_n = \tau^*; \quad (19)$$

$$\varphi_{\text{вн}} = \varphi_{\text{вн}+1} + \varphi_{\text{н}}^*; \quad (20)$$

$$T_n = T_{n+1} = T^*. \quad (21)$$

В рассмотренной математической модели для АИМ-1 параметр h_n является неизменным на периоде квантования, для АИМ-2 $h_n = h_n(t)$. Если ИСФС работает с фазовым детектором типа выборка-запоминание, то математическая модель системы для однополярной модуляции (9) будет иметь вид (12)–(21) и неравенств (10), (11). Также модель необходимо дополнить уравнением амплитуды импульса на рабочем периоде (рис. 2, g)

$$h_{nN} = \frac{h_{mn} \tau_{nN}}{T_n}.$$

Уравнения состояния имеют вид (4). Решение N уравнений (4) на периоде квантования T дает систему N -го порядка вида (7). Интегрируя (7) для триггерного фазового детектора с учетом определения $\varepsilon(t)$, из выражения

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} h(t), & t \in [nT; nT + \tau_n]; \\ -h(t), & t \in [nT + \tau_n; nT + kT]; \\ h(t), & t \in [nT + kT; nT + kT + \tau_{n+k}] \end{cases}$$

получим систему уравнений:

$$\begin{cases} X_{1,n+1} = X_{1,n} + 2K_1\tau_n h_{nN}; \\ \dots \\ X_{k,n+1} = X_{k,n} e^{-T_n/T_k} + C_2 h_{nN} T_2 e^{-T_n/T_k} \left(2e^{T_n/T_k} - e^{T_n/T_k} - 1 \right), \end{cases} \quad (22)$$

где C_2-C_k – величины, определяемые из передаточной функции непрерывной линейной части (НЛЧ) системы вида:

$$W(p) = \frac{K_1(T_1 p + 1)}{p(T_2 p + 1) \cdot (T_3 p + 1) \cdot \dots \cdot (T_k p + 1)};$$

$$C_k = \frac{Q(p)}{M'(p)} \Big|_{p=p_k}, \quad k = \overline{1, m}.$$

Выходная координата определяется по формуле

$$w_{n+1} = z_{n+1} + g_{n+1} = X_{1,n+1} + \sum_{k=1}^m X_{k,n+1} + g_{n+1}. \quad (23)$$

На интервале $t \in [nT; nT + \tau_n]$ рассчитывается величина набега фазы выходного сигнала (рис. 6, е) из выражения

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{нн}} = & \frac{1}{N_{\text{Д}}} \left(\left(X_{1,n} + 2K_1\tau_n h_{nN} - \sum_{k=1}^m C_k h_{nN} T_k \right) T_n \right) - \frac{K_1 h_{nN} T_n^2}{2} - \\ & - \sum_{k=1}^m \left(T_k \left(e^{-T_n/T_k} - 1 \right) \left(C_k h_{nN} T_k \left(2e^{T_n/T_k} - 1 \right) + X_{k,n} \right) \right) + \frac{g T_n}{N_{\text{Д}}}. \end{aligned} \quad (24)$$

Зная начальную фазу сигнала φ_n (рис. 6, е) и набег фазы на периоде T_n (24), определим начальную фазу сигнала обратной связи

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n + \frac{\varphi_{\text{нн}}}{N_{\text{Д}}}. \quad (25)$$

Проведем анализ режима работы фазового детектора и на его основе определим длительность импульса на $(n + 1)$ -м периоде квантования:

$$\text{– если } N_{\text{Д}}\varphi_{n+1} + \varphi_{Nn} < 2\pi N_{\text{Д}}, \text{ то } \tau_{n+1} = T_{n+1}; \quad (26)$$

$$\text{– если } N_{\text{Д}}\varphi_{n+1} + \varphi_{Nn} > 2\pi N_{\text{Д}}, \text{ то } \tau_{n+1} = T_{n+1} \frac{(2\pi - \varphi_{n+1}) N_{\text{Д}}}{\varphi_{Nn}}. \quad (27)$$

Установившийся режим характеризуется постоянством выходной координаты w_{n+1} , неизменностью длительности импульсов τ_{n+1} , набегом фазы $\varphi_{\text{нн}}$ и т. д. Таким образом, в установившемся режиме имеем:

$$\dot{\tau}_n = \frac{T_n^*}{2}; \quad (28)$$

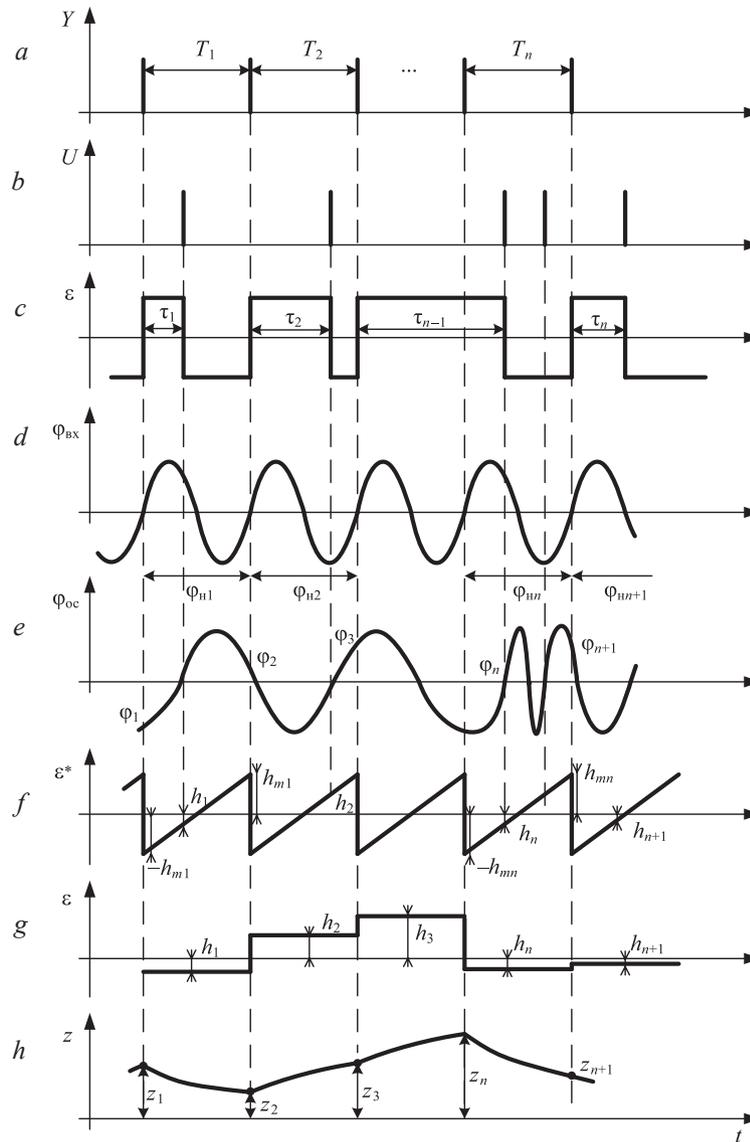


Рис. 6. Временные диаграммы системы фазовой синхронизации, работающей с двухполярной модуляцией: *a–h* – то же, что на рис. 2
Fig. 6. Timing diagrams of a phase synchronization system operating with bipolar modulation: *a–h* – the same as in Fig. 2

$$\dot{X}_k = \frac{C_k h_{nN} T_k \left(2e^{-T_n/2T_k} - e^{-T_n/T_k} - 1 \right)}{1 - e^{-T_n/T_k}}; \quad (29)$$

$$\dot{\phi}_H = \pi. \quad (30)$$

Уравнения (22)–(25), (28)–(30) и неравенства (26), (27) представляют собой математическую модель СФС с триггерным фазовым детектором и астатизмом второго порядка. Эта модель позволяет исследовать динамику ИСФС, определять устойчивость процессов, находить ширину полос удержания и захвата и т. п., а также является удобной для параметрического синтеза, поскольку отсутствие трансцендентного уравнения замыкания дает возможность производить расчеты на ЭВМ с экономией машинного времени от 80 до 60 % в моделях с высоким порядком передаточной функции НЛЧ. К достоинствам приведенной модели следует отнести тот факт, что для создания ММ ИСФС с фазовым детектором выборка-запоминание существующую модель

можно дополнить всего лишь одним алгебраическим уравнением, которое будет определять амплитуду импульса на очередном такте квантования:

$$h_{nN} = \left(\frac{2\tau_n - T_n}{T_n} \right) h_{nm}.$$

В установившемся режиме ИСФС с фазовым детектором типа выборка-запоминание к формулам (28)–(30) необходимо добавить уравнение $\dot{h}_n = 0$.

Заключение

1. Предложены математические модели импульсных систем фазовой синхронизации, которые учитывают нелинейный характер систем, работающих в режиме частотного фазового детектирования, нелинейный и дискретный характер таких систем, являются удобными для вычислений, имеют разное время для моделирования и различную точность, а при моделировании процессов на ЭВМ существенно сокращают время расчетов.

2. Рассмотрены импульсные системы и устройства фазовой синхронизации, являющиеся обширным классом систем автоматического управления. Принцип фазовой синхронизации используется при построении устройств импульсно-фазовой автоподстройки частоты, систем с импульсно-фазовым регулированием скорости вращения вала двигателей, синтезаторов частот, систем преобразования и слежения за частотой (фазой) входного сигнала, импульсных стабилизаторов и преобразователей напряжения (тока), перестраиваемых фильтров.

3. Исследование и проектирование рассмотренных устройств сводятся, как правило, к анализу по линеаризованной модели, либо к исследованию переходных процессов в режиме фазового детектирования. Теория синтеза для данного класса систем с учетом их нелинейных свойств и свойств импульсной модуляции второго рода почти полностью отсутствует. Существующие методы линеаризации, сведения импульсных систем с модуляцией второго рода к системам с модуляцией первого рода могут привести к большим погрешностям, а в некоторых случаях – к ошибочным результатам при их анализе и синтезе. Поэтому разработка машинно-ориентированных методов анализа и синтеза импульсных систем фазовой синхронизации с учетом нелинейных характеристик и свойств импульсной модуляции второго рода является актуальной проблемой, решение которой позволит производить разработку устройств вышеназванного класса с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Кунцевич, В. М. Нелинейные системы управления с частотно- и широтно-импульсной модуляцией / В. М. Кунцевич, Ю. Н. Чеховой. Киев: Техника, 1970.
2. Цыпкин, Я. Э. Основы теории автоматических систем / Я. Э. Цыпкин. М.: Наука, 1977.
3. Цыпкин, Я. Э. Теория нелинейных импульсных систем / Я. Э. Цыпкин, Ю. С. Попков. М.: Наука, 1973.
4. Малиновский, В. Н. Полоса захвата синтезатора частот с кольцом ИФАПЧ первого порядка / В. Н. Малиновский // Радиотехника. 1982. № 9. С. 42–44.
5. Мовшович, М. Е. Определение динамических характеристик кольца ФАП с цифровым делителем частоты методом натурального моделирования на ЦВМ / М. Е. Мовшович, М. А. Васильев // Радиотехника. 1988. № 1. С. 22–24.
6. Самойло, К. А. Определение полосы удержания и захвата системы ФАПЧ с делителем частоты / К. А. Самойло, Т. С. Федосова, Е. А. Хуртин // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1977. № 8. С. 111–114.
7. Принципы построения математических моделей систем фазовой синхронизации / М. П. Батура [и др.] // Доклады БГУИР. 2014. № 2. С. 177–185.
8. Принципы математического описания систем фазовой синхронизации / М. П. Батура [и др.] // Матер. Междунар. науч.-техн. конф., приуроч. к 50-летию МРТИ-БГУИР, в 2 ч., г. Минск, 18–19 марта 2014 г. Минск, 2014. Ч. 1. С. 448–449.
9. Шилин, Д. Л. Анализ быстродействия импульсных систем фазовой синхронизации / Д. Л. Шилин, В. В. Пучинец, Л. Ю. Шилин // Информационные технологии и системы – 2012: матер. Междунар. науч. конф., БГУИР, г. Минск, 24 окт. 2012 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиэлект., 2012. С. 102–103.
10. Шилин, Л. Ю. Автоматическое регулирование скорости двигателя с помощью системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты / Л. Ю. Шилин // Комплексная автоматизация и механизация – основа повышения эффективности производства и качества работы предприятий радиоэлектроники, связи и телевидения: тез. докл. конф. Минск, 1980. С. 53–54.

11. Шилин, Л. Ю. Анализ устойчивости широтно-импульсной системы регулирования скорости при введении интегратора в цепь управления / Л. Ю. Шилин, А. П. Кузнецов // Автоматика и вычислительная техника. Минск: Вышэйш. шк., 1982. Вып. 12. С. 25–27.

References

1. Kuntsevich V. M., Chekhov Yu. N. (1970) *Nonlinear Control Systems with Frequency and Pulse-Width Modulation*. Kyiv, Tekhnika Publ.
2. Tsyupkin Ya. E. (1977) *Fundamentals of the Theory of Automatic Systems*. Moscow, Nauka Publ.
3. Tsyupkin Ya. E., Popkov Yu. S. (1973) *Theory of Nonlinear Pulse Systems*. Moscow, Nauka Publ.
4. Malinovsky V. N. (1982) Capture Band of a Frequency Synthesizer with a First-Order PLL Ring. *Radio Engineering*. (9), 42–44.
5. Movshovich M. E., Vasiliev M. A. (1988) Determination of Dynamic Characteristics of a Phase-Locked Loop with a Digital Frequency Divider by the Method of Natural Simulation on a Digital Computer. *Radio Engineering*. (1), 22–24.
6. Samoilo K. A., Fedosova T. S., Khurtin E. A. (1977) Determination of the Hold and Capture Band of a Phase-Locked Loop System with a Frequency Divider. *News of Universities. Radio Electronics*. (8), 111–114.
7. Batura M. P., Kuznetsov A. P., Shilin L. Yu., Kukin D. P. (2014) Principles of Constructing Mathematical Models of Phase-Locked Loop Systems. *Doklady BGUIR*. (2), 177–185.
8. Batura M. P., Kuznetsov A. P., Shilin L. Yu., Kukin D. P., Shilin D. L. (2014) Principles of Mathematical Description of Phase Synchronization Systems. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of MRTI-BSUIR, in 2 Parts, Minsk, March 18–19*. Minsk, Part 1. 448–449.
9. Shilin D. L., Puchinets V. V., Shilin L. Yu. (2012) Analysis of the Performance of Pulse Phase-Locked Loop Systems. *Information Technologies and Systems – 2012: Proceedings of the International Scientific Conference, BSUIR, Minsk, Oct. 24*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 102–103.
10. Shilin L. Yu. (1980) Automatic Control of Engine Speed Using a Pulse-Phase Automatic Frequency Control System. *Integrated Automation and Mechanization – the Basis for Improving Production Efficiency and Quality of Work of Enterprises of Radio Electronics, Communications and Television, Conference Abstracts*. Minsk. 53–54.
11. Shilin L. Yu., Kuznetsov A. P. (1982) Analysis of the Stability of a Pulse-Width Speed Control System with the Introduction of an Integrator into the Control Circuit. *Automation and Computer Engineering*. Minsk, Higher School. Iss. 12, 25–27.

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Батура М. П., акад. Международной академии наук высшей школы, д-р техн. наук, проф., зав. научно-исследовательской лабораторией «Новые обучающие технологии», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Шилин Л. Ю., д-р техн. наук, проф., декан факультета информационных технологий и управления, БГУИР

Кукин Д. П., канд. техн. наук, доц., зав. каф. вычислительных методов и программирования, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-23-46
E-mail: kukin@bsuir.by
Кукин Дмитрий Петрович

Information about the authors

Batura M. P., Academician of the International Academy of Higher Education Sciences, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of Research Laboratory “New Educational Technologies”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Shilin L. Yu., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Dean of the Faculty of Information Technology and Management, BSUIR

Kukin D. P., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Computational Methods and Programming, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-23-46
E-mail: kukin@bsuir.by
Kukin Dmitry Petrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-81-89>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ И ВЕРТИКАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ КАНАЛА

ЧОНГ ТХАНЬ НГУЕН¹, ДАО ДИНЬ ХА², И. Ю. ЛОВШЕНКО¹, В. Р. СТЕМПИЦКИЙ¹

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

²Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куи Дона (г. Ханой, Вьетнам)

Поступила в редакцию 03.09.2024

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

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования эксплуатационных характеристик приборных структур биполярного транзистора с изолированным затвором (англ. IGBT) и вертикальным расположением канала, сформированных в соответствии с технологиями Trench-IGBT, суперпереходной Trench-IGBT (SJ-IGBT), SJ-IGBT с глубокой канавкой (DT-SJ-IGBT), SJ-IGBT с плавающей p -областью (FP-SJ-IGBT) и Trench-IGBT со ступенчатым легированным коллектором. Рассмотрены особенности функционирования конструктивных решений такого биполярного транзистора. Исследована конструкция Trench-IGBT со ступенчатым легированным коллектором, которая обеспечивает уменьшение потерь при выключении.

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором, конструкция, технология изготовления, статические и динамические характеристики, компьютерное моделирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Конструктивные решения приборных структур биполярных транзисторов с изолированным затвором и вертикальным расположением канала / Чонг Тхань Нгуен [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 81–89. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-81-89>.

DESIGN SOLUTIONS FOR DEVICE STRUCTURES OF BIPOLAR TRANSISTORS WITH AN INSULATED GATE AND A VERTICAL CHANNEL ARRANGEMENT

TRONG THANH NGUYEN¹, DAO DINH HA², IVAN YU. LOVSHENKO¹,
VIKTOR R. STEMPITSKY¹

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

²Le Quy Don University of Science and Technology (Hanoi, Vietnam)

Submitted 03.09.2024

Abstract. This work presents the results of computer simulations of the operational characteristics of vertical channel Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) device structures designed according to the following technologies: Trench-IGBT, Superjunction Trench-IGBT (SJ-IGBT), Deep Trench SJ-IGBT (DT-SJ-IGBT), Floating p -region SJ-IGBT (FP-SJ-IGBT), and Step-Doped Collector Trench-IGBT. The operating principles of these insulated gate bipolar transistor design solutions are discussed. A particular focus is placed on the Step-Doped Collector Trench-IGBT structure, which demonstrates reduced switching losses.

Keywords: insulated gate bipolar transistor, device structure, fabrication technology, static and dynamic characteristics, computer simulation.

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

For citation. Trong Thanh Nguyen, Dao Dinh Ha, Lovshenko I. Yu., Stempitsky V. R. (2025) Design Solutions for Device Structures of Bipolar Transistors with an Insulated Gate and a Vertical Channel Arrangement. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 81–89. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-81-89> (in Russian).

Введение

Среди современных приборов кремниевой силовой электроники можно выделить два типа: мощные полевые транзисторы (ПТ, англ. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET), в которых в основном применяются технологии суперперехода (англ. Super Junction, SJ) SJ-MOSFET (или D-MOS) [1, 2], и биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ, англ. Isolated Gate Bipolar Transistor, IGBT), сочетающие положительные свойства мощных полевых и биполярных транзисторов. БТИЗ представляет собой повторяющийся массив ячеек, расположенных в соответствии с топологическим решением [3].

Объем мирового рынка БТИЗ и ПТ в 2023 г. оценивался в 14,68 млрд долл. США и, по прогнозам, в течение 2024–2030 гг. он будет увеличиваться с годовым темпом прироста 12,2 % [4]. Расширение рынка обусловлено увеличивающимся внедрением электронных транспортных средств и гибридных электромобилей, которые нуждаются в эффективных решениях по управлению электропитанием. БТИЗ и ПТ играют важную роль в силовых агрегатах электромобилей, инверторах и зарядной инфраструктуре благодаря их способности выдерживать высокие напряжения и токи.

Необходимость создания новых перспективных конструктивных решений мощных полупроводниковых приборов стимулирует исследования в области внедрения новых конструкций, совершенствования технологических процессов изготовления и материалов структурных элементов. Улучшение структур БТИЗ направлено на повышение их быстродействия, предельных коммутируемых токов и напряжений. Одной из ключевых задач разработки БТИЗ является улучшение баланса между потерями при выключении E_{off} и падением напряжения в открытом состоянии V_{on} .

Традиционно изготавливаемые конструкции – стандартные эпитаксиальные технологии ПТ (англ. Punch Through) и NPT (англ. None Punch Through), обеспечивающие формирование приборных структур БТИЗ на объемном кремнии, практически полностью вытеснены новой структурой затвора – это биполярные транзисторы с изолированным затвором и вертикальным расположением канала (англ. Trench-IGBT). В таких структурах увеличение концентрации свободных носителей заряда в области N -базы вблизи эмиттера приводит к снижению падения напряжения в открытом состоянии [5]. К недостаткам данной конструкции можно отнести наличие высокой емкости затвора, что сказывается на быстродействии [6].

В настоящее время предложено множество усовершенствований для уменьшения токов утечки, падения напряжения во включенном состоянии. Одно из них – применение технологии SJ, которая позволяет преодолеть ограничения кремния. Эта концепция впервые была представлена в 1997 г. [7]. В сравнении с обычными БТИЗ с полевым запирающим (англ. Field Stop, FS) [8, 9], суперпереходные БТИЗ (SJ-IGBT) демонстрируют превосходный компромисс между указанными выше параметрами [8, 10]. Однако у стандартного SJ-IGBT значение V_{on} велико и сильно зависит от концентрации легирующих примесей [11, 12]. Один из методов уменьшения V_{on} – применение SJ-IGBT с плавающей p -областью, размещенной под затвором (технология FP-SJ-IGBT) [13], что препятствует прямому перемещению дырок через p -область в эмиттер и усиливает эффект модуляции проводимости. Однако потенциал плавающей p -области под канавочным затвором будет увеличиваться с ростом обратного напряжения $U_{к.обр}$ на коллекторе, что существенно снижает напряжение пробоя V_B . Конструкции, сформированные по технологии TFS (англ. Trench Field Stop) с дрейфовой областью суперперехода, позволяют изменить конфигурацию электрического поля в структуре и оптимизировать распределение носителей, что улучшает напряжение пробоя в закрытом состоянии и снижает потери энергии в открытом/переключающем состоянии [14].

Цель исследований авторов статьи – анализ существующих конструктивных решений БТИЗ, сформированных по технологии SJ-IGBT, обеспечивающих наилучшее соотношение значений параметров E_{off} , V_{on} и V_B .

Приборные структуры

Рассмотрим пять конструктивных решений приборных структур БТИЗ, соответствующих технологиям:

- Trench-IGBT – структура № 1 (рис. 1);
- суперпереходной Trench-IGBT с глубокой канавкой (Deep Trench SJ-IGBT, DT-SJ-IGBT) – № 2 (рис. 2, *a*);
- SJ-IGBT – № 3 (рис. 2, *b*);
- SJ-IGBT с плавающей p -областью (Floating p -region, FP-SJ-IGBT) – № 4 (рис. 2, *c*);
- Trench-IGBT со ступенчатым легированным коллектором – № 5 (рис. 2, *d*).

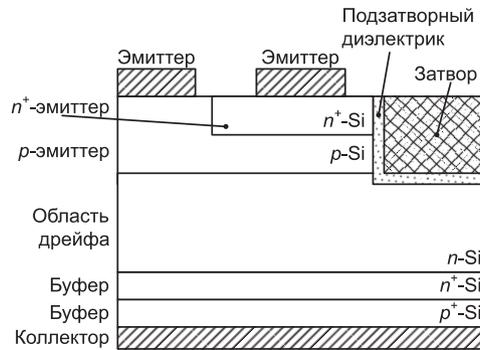


Рис. 1. Базовая приборная структура биполярного транзистора с изолированным затвором и вертикальным расположением канала (структура № 1)

Fig. 1. Basic device structure of a vertical channel insulated gate bipolar transistor (structure No 1)

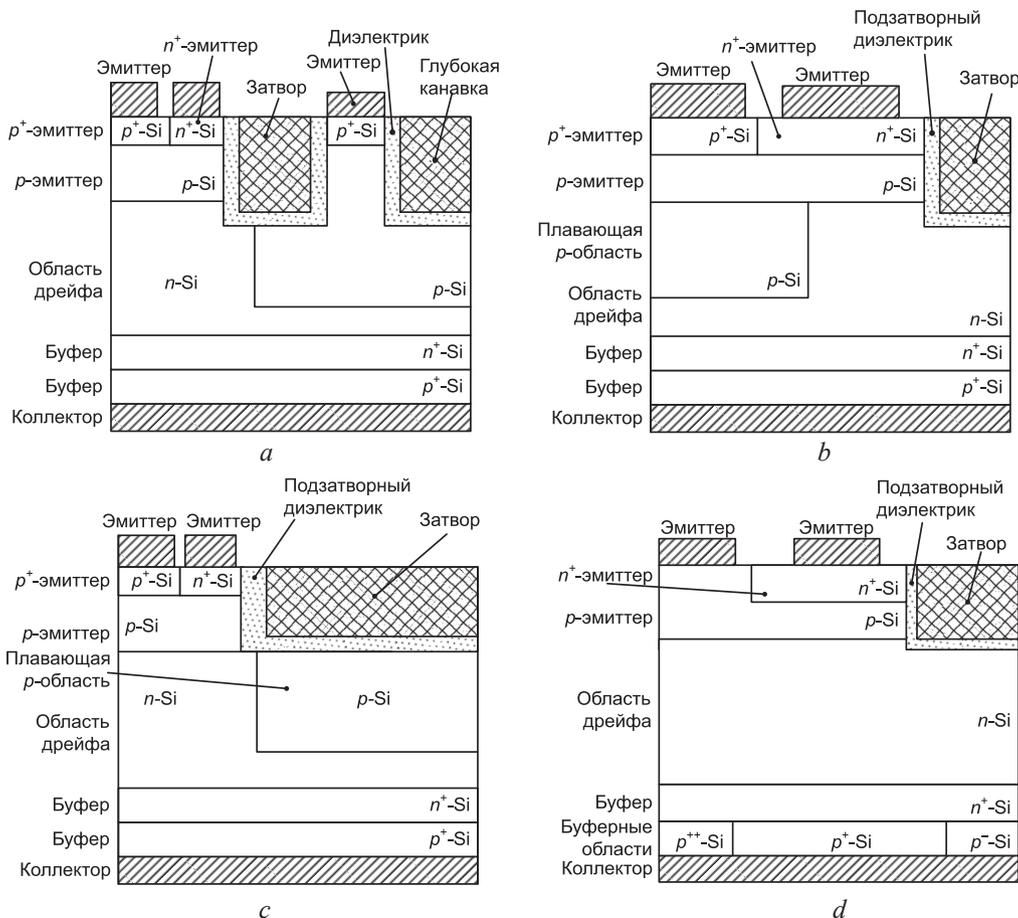


Рис. 2. Конструктивные решения биполярного транзистора с изолированным затвором и вертикальным расположением канала для приборных структур: *a* – № 2; *b* – №3; *c* – № 4; *d* – № 5

Fig. 2. Design solutions of a bipolar transistor with an insulated gate and a vertical channel arrangement for device structures: *a* – No 2; *b* – No 3; *c* – No 4; *d* – No 5

Получайка приборной структуры № 1 состоит из эпитаксиального слоя кремния толщиной 100 мкм со сформированной активной областью, шаг ячейки – 3 мкм. В качестве подзатворного диэлектрика применен оксид кремния толщиной 100 нм.

Структура № 2 (рис. 2, *a*) отличается наличием глубокой канавки. Между затвором и глубокой канавкой находится p^+ -область (p^+ -Si), которая соединена с эмиттером. Данное конструктивное решение позволяет сократить инжекцию носителей заряда эмиттером. В выключенном состоянии такая p -область способствует более быстрому рассасыванию неосновных носителей заряда (дырок), находящихся в области дрейфа.

Структура № 3 (рис. 2, *b*) представляет собой обычную конструкцию SJ-IGBT [9]. Область дрейфа структуры разделена на две – p - и n -типа проводимости, чередующиеся друг с другом. При этом p -область расположена со стороны эмиттера.

Структура № 4 (рис. 2, *c*) отличается от № 3 расположением плавающей p -области под затвором. Такое конструктивное решение усиливает эффект модуляции проводимости и снижает падение напряжения в открытом состоянии V_{on} .

В структуре № 5 (рис. 2, *d*) значения уровня легирования и толщины области дрейфа аналогичны показателям для структуры № 1. Область коллектора разделена на три секции: p^{++} -коллектор, p^+ -коллектор и p^- -коллектор. Секция с более высокой концентрацией лежит под контактами к эмиттеру, а с более низкой – под затвором. Наличие слаболегированной секции коллектора увеличивает скорость рекомбинации за счет инжекции меньшего количества носителей заряда, что приводит к сокращению времени жизни носителей. Этот эффект дополнительно улучшает процесс выключения для предлагаемого устройства. Следовательно, потери при выключении E_{off} уменьшатся, а напряжение пробоя увеличится. В то же время инжектируемые дополнительные неосновные носители заряда из области p^{++} -коллектора в область дрейфа поддерживают высокую относительно структуры № 1 плотность тока.

В табл. 1 представлены основные конструктивные параметры рассматриваемых приборных структур.

Таблица 1. Основные конструктивные параметры приборных структур
Table 1. Main design parameters of instrument structures

Параметр	Структура				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Глубина затвора, мкм	4	4	4	4	4
Глубина канавки, мкм	–	–	–	4	–
Ширина между затвором канавки и глубиной канавки, мкм	–	0,8	–	–	–
Длина канала, мкм	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Толщина оксида, мкм	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Концентрация p^+ -коллектора, см^{-3}	10^{19}	10^{19}	10^{19}	10^{19}	$p^{++}: 2 \cdot 10^{19}$ $p^+: 10^{19}$ $p^-: 10^{17}$
Концентрация n^+ -эмиттера, см^{-3}	10^{19}	10^{19}	10^{19}	10^{19}	10^{19}
Концентрация n -буфера, см^{-3}	10^{17}	10^{17}	10^{17}	10^{17}	10^{17}

Результаты исследований

Эксплуатационные характеристики исследовались посредством компьютерного моделирования в программных продуктах приборно-технологического моделирования [15–17]. Эффективная ширина устройства была принята 1 мкм.

На рис. 3 представлены зависимости тока коллектора I_k от напряжения на затворе U_3 при напряжении на коллекторе $U_k = 15$ В для рассматриваемых структур. Структуры № 1 и 5 имеют почти одинаковые и гораздо большие токи (превышают более чем в два раза), чем № 2–4. У структуры № 3 самый низкий ток. Пороговое напряжение $U_{пор}$ приборных структур № 1 и 5 практически одинаково – 3,00 В, структур № 2 и 4 – 4,09 В и 4,15 В соответственно, структуры № 3 – 4,55 В.

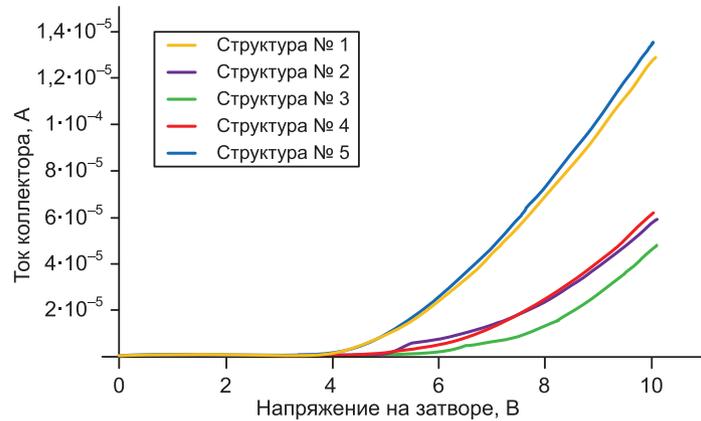


Рис. 3. Зависимость тока коллектора от напряжения на затворе при напряжении на коллекторе 15 В для рассматриваемых структур

Fig. 3. Dependence of collector current on gate voltage at collector voltage of 15 V for the structures under consideration

На рис. 4 показаны зависимости тока коллектора I_k от напряжения на коллекторе U_k при напряжении на затворе $U_3 = 15$ В. Предположим, что устройство находится во включенном состоянии, если плотность тока коллектора J_k достигает 100 А/см², что соответствует току коллектора $I_k = 4 \cdot 10^{-6}$ А. Тогда падения напряжений во включенном состоянии V_{on} для структур № 1–5 соответственно равны 2,00, 1,55, 2,02, 1,48 и 2,15 В. Значение V_{on} для структуры № 3 велико, поскольку плавающая p -область напрямую подключена к эмиттеру. Падение напряжения V_{on} для структур № 2 и 4 практически одинаково.

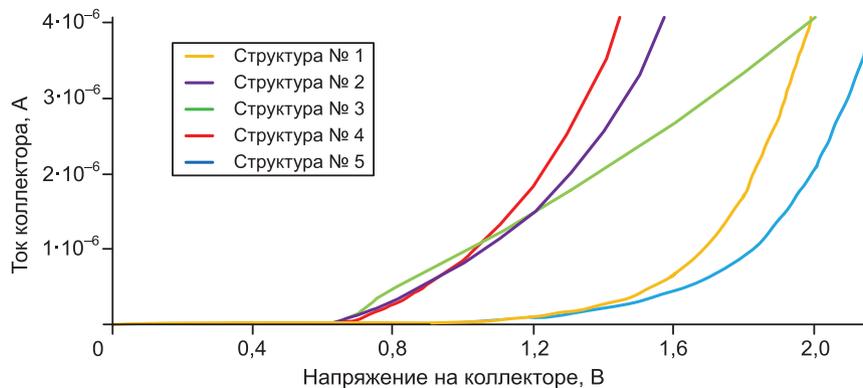


Рис. 4. Зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе при напряжении на затворе 15 В для рассматриваемых структур

Fig. 4. Dependence of collector current on collector voltage at gate voltage of 15 V for the structures under consideration

На рис. 5 изображены форма управляющего входного импульса, подаваемого на затвор, и временная диаграмма тока коллектора I_k . Потери при выключении E_{off} при напряжении на коллекторе $U_k = 2,3$ В для приборных структур № 1–5 соответственно равны 89,36, 189,12, 60,97, 246,67 и 57,27 мкВт. Структура № 5 имеет самые низкие потери выключения.

На рис. 6 показаны зависимость тока коллектора I_k от обратного напряжения на коллекторе $U_{к.обр}$ при напряжении на затворе $U_3 = 0$ В и профиль электрического поля в области эмиттера ($x = 1$ мкм) при пробое. Распределение электрического поля для структур № 2 и 3 более равномерное, что приводит к самому высокому напряжению пробоя $V_{проб} = 1495$ В. Структура № 4 имеет более низкое напряжение пробоя ($V_{проб} = 1210$ В) из-за того, что потенциал плавающей p -области будет увеличиваться с ростом обратного напряжения на коллекторе U_k . Напряжения пробоя структур № 1 и 5 составляют 1100 и 15 200 В соответственно.

Для приборной структуры № 5 дополнительно проводилось исследование распределения скорости рекомбинации вдоль границы раздела коллектор/ n -буфер и концентрации дырок в области дрейфа. Различие в инжекции неосновных носителей заряда изменяло скорость рекомбинации

в слое n -буфера (рис. 7). Линия разреза проведена вдоль границы раздела коллектор/ n -буфер ($y = 99,25$ мкм). В диапазоне координат x от 0 до 0,25 мкм наблюдалось снижение скорости рекомбинации из-за присутствия области p^{++} -коллектора. С другой стороны, присутствие области p -коллектора в диапазоне координат $x = 2,75-3,00$ мкм увеличивало скорость рекомбинации.

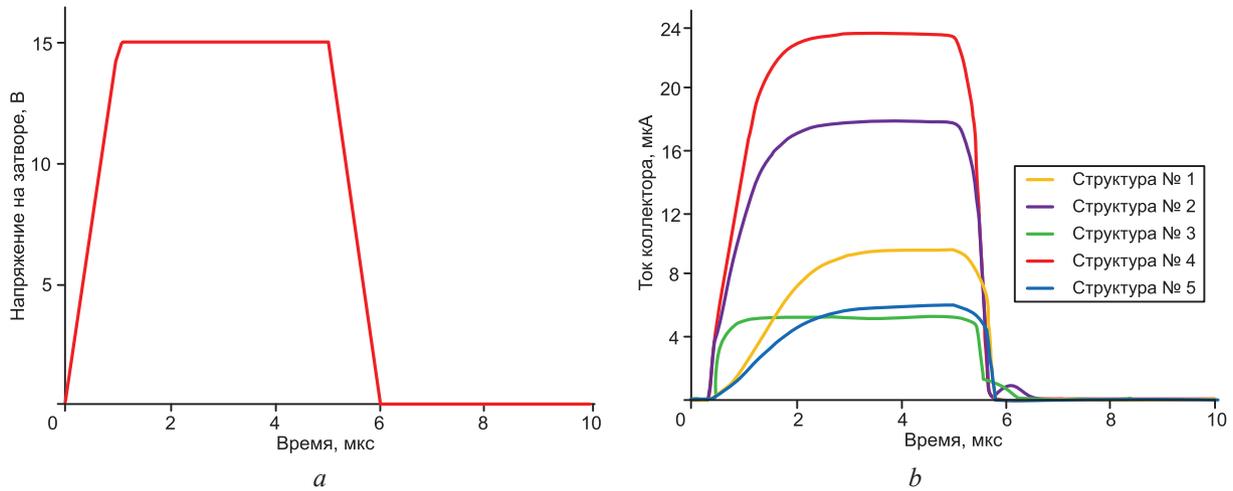


Рис. 5. Форма управляющего входного импульса, подаваемого на затвор (а), и временная диаграмма тока коллектора (b) для рассматриваемых структур

Fig. 5. Input gate drive waveform (a) and collector current transient response for the simulated structures (b)

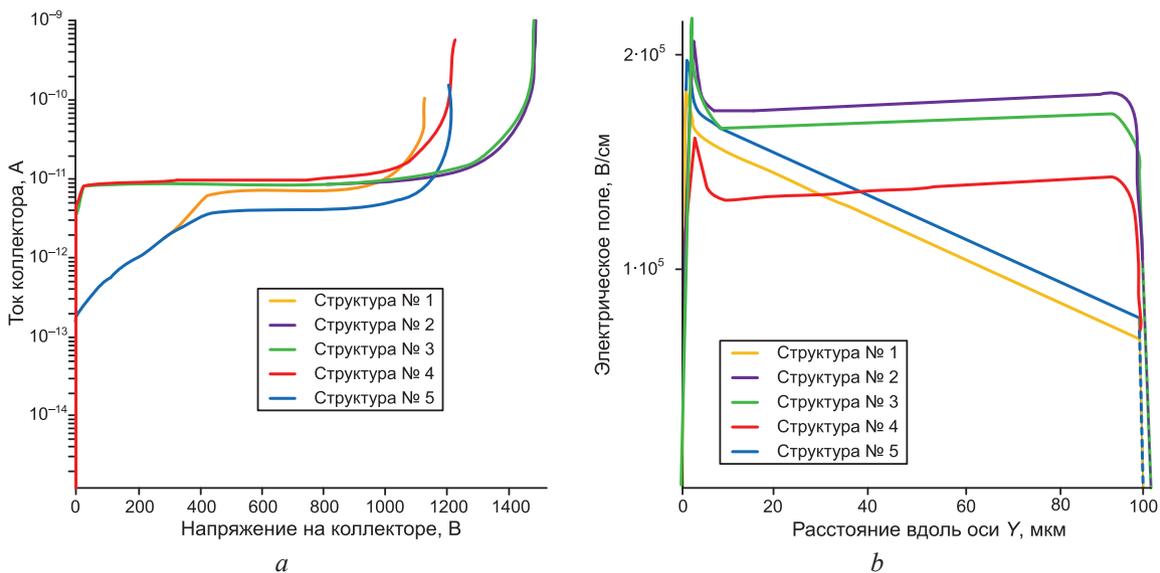


Рис. 6. Зависимость тока коллектора от обратного напряжения на коллекторе

при напряжении на затворе 0 В (а) и профиль электрического поля в области эмиттера при пробое (b)

Fig. 6. Dependence of the collector current on the reverse voltage on the collector

at a gate voltage of 0 V (a) and the electric field profile in the emitter region during breakdown (b)

Таким образом, избыточная инжекция неосновных носителей заряда из области p^{++} -коллектора компенсирует меньший вклад заряда, обусловленный областью p -коллектора. Можно сделать вывод, что p^{++} - и p -коллекторы совместно инжектируют примерно одинаковое количество неосновных носителей заряда в дрейфовую область по сравнению со структурой № 1. Этот вывод дополнительно подтверждается анализом сравнения концентрации дырок в дрейфовой области (концентрация дырок для включенного состояния (при напряжении на затворе, равном увеличенному на 1 В значению порогового напряжения, и напряжении на коллекторе $U_k = 1$ В) показана на рис. 8). На рис. 8 видно, что концентрация дырок в структурах № 1 и 5 примерно одинакова (отклонение не более 2 %). В результате разница в токе через устройство является незначительной.

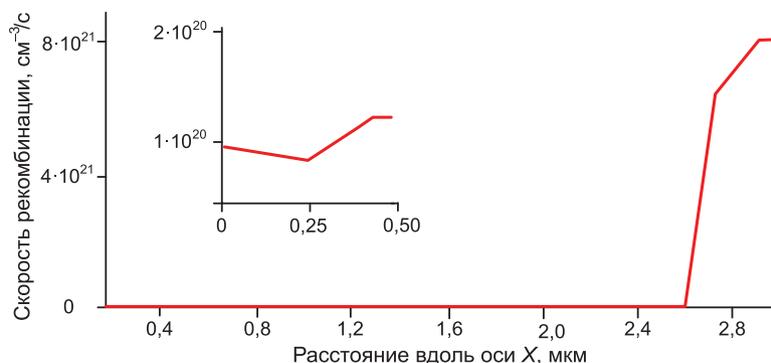


Рис. 7. Распределение скорости рекомбинации вдоль границы раздела коллектор/*n*-буфер в приборной структуре № 5

Fig. 7. Recombination rate distribution along the collector/*n*-buffer interface in structure No 5

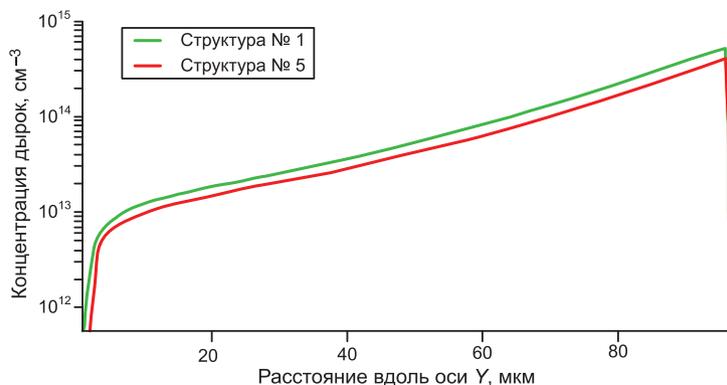


Рис. 8. Концентрация дырок в дрейфовой области во включенном состоянии для структур № 1 и 5

Fig. 8. Concentration of holes in the drift region in the on state for structures No 1 and 5

В табл. 2 представлены основные параметры приборных структур БТИЗ, полученные в результате компьютерного моделирования.

Таблица 2. Основные параметры приборных структур биполярного транзистора с изолированным затвором и вертикальным расположением канала

Table 2. Main parameters of the device structures of a bipolar transistor with an insulated gate and a vertical channel arrangement

Параметр	Структура				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Максимальный ток коллектора I_k при напряжениях на затворе $U_3 = 10$ В и коллекторе $U_k = 15$ В, А	0,00013	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	0,00014
Падение напряжения во включенном состоянии V_{on} при $J_k = 100$ А/см ² , В	2,00	1,55	2,00	1,48	2,15
Потери при переключении E_{off} при напряжении на стоке 2,3 В, мкВт	89,36	189,12	60,97	246,67	57,27
Напряжение пробоя $V_{проб}$, В	1100	1495	1495	1250	1200

Заключение

Посредством систем приборно-технологического моделирования проведено исследование эксплуатационных характеристик конструктивных решений биполярного транзистора с изолированным затвором и вертикальным расположением канала. Несмотря на довольно большое значение показателя падения напряжения во включенном состоянии V_{on} (относительно структур № 2 и 4) и среднее значение величины напряжения пробоя $V_{проб}$ (относительно структур № 2 и 3), наиболее перспективной из рассматриваемых можно считать структуру № 5 – Trench-IGBT со ступенчатым легированным коллектором. Такая структура позволяет коммутировать боль-

шие токи и обеспечивает минимальные потери при выключении. Очевидно, что оптимизация конструктивных параметров и режимов технологических операций должна быть направлена на устранение указанных недостатков.

Список литературы

1. Хэнкок, Д. Ключевые моменты при выборе Super-Junction MOSFET / Д. Хэнкок // Электронные компоненты. 2011. № 2. С. 66–72.
2. Iannuzzo, F. *Modern Power Electronic Devices: Physics, Applications, and Reliability* / F. Iannuzzo. UK: Institution of Engineering and Technology, 2020.
3. A Review of Power Electronic Devices for Heavy Goods Vehicles Electrification: Performance and Reliability / O. Alatise [et al.] // *Energies*. 2023. Vol. 16, No 11.
4. Raje, K. IGBT and Super Junction MOSFET / K. Raje // *Market Report 2024 (Global Edition)*.
5. Baliga, B. J. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices* / B. J. Baliga // Springer Science & Business Media. 2010.
6. A Simulation Study on a Novel Trench SJIGBT / B. Wang [et al.] // *Journal of Semiconductors*. 2012. Vol. 33, No 11.
7. Fujihira, T. Theory of Semiconductor Superjunction Devices / T. Fujihira // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1997. Vol. 36, No 10R.
8. The Field Stop IGBT (FS IGBT). A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential / T. Laska [et al.] // *12th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Proceedings*. 2000. P. 355–358.
9. A Simulation Study on Novel Field Stop IGBTs Using Superjunction / K.-H. Oh [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2006. Vol. 53, No 4. P. 884–890.
10. Semiconductor Device: U.S. Patent 6111289, Apr. 29, 2000 / F. Udrea.
11. The Soft Punchthrough Superjunction Insulated Gate Bipolar Transistor: A High Speed Structure with Enhanced Electron Injection / M. Antoniou [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2011. Vol. 58, No 3. P. 769–775.
12. Antoniou, M. The Superjunction Insulated Gate Bipolar Transistor Optimization and Modeling / M. Antoniou, F. Udrea, F. Bauer // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2010. Vol. 57, No 3. P. 594–600.
13. The Semi-Superjunction IGBT / M. Antoniou [et al.] // *IEEE Electron Device Letters*. 2010. Vol. 31, No 6. P. 591–593.
14. A Novel TFS-IGBT with a Super Junction Floating Layer / J. Ye [et al.] // *Journal of Semiconductors*. 2010. Vol. 31, No 11.
15. Silvaco [Electronic Resource]. Mode of access: <http://silvaco.com/>. Date of access: 22.11.2024.
16. Synopsys [Electronic Resource]. Mode of access: <https://synopsys.com/>. Date of access: 22.11.2024.
17. Cogenda [Electronic Resource]. Mode of access: <https://cogenda.com/>. Date of access: 22.11.2024.

References

1. Hancock D. (2011) Key Points When Selecting a Super-Junction MOSFET. *Electronic Components*. (2), 66–72 (in Russian).
2. Iannuzzo F. (2020) *Modern Power Electronic Devices: Physics, Applications, and Reliability*. UK, Institution of Engineering and Technology.
3. Alatis O., Deb A., Bashar E., Gonzalez J. O., Jahdi S., Issa W. (2023) A Review of Power Electronic Devices for Heavy Goods Vehicles Electrification: Performance and Reliability. *Energies*. 16 (11).
4. Raje K. (2024) IGBT and Super Junction MOSFET. *Market Report 2024 (Global Edition)*.
5. Baliga B. J. (2010) *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. Springer Science & Business Media.
6. Wang B., Tan J., Zhang W., Chu W., Zhu Y. (2012) A Simulation Study on a Novel Trench SJIGBT. *Journal of Semiconductors*. 33 (11).
7. Fujihira T. (1997) Theory of Semiconductor Superjunction Devices. *Japanese Journal of Applied Physics*. 36 (10R).
8. Laska T., Munzer M., Pfirsch F., Scaeffler C., Schmidt T. (2000) The Field Stop IGBT (FS IGBT). A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential. *12th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Proceedings*. 355–358.
9. Oh K.-H., Lee J., Lee K.-H., Kim Y. C., Yun C. (2006) A Simulation Study on Novel Field Stop IGBTs Using Superjunction. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 53 (4), 884–890.
10. Udrea F. (2000) *Semiconductor Device*. U.S. Patent 6111289.
11. Antoniou M., Udrea F., Bauer F., Nistor I. (2011) The Soft Punchthrough Superjunction Insulated Gate Bipolar Transistor: A High Speed Structure with Enhanced Electron Injection. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 58 (3), 769–775.

12. Antoniou M., Udrea F., Bauer F. (2010) The Superjunction Insulated Gate Bipolar Transistor Optimization and Modeling. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 57 (3), 594–600.
13. Antoniou M., Udrea F., Bauer F., Nistor I. (2010) The Semi-Superjunction IGBT. *IEEE Electron Device Letters*. 31 (6), 591–593.
14. Ye J., Fu D., Luo B., Zhao Y., Qiao M., Zhang B. (2010) A Novel TFS-IGBT with a Super Junction Floating Layer. *Journal of Semiconductors*. 31 (11).
15. *Silvaco*. Available: <http://silvaco.com/> (Accessed 22 November 2024).
16. *Synopsys*. Available: <https://synopsys.com/> (Accessed 22 November 2024).
17. *Cogenda*. Available: <https://cogenda.com/> (Accessed 22 November 2024).

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Чонг Тхань Нгуен, асп. каф. микро- и нанoeлектро-ники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Дао Динь Ха, канд. тех. наук, преп. каф. микропро-цессорной техники, Вьетнамский государственный технический университет имени Ле Куй Дона

Ловшенко И. Ю., зав. науч.-исслед. лаб. «Компью-терное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4), БГУИР

Стемпичский В. Р., канд. тех. наук, доц., проректор по научной работе, науч. рук. НИЛ 4.4, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-90
E-mail: lovshenko@bsuir.by
Ловшенко Иван Юрьевич

Information about the authors

Trong Thanh Nguyen, Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Dao Dinh Ha, Cand. of Sci., Lecturer at the Department of Microprocessor Engineering, Le Quy Don University of Science and Technology

Lovshenko I. Yu., Head of the R&D Lab. “Computer-Aided Design of Micro- and Nanoelectronic Systems” (Lab 4.4), BSUIR

Stempitsky V. R., Cand. of Sci., Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Adviser of the Research Lab 4.4, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Тел.: +375 17 293-88-90
E-mail: lovshenko@bsuir.by
Lovshenko Ivan Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-90-96>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.942; 51-7; 615.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРАКОРПОРАЛЬНОГО ИНФРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТОПУ ЧЕЛОВЕКА

А. В. ЧУРАКОВ¹, П. В. КАМЛАЧ¹, Н. Ж. ЕЛЕМЕСОВ², В. И. КАМЛАЧ¹,
А. И. ОНГАРБАЕВА³, Е. В. ЛЕЩЕВИЧ¹

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

²ТОО «Батысмедтехника» (г. Уральск, Республика Казахстан)

³Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева (г. Астана, Республика Казахстан)

Поступила в редакцию 18.06.2024

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

Аннотация. Современные требования для клинического испытания приборов медицинского назначения включают биофизическое моделирование методологии терапии на фантомах людей с известными биоэлектрическими свойствами всех тканей. В статье представлено моделирование на платформе с инструментами, рекомендованными FDA для клинических исследований и реализованными в Sim4Life V8.0. Проведены симуляции воздействия инфразвука на частотах 18 и 32 Гц на инфильтрированные ткани стопы фантома.

Ключевые слова: Sim4Life, моделирование, модель, инфразвук, воздействие, свойства тканей.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают благодарность ZMT Zurich MedTech AG за предоставление программного обеспечения Sim4Life.

Для цитирования. Моделирование экстракорпорального инфразвукового воздействия на стопу человека / А. В. Чураков [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 90–96. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-90-96>.

MODELING OF EXTRACORPOREAL INFRASOUND IMPACT ON HUMAN FOOT

ANDREJ V. CHURAKOV¹, PAVEL V. KAMLACH¹, NURALIM ZH. ELEMESOV²,
VERONIKA I. KAMLACH¹, AINAGUL I. ONGARBAYEVA³, EVGENIY V. LESHCHEVICH¹

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

²LLP “Batysmedtehnika” (Uralsk, Republic of Kazakhstan)

³L. N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Republic of Kazakhstan)

Submitted 18.06.2024

Abstract. Modern requirements for clinical testing of medical devices include biophysical modeling of therapy methodology on human phantoms with known bioelectric properties of all tissues. The article presents modeling on a platform with tools recommended by the FDA for clinical trials and implemented in Sim4Life V8.0. Simulations of the effect of infrasound at frequencies of 18 and 32 Hz on infiltrated tissues of the phantom foot were conducted.

Keywords: Sim4Life, modeling, model, infrasound, exposure, tissue properties.

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

Gratitude. The authors express their gratitude to ZMT Zurich MedTech AG for providing the Sim4Life software.

For citation. Churakov A. V., Kamlach P. V., Elemesov N. Zh., Kamlach V. I., Ongarbayeva A. I., Leshchevich E. V. (2024) Modeling of Extracorporeal Infrasound Impact on Human Foot. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 90–96. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-90-96> (in Russian).

Введение

Известны перспективные исследования с применением инфразвукового воздействия прибором ИФС-1 в терапии ряда заболеваний. Однако современные требования для клинического испытания медицинских приборов включают биофизическое моделирование различных видов терапии на фантомах людей с известными биоэлектрическими свойствами всех тканей. Моделирование проводится на платформе с инструментами, рекомендованными FDA для клинических исследований и реализованными в Sim4Life V8.0 [1]. Для доказательности инфразвуковой терапии и улучшения эргономики прибора необходимо проводить вычисление и моделирование распространения волн инфразвука и его важнейших параметров в неоднородных средах и тканях организма человека в реальном времени [2–5].

Математическая и геометрическая модели инфразвукового воздействия на стопу человека

Среда акустического моделирования Sim4Life предлагает трехмерный полноволновой решатель для моделирования распространения акустических волн через неоднородные среды. Решатель учитывает рассеяние, отражение, преломление, дифракцию, интерференцию и поглощение. Решающая программа основана на уравнении линейной волны акустического давления, которое было расширено и оптимизировано для гетерогенных материалов с потерями, встречающимися в анатомических структурах [1]. Элементарная форма уравнений в частных производных записывается следующим образом:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где p – давление; c – скорость звука; t – время.

Однако, поскольку решатель применяется к гетерогенным средам, учитываются изменения плотности, а поглощение учитывается путем расширения формулировки до вида

$$\rho \nabla \cdot \frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\tilde{a}}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где ρ – массовая плотность; \tilde{a} – фактор, описывающий поведение поглощения:

$$\tilde{a} = 2\alpha \sqrt{\frac{\alpha^2 c^4}{\omega^2} + c^2}; \quad (3)$$

α – коэффициент поглощения, дБ/м; ω – угловая частота.

Метод конечных разностей во временной области (FDTD) используется для решения уравнения (2) в частных производных в трехмерной области. Этот подход требует дискретизации расчетной области с использованием структурированной декартовой сетки, состоящей из шестигранных элементарных ячеек. Алгоритм FDTD работает с неравномерными декартовыми сетками, позволяя адаптировать уточнение дискретизации к геометрическим требованиям установки. Решатель оптимизирован для быстрой обработки больших структур данных на графических процессорах (GPU), но также поддерживает обработку на CPU [1].

Акустический источник моделируется как объемное тело, излучающее акустические волны всей своей поверхностью. Каждая дискретизированная поверхностная грань источника рассматривается как элементарный акустический излучатель в соответствии с принципом Гюйгенса. Этот принцип гласит, что волновой фронт может быть представлен (бесконечным) количеством

точечных источников или состоять из них. Такой подход обеспечивает гибкость использования источников любой формы без необходимости специальной обработки исходных терминов.

Моделирование инфразвукового воздействия проводилось с помощью излучателя прибора, представляющего собой низкочастотную динамическую головку диаметром 260 мм и высотой 138 мм, помещенную во внешний корпус из стекловолокна с эпоксидной смолой. Диаметр выходного отверстия рефлектора для инфразвука составлял 75 мм.

В программе Sim4Life for Science была построена геометрическая модель воздействия инфразвука на конечность тела человека, представленная на рис. 1.

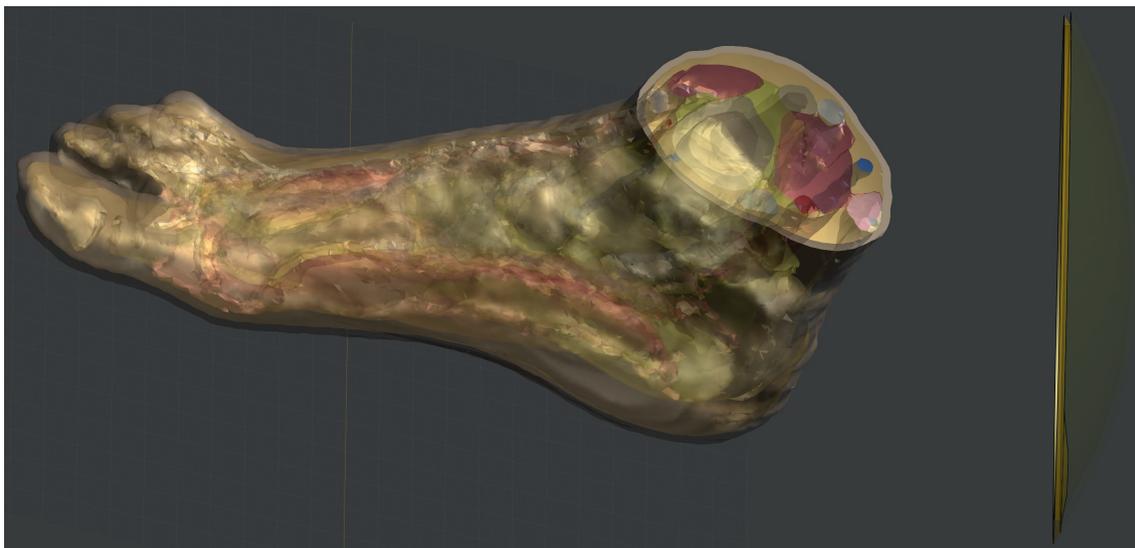


Рис. 1. Геометрическая модель конечности тела человека в программе Sim4Life for Science
Fig. 1. Geometric model of a human body limb in the Sim4Life for Science program

Объектом воздействия являлась стопа цифрового фантома женщины со всеми анатомическими структурами и заданными свойствами тканей из базы данных Sim4Life for Science. Для модели задавались плотность, теплоемкость, теплопроводность, скорость теплопередачи, скорость тепловыделения, вязкость, акустические свойства (скорость звука, константа затухания и нелинейность), весовые доли тканей.

Результаты исследований и их обсуждение

Основной величиной, которую рассчитывает акустический решатель, является пространственное распределение давления на определенной частоте $p(x, y, z, f)$. Оно представляется в виде комплексного вектора с информацией об амплитуде и фазе в каждой вычислительной ячейке. Из поля давления и местных параметров материала автоматически выводятся три дополнительные величины: интенсивность звука, плотность акустической мощности, удельная скорость поглощения энергии [1]. Интенсивность звука ($\text{Вт}/\text{м}^2$) – это количество акустической энергии, распространяющейся через единицу поверхности в единицу времени. Она рассчитывается по формуле

$$I = \frac{P^2}{2\rho c}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлен результат моделирования распределения интенсивности инфразвука.

Для определения воздействия инфразвука на тело человека были построены графики распределения интенсивности инфразвука в плоскости на частотах 18 и 32 Гц. Плоскость воздействия определялась по геометрической центральной оси модели биологического объекта. Результат моделирования изображен на рис. 3.

Плотность звуковой энергии ($\text{Вт}/\text{м}^3$) описывает энергию, выделяемую в единицу времени в единицу объема материала вследствие поглощения:

$$\frac{dP}{dV} = 2\alpha I = \alpha \frac{P^2}{\rho c}. \quad (5)$$

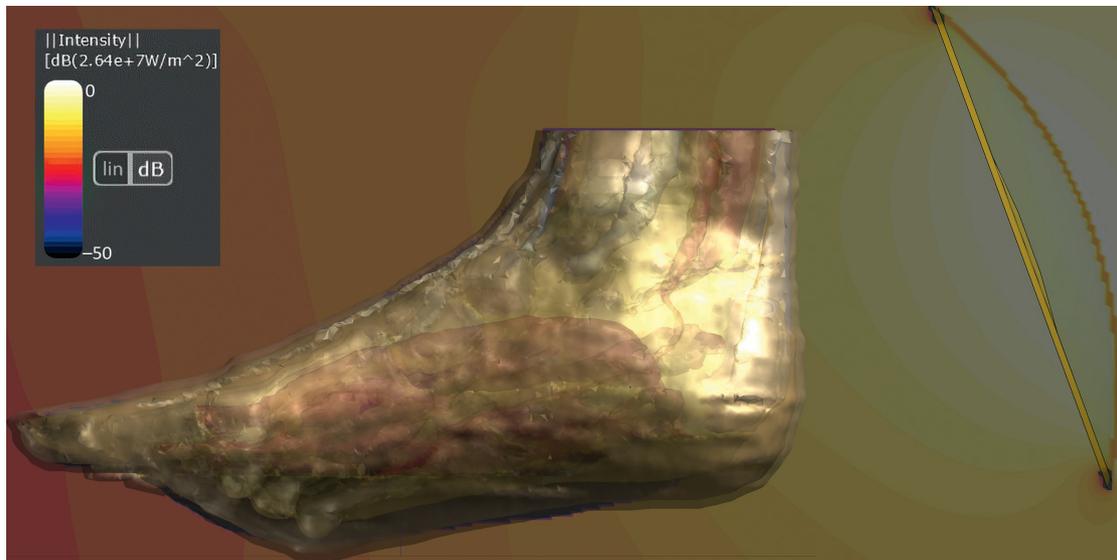


Рис. 2. Моделирование распределения интенсивности инфразвука
Fig. 2. Modeling the distribution of infrasound intensity

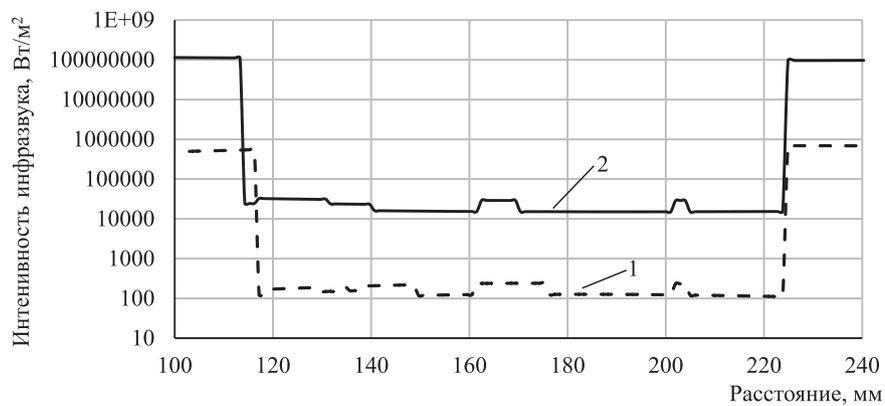


Рис. 3. Распределение интенсивности инфразвука в плоскости на частотах 18 (1) и 32 (2) Гц
Fig. 3. In-plane infrasound intensity distribution at frequencies of 18 (1) and 32 (2) Hz

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования распределения плотности звуковой энергии на частотах 18 и 32 Гц.

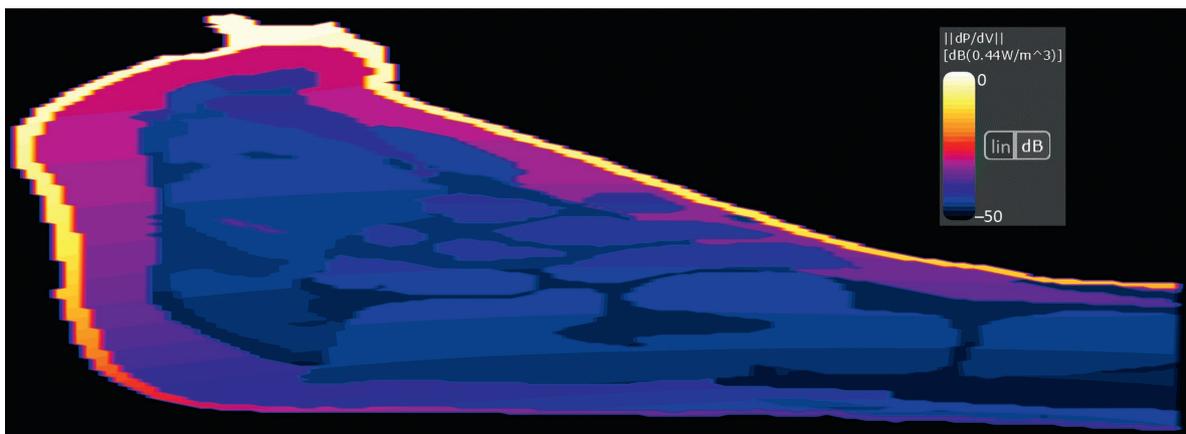


Рис. 4. Моделирование распределения плотности звуковой энергии
Fig. 4. Modeling the distribution of sound energy density

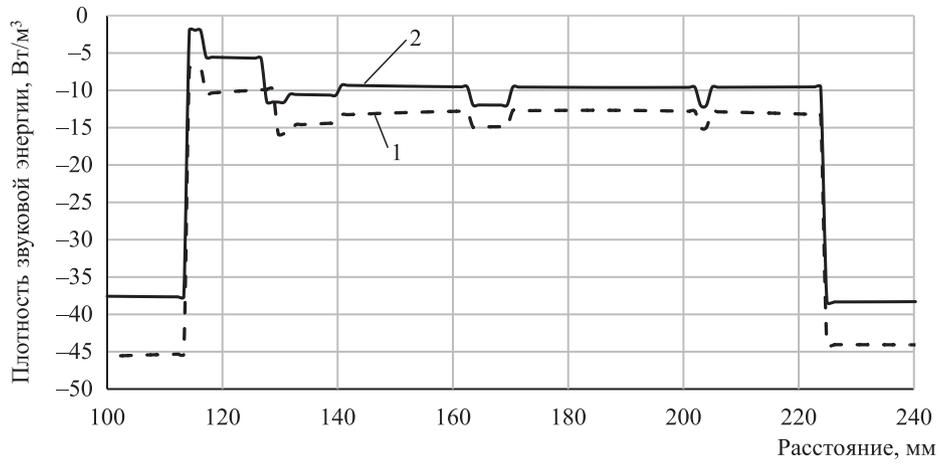


Рис. 5. Распределение плотности звуковой энергии инфразвука в плоскости на частотах 18 (1) и 32 (2) Гц
Fig. 5. Distribution of infrasound sound energy density in a plane at frequencies of 18 (1) and 32 (2) Hz

Удельная скорость поглощения энергии (Вт/кг) описывает энергию, выделяемую в единицу массы материала вследствие поглощения:

$$S = \alpha \frac{p^2}{\rho^2 c} \quad (6)$$

На рис. 6 и 7 представлены результаты моделирования удельной скорости поглощения энергии на частотах 18 и 32 Гц.



Рис. 6. Моделирование распределения удельной скорости поглощения энергии
Fig. 6. Modeling the distribution of specific energy absorption rate

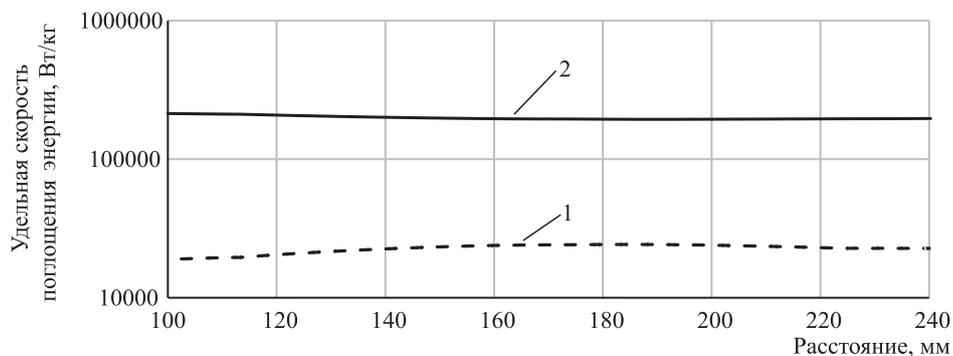


Рис. 7. Распределение удельной скорости поглощения энергии инфразвука в плоскости на частотах 18 и 32 Гц

Fig. 7. Distribution of specific absorption rate of infrasound energy in the plane at frequencies of 18 and 32 Hz

Результаты моделирования показали, что интенсивность инфразвука в тканях не одинакова при прохождении через биологический объект и зависит от структуры ткани и частоты воздействия. На рис. 3 на отрезках 160–170 и 200–210 мм видны небольшие всплески интенсивности инфразвука, которые обусловлены его прохождением через ткани с различной акустической добротностью. Из графиков на рис. 3 видно, что значение интенсивности инфразвука на частоте 32 Гц более чем в 100 раз превышает интенсивность на частоте 18 Гц. При этом значения плотности звуковой энергии (рис. 5) на частотах 18 и 32 Гц не сильно отличаются, а удельная скорость поглощения энергии (рис. 7) для частот 18 и 32 Гц имеет различия не более чем в 10 раз.

Согласно полученным результатам, увеличение частоты с 18 до 32 Гц приводит к значительному увеличению интенсивности сигнала и удельной скорости поглощения энергии, что может вызвать негативные клинические эффекты. Биофизическое моделирование инфразвукового воздействия и сопоставление данных с клиническими эффектами позволяет определить частоты и параметры инфразвука, вычислить оптимальное и безопасное время процедуры в лечении пораженных органов и тканей.

Заключение

1. Построена геометрическая модель женской стопы в пакете Sim4Life for Science, учитывающая плотность, теплоемкость, теплопроводность, скорость теплопередачи, скорость тепловыделения, вязкость, акустические свойства (скорость звука, константу затухания и нелинейность), весовые доли тканей.

2. Проведено моделирование воздействия инфразвука на тело человека (стопу) на частотах 18 и 32 Гц. Анализ результатов моделирования показал, что значение интенсивности инфразвука на частоте 32 Гц более чем в 100 раз превышает интенсивность на частоте 18 Гц; значения плотности звуковой энергии на частотах 18 и 32 Гц не сильно отличаются; удельная скорость поглощения энергии для частот 18 и 32 Гц имеет различия не более чем в 10 раз.

3. Для расширенных клинических испытаний необходимо пошаговое моделирование для всех частот инфразвука с последующим анализом данных. Это позволит персонализировать процедуру для пациентов с различными патологиями, выделить оптимальные диапазоны инфразвуковой терапии, улучшить эффективность и эргономику прибора.

Список литературы

1. Sim4Life Light Reference Guide Release 7.0. Switzerland: Zurich MedTech, 2023.
2. Модель воздействия электромагнитного поля на биологические ткани / П. В. Камлач [и др.] // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 8. С. 46–52.
3. Чураков, А. В. Принципы моделирования и проектирования приборов магнито- и ультразвуковой терапии / А. В. Чураков. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2019.
4. Чураков, А. В. Моделирование магнитотаргетинга лекарственных средств, основанное на вычислении проницаемости электромагнитного поля в ткани организма человека / А. В. Чураков, П. В. Камлач, А. И. Онгарбаева // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 118–123. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-118-123>.
5. Чураков, А. В. Модель воздействия сфокусированного ультразвука на биологические ткани / А. В. Чураков, П. В. Камлач, И. В. Шульгина // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 6. С. 70–77.

References

1. *Sim4Life Light Reference Guide Release 7.0* (2023). Switzerland, Zurich MedTech.
2. Kamlach P. V., Grodo D. S., Churakov A. V., Kamlach V. I., Bondarik V. M., Madveiko S. I., et al. (2020) Model of Electromagnetic Field Impact on Biological Tissues. *Doklady BSUIR*. 18 (8), 46–52 (in Russian).
3. Churakov A. V. (2019) *Principles of Modeling and Designing Devices for Magnetic and Ultrasonic Therapy*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
4. Churakov A. V., Kamlach P. V., Ongarbayeva A. I. (2023) Simulation of Magnetotargeting of Medicines Based on the Calculation of Permeability of Human Tissues by the Electromagnetic Field. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 118–123. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-118-123> (in Russian).
5. Churakov A. V., Kamlach P. V., Shulgina I. V. (2022) Model of the Impact of Focused Ultrasound on Biological Tissues. *Doklady BSUIR*. 20 (6), 70–77 (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

Чураков А. В., канд. мед. наук, доц., доц. каф. электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Камлач П. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Елемесов Н. Ж., дир. ТОО «Батысмедтехника»

Камлач В. И., ассист. каф. инженерной психологии и эргономики, БГУИР

Онгарбаева А. И., ст. преп. каф. информационной безопасности, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева

Лещевич Е. В., асп. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-63
E-mail: kamlachpv@bsuir.by
Камлач Павел Викторович

Information about the authors

Churakov A. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Kamlach P. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Elemesov N. Zh., Director of the LLP "Batysmedtehnika"

Kamlach V. I., Assistant at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics, BSUIR

Ongarbayeva A. I., Senior Lecturer at the Department of Information Security, L. N. Gumilyov Eurasian National University

Leshchovich E. V., Postgraduate at the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: + 375 17 293-89-63
E-mail: kamlachpv@bsuir.by
Kamlach Pavel Viktorovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-97-102>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 616-073.97

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЛАБЛЕНИЯ МЫШЦ ЖЕВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПОСЛЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

И. В. САМУЙЛОВ

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

Поступила в редакцию 31.10.2024

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

Аннотация. Поверхностная электромиография спонтанной активности мышц является наиболее распространенным методом оценки функционального состояния мышечного комплекса. Сигнал поверхностной электромиограммы имеет шумоподобный вид с изменяющейся во времени амплитудой сигнала. Изучены изменение фоновой активности и вероятность появления высокоамплитудных выбросов амплитуды – кратковременного значительного увеличения амплитуды электромиограммы. Изменение фоновой активности может быть связано как с техническими факторами, например, с изменением сопротивления контакта кожа–электрод, так и непосредственно с состоянием мышечного комплекса и невозможностью мышц ментально расслабиться. Высокоамплитудные выбросы также могут появляться из-за множества факторов – смещение электродов, регистрация сторонних мышечных сокращений, спазмы мышц и т. д. Проанализированы синхронные электромиограммы височных и жевательных мышц. Исследование фоновой активности и наличия высокоамплитудных выбросов показало различие в скорости расслабления мышц до и после проведения теста на функциональную нагрузку, разницу в скорости расслабления между височными и жевательными мышцами.

Ключевые слова: электромиография, височные мышцы, жевательные мышцы, расслабление мышц, циклическая нагрузка.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Автор выражает благодарность кафедре ортопедической стоматологии и ортодонтии с курсом детской стоматологии БелМАПО и лично И. Н. Барадиной за помощь в организации исследований.

Для цитирования. Самуйлов, И. В. Исследование расслабления мышц жевательного комплекса после функциональной нагрузки / И. В. Самуйлов // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 97–102. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-97-102>.

STUDY OF RELAXATION OF THE MUSCLES OF THE CHEWING COMPLEX AFTER THE FUNCTIONAL LOAD

IVAN U. SAMUILAU

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

Submitted 31.10.2024

Abstract. Surface electromyography of spontaneous muscle activity is the most common method for assessing the functional state of the muscle complex. The surface electromyogram signal has a noise-like appearance with a signal amplitude changing over time. The change in background activity and the probability of high-amplitude amplitude spikes, a short-term significant increase in the electromyogram amplitude, were studied. A change in background activity can be associated with both technical factors, such as changes in the resistance of the skin-electrode contact, and directly with the state of the muscle complex and the inability of the muscles to relax instantly. High-amplitude spikes can also appear due to many factors – electrode displacement, recording of extraneous muscle contractions, muscle spasms, etc. Synchronous electromyograms of the temporal and masseter muscles were analyzed. The study of background activity and the presence of high-amplitude spikes showed a difference in the rate of muscle relaxation before and after the functional load test, as well as a difference in the rate of relaxation between the temporal and masseter muscles.

Keywords: electromyography, temporal muscles, masticatory muscles, muscle relaxation, functional load.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

Gratitude. The author expresses the gratitude to the Department of Orthopedic Dentistry and Orthodontics with the Course of Pediatric Dentistry of BelMAPO, and personally to I. N. Baradina for the help in organizing the research.

For citation. Samuilau I. U. (2024) Study of Relaxation of the Muscles of the Chewing Complex after the Functional Load. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 97–102. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-97-102> (in Russian).

Введение

Поверхностная электромиография является наиболее применяемым методом оценки функционального состояния мышечного комплекса [1]. Самый распространенный тест, в ходе которого происходит регистрация электромиограмм (ЭМГ), – это спонтанная активность (состояние покоя) мышц. В качестве функциональной нагрузки также могут выступать максимальное сжатие зубов, удержание максимального усилия, процесс пережевывания, глотательные движения, открывание-закрывание нижней челюсти [2].

Критерием оценки ЭМГ спонтанной активности мышц чаще всего выступает среднее значение амплитуды по всей записи ЭМГ. Кроме того, для оценки стабильности и надежности полученного значения амплитуды ЭМГ может использоваться параметр среднеквадратичного отклонения [3]. Во многих ЭМГ значение среднеквадратичного отклонения сопоставимо по размерности со значением амплитуды ЭМГ, что усложняет интерпретацию результатов. Также амплитуда ЭМГ не стабильна во времени, часто наблюдается тенденция на постепенные изменения уровня амплитуды в процессе проведения регистрации. Амплитуда может как увеличиваться, так и уменьшаться. Следует отметить такой вид артефактов на ЭМГ, как высокоамплитудные выбросы – кратковременное значительное увеличение амплитуды. Данные особенности сигнала ЭМГ могут быть вызваны спонтанным сжатием зубов, глотательными движениями, болевыми ощущениями и т. д. В [4] отмечается, что такие психологические факторы, как длительное воздействие стресса и беспокойство, стимулируют мышечные сокращения лицевой области и, соответственно, могут вызывать скрежет, сжатие зубов и болевые ощущения.

Динамика изменения амплитуды ЭМГ мышц в состоянии покоя после функциональной нагрузки изучена недостаточно. Чаще всего критерием оценки состояния мышечного комплекса выступает время расслабления мышц с пикового уровня или с момента подачи команды на расслабление мышц до уровня, принятого за уровень покоя. При этом не учитывается постепенное снижение уровня спонтанной активности [5]. Если изучать длительные ЭМГ спонтанной активности после функциональной нагрузки, то на многих записях заметно постепенное изменение амплитуды сигнала, что свидетельствует о продолжении расслабления мышц. Примеры различ-

ного поведения амплитуды ЭМГ правой височной мышцы до и после функциональной нагрузки приведены на рис. 1.

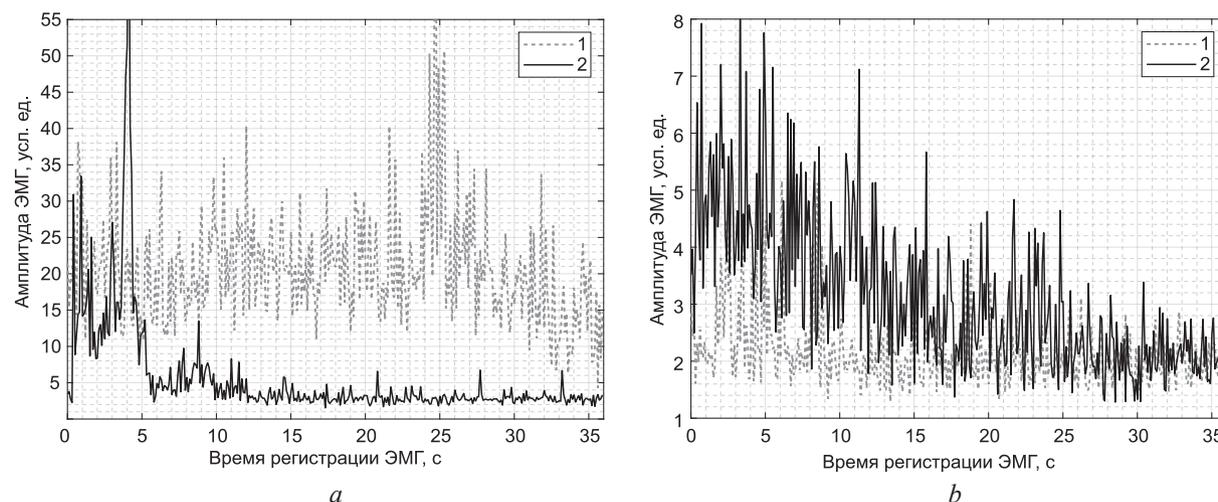


Рис. 1. Пример для пациентов № 1 (а) и № 2 (б) поведения электромиограмм правой височной мышцы до (1) и после (2) функциональной нагрузки

Fig. 1. Example for patients No 1 (a) and No 2 (b) of the behavior of electromyograms of the right temporalis muscle before (1) and after (2) functional load

В процессе анализа ЭМГ изучалось расслабление мышц после интенсивной функциональной нагрузки в сравнении с поведением мышц до функциональной нагрузки.

Методика проведения эксперимента

В ходе предварительных исследований была собрана база из 101 исследования ЭМГ височных и жевательных мышц в состоянии покоя до и после функциональной нагрузки. Длительность записи составляла 36 с. Функциональная нагрузка заключалась в удержании максимальной силы сжатия зубов в течение 6 с с циклами расслабления с длительностью 3 с. Число повторений равнялось пяти. Таким образом, регистрация спонтанной активности после функциональной нагрузки начиналась спустя 6 с после команды на расслабление мышц. Полученные данные ЭМГ обрабатывались в среде MATLAB 2020R. Подробное описание методики регистрации ЭМГ изложено в [6].

Для вычисления амплитуды электромиограммы она разбивалась на участки длительностью 20 мс. На каждом участке определялась амплитуда путем отнимания максимального значения ЭМГ от минимального. Таким образом, при длительности сигнала 36 с на выходе получается вектор с длительностью 1800 отсчетов. Для каждого из 1800 интервалов времени имелось 101 (по количеству исследований) значение амплитуды. Далее на каждом интервале определялось медианное значение амплитуды. Среднее значение для оценки амплитуды ЭМГ не использовалось ввиду того, что закон распределения амплитуд ЭМГ отличается от нормального закона. Для анализа всех полученных данных рассчитывался вектор, состоящий из медианных амплитуд.

Для оценки зависимости изменения амплитуды от времени регистрации ЭМГ полученные данные аппроксимировались по линейному закону вида $U = k_1 t + k_2$. Дополнительно проводился расчет корреляции между медианными амплитудами и временем регистрации ЭМГ, а также коэффициентов корреляции с характеристикой силы связи [7].

Еще одним критерием, оценивающим спонтанную активность после функциональной нагрузки, являлась доля ЭМГ, в которых присутствуют высокоамплитудные выбросы. Их наличие определялось следующим образом:

- находилось среднее значение амплитуды для каждого вектора амплитуд;
- значение каждой амплитуды в векторе, состоящем из 1800 отсчетов, проверялось на превышение пятикратной величины усредненной амплитуды.

Для отсева случайных срабатываний присутствие высокоамплитудных выбросов в ЭМГ считалось подтвержденным в случае наличия пяти превышений.

Результаты исследований и их обсуждение

Несмотря на значительную разницу между данными отдельных пациентов, при анализе медианных амплитуд отчетливо видна тенденция на уменьшение амплитуды с начала времени регистрации для всех исследуемых мышц (рис. 2). При этом после функциональной нагрузки наблюдались значительное снижение фоновой активности, которая оценивается по коэффициенту корреляции (табл. 1), и более высокоамплитудный сигнал в начале регистрации. Это приводит к тому, что через некоторое время амплитуды до и после функциональной нагрузки выравниваются.

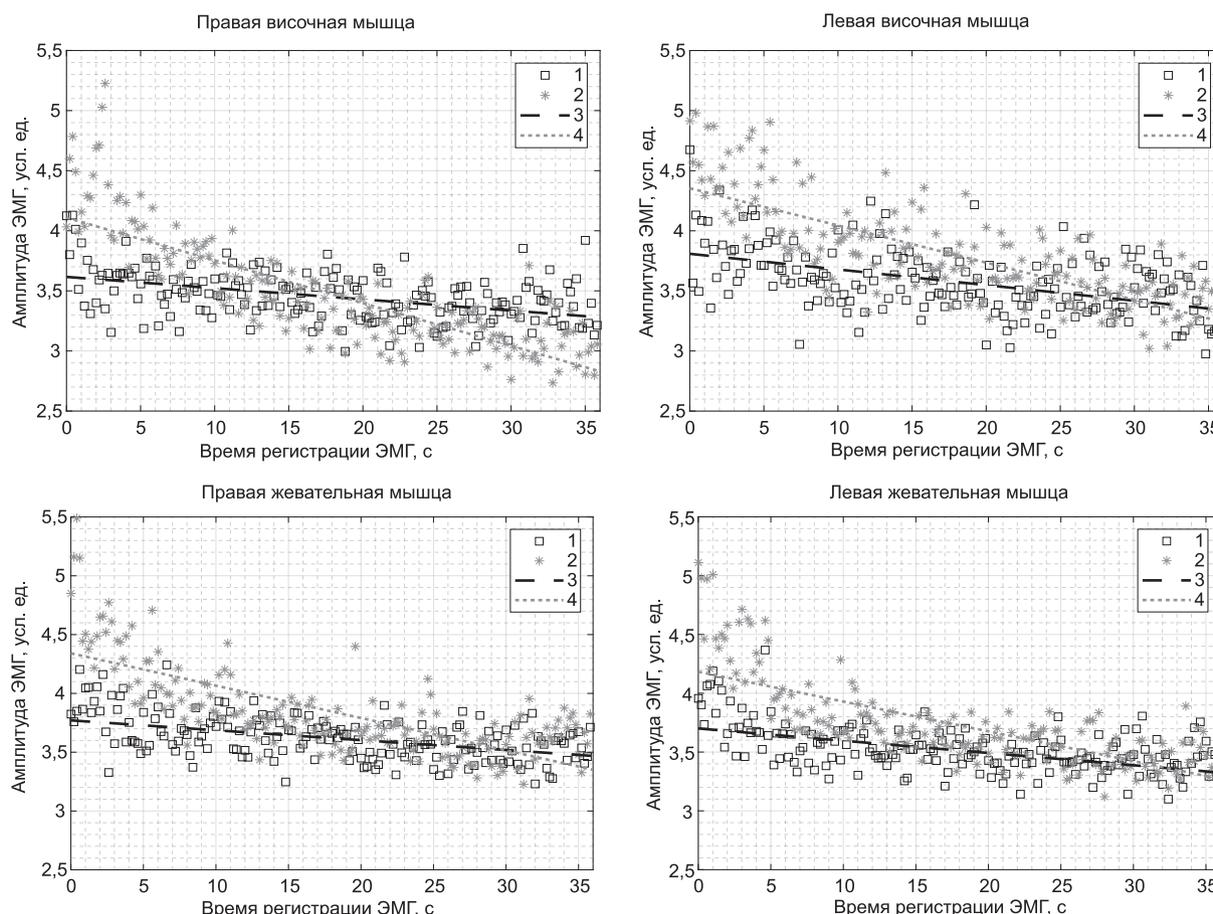


Рис. 2. Динамика изменения медианных амплитуд в ходе регистрации электромиограмм: 1, 2 – до и после функциональной нагрузки; 3, 4 – линейная аппроксимация амплитуд до и после функциональной нагрузки
Fig. 2. Dynamics of changes in median amplitudes during electromyogram recording: 1, 2 – before and after functional load; 3, 4 – linear approximation of amplitudes before and after functional load

Таблица 1. Расчет коэффициентов корреляции
Table 1. Calculation of correlation coefficients

Наименование мышцы	До функциональной нагрузки		После функциональной нагрузки	
	Формула линейной аппроксимации	Коэффициент корреляции	Формула линейной аппроксимации	Коэффициент корреляции
Правая височная	$U = -0,0093t + 3,616$	-0,4291	$U = -0,0344t + 4,1087$	-0,8008
Левая височная	$U = -0,0130t + 3,808$	-0,4878	$U = -0,0310t + 4,3542$	-0,7817
Правая жевательная	$U = -0,0084t + 3,770$	-0,4703	$U = -0,0275t + 4,3408$	-0,7480
Левая жевательная	$U = -0,0104t + 3,700$	-0,5694	$U = -0,0253t + 4,1829$	-0,7597

До функциональной нагрузки наблюдалось падение уровня амплитуды, составлявшее $\sim 0,01$ В каждую секунду. Данная зависимость, скорее всего, связана с психологическими факторами (рас-

слабление пациента) и улучшением контакта электрод–кожа за счет растекания электропроводящего геля. Уровень амплитуды стабилизировался в диапазоне 10–30 с.

После функциональной нагрузки наблюдалась тенденция падения уровня амплитуды, которое составляло ~0,03 В каждую секунду. При этом падение амплитуды ЭМГ жевательных мышц прекращалось приблизительно после 20 с регистрации, что соответствует 26 с после команды на расслабление мышц. Для височных мышц за 36 с регистрации не был зарегистрирован конец тенденции на расслабление мышц.

Коэффициенты корреляции между амплитудой ЭМГ и временем регистрации в случае анализа амплитуд ЭМГ спонтанной активности после функциональной нагрузки находились в диапазоне от 0,74 до 0,80, что свидетельствует о линейной зависимости падения амплитуды. До функциональной нагрузки коэффициенты корреляции имели значения от 0,42 до 0,56. Данные величины коэффициентов находятся на границе слабой и сильной связей между измеряемыми параметрами, свидетельствуют о некорректности использования линейной аппроксимации зависимости между амплитудой ЭМГ и временем регистрации. Амплитуда ЭМГ быстро уменьшается в первые секунды записи и выходит на плато.

В случае спонтанной активности до функциональной нагрузки из 404 исследований (четыре канала данных, 101 пациент) было зарегистрировано 57 исследований, содержащих высокоамплитудные выбросы, что составляет 14 % из всех исследований. Для правой височной мышцы зарегистрировано 12 выбросов, для левой – 15, для правой жевательной мышцы – 14, для левой – 16. После функциональной нагрузки зарегистрировано 122 случая (30 %) выбросов, из них 21 и 26 – для правой и левой височных мышц соответственно, 38 и 37 – для правой и левой жевательных мышц соответственно. Из представленных данных можно сделать вывод, что после функциональной нагрузки количество высокоамплитудных выбросов в среднем увеличилось вдвое. При этом до проведения функциональной нагрузки количество высокоамплитудных выбросов в жевательных мышцах незначительно превосходит (в 1,1 раза) их количество в височных мышцах. Общий показатель экспериментов с выбросами – 14 %. После проведения функциональной нагрузки частота выбросов при исследовании жевательных мышц составляла 37 %, височных – 23 %. Разница во встречаемости выбросов амплитуды увеличилась до 1,6 раза.

Заключение

1. Зарегистрирована общая тенденция на расслабление мышц в ходе электромиографического исследования мышц в состоянии покоя. До функциональной нагрузки скорость уменьшения амплитуды сигнала электромиограммы составляла 0,01 В/с, после функциональной нагрузки – 0,03 В/с.

2. Высокоамплитудные выбросы до функциональной нагрузки обнаружены в 14 % случаев без существенной разницы между исследуемыми мышцами, после проведения функциональной нагрузки они обнаружены в височных мышцах в 23 % случаев, в жевательных мышцах – в 37 %.

3. На основе полученных данных можно дать следующие рекомендации для проведения электромиографических исследований:

– после начала регистрации необходимо выждать минимум 20 с для получения стабильных данных для анализа;

– после функциональной нагрузки высокой интенсивности ожидаемое время расслабления жевательных мышц составляет 30 с, височных – более 40 с.

Список литературы

1. Szyszka-Sommerfeld, L. Surface Electromyography as a Method for Diagnosing Muscle Function in Patients with Congenital Maxillofacial Abnormalities / L. Szyszka-Sommerfeld, M. Lipski, K. Woźniak // Journal of Healthcare Engineering. 2020. No 1–6. DOI: 10.1155/2020/8846920.
2. Blanksma, N. G. Electromyographic Heterogeneity in the Human Temporalis and Masseter Muscles During Static Biting, Open/Close Excursions, and Chewing / N. G. Blanksma, T. M. G. J. van Eijden // Journal of Dental Research. 1995. Vol. 74, No 6. P. 1318–1327. DOI: 10.1177/00220345950740061201.
3. Bruxism and Masseter and Temporal Muscle Activity Before and After Selective Grinding / J. A. Aristizabal Hoyos [et al.] // International Journal of Odontostomatology. 2017. Vol. 11, No 3. P. 253–259. DOI: 10.4067/s0718-381x2017000300253.

4. Анализ функционального состояния мышц челюстно-лицевой области у стоматологических пациентов с признаками бруксизма в сочетании с синдромом обструктивного апноэ во сне / С. П. Рубникович [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2020. Т. 64, № 3. С. 341–349. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-3-341-349>.
5. Сидоренко, А. Н. Сравнительный анализ функционального состояния жевательных мышц у больных с нейромышечной дисфункцией височно-нижнечелюстных суставов при традиционном методе лечения и применении транскраниальной электростимуляции / А. Н. Сидоренко, А. А. Кулаков, А. Х. Каде // Фундаментальные исследования. 2013. Т. 9, № 1. С. 132–136.
6. Самуйлов, И. В. Алгоритм анализа паттерна движения мышечно-суставного комплекса височно-нижнечелюстного сустава на основе обработки многоканальных электромиограмм / И. В. Самуйлов [и др.] // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 8. С. 53–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-8-53-61>.
7. Баврина, А. П. Современные правила применения корреляционного анализа / А. П. Баврина, И. Б. Борисов // Медицинский альманах. 2021. Т. 3, № 68. С. 70–79.

References

1. Szyszka-Sommerfeld L., Lipski M., Woźniak K. (2020) Surface Electromyography as a Method for Diagnosing Muscle Function in Patients with Congenital Maxillofacial Abnormalities. *Journal of Healthcare Engineering*. (1–6). DOI: 10.1155/2020/8846920.
2. Blanksma N. G., van Eijden T. M. G. J. (1995) Electromyographic Heterogeneity in the Human Temporalis and Masseter Muscles During Static Biting, Open/Close Excursions, and Chewing. *Journal of Dental Research*. 74 (6), 1318–1327. DOI: 10.1177/00220345950740061201.
3. Aristizabal Hoyos J. A., Restrepo de Mejía F., Peralta Pineda A. F., Díaz Deossa Y. T., Triviño Charry A. M., Ballesteros Oliva Y., et al. (2017) Bruxism and Masseter and Temporal Muscle Activity Before and After Selective Grinding. *International Journal of Odontostomatology*. 11 (3), 253–259. DOI: 10.4067/s0718-381x2017000300253.
4. Rubnikovich S. P., Baradina I. N., Denisova Y. L., Samuilov I. V., Davydov M. V., Kulchitsky V. A. (2020) Analysis of the Functional State of the Maxillofacial Region Muscles of Dental Patients with Bruxism Signs in Combination with Obstructive Sleep Apnea Syndrome. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 64 (3), 341–349. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-3-341-349> (in Russian).
5. Sidorenko A. N., Kulakov A. A., Kade A. H. (2013) The Comparative Analysis of the Functional Condition of the Masseters with the Patients Having Neuromuscular Dysfunction of Temporomandibular Joints in the Traditional Method of Treatment and Application of the Transcranial Electric Electric Stimulation. *Fundamental Research*. 9 (1), 132–136 (in Russian).
6. Samuilov I. V., Davydov M. V., Saghaymarouf G. G., Baradina I. N., Rubnikovich S. P. (2020) Algorithm for Analyzing the Movement Pattern of the Temporomandibular Joint Muscular-Articular System Based on Multichannel Electromyogram Processing. *Doklady BGUIR*. 18 (8), 53–61. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-8-53-61> (in Russian).
7. Bavrina A. P., Borisov I. B. (2021) Modern Rules of the Application of Correlation Analysis. *Medical Almanac*. 3 (68), 70–79 (in Russian).

Сведения об авторе

Самуйлов И. В., ассист. каф. электронной техники и технологии, 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 33 613-88-28
E-mail: i.samuilov@bsuir.by
Самуйлов Иван Владимирович

Information about the author

Samuilau I. U., Assistant at the Department of Electronic Engineering and Technology, 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 33 613-88-28
E-mail: i.samuilov@bsuir.by
Samuilau Ivan Uladimiravich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-103-111>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.8:339.1

ОПТИМИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Е. С. ПИСКУН, Д. В. НУАНСЕНГСИ, Е. Н. КОТЬКО

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

Поступила в редакцию 06.09.2024

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

Аннотация. Рассмотрены методы и алгоритмы искусственного интеллекта, направленные на автоматизацию и оптимизацию бизнес-процессов в электронной коммерции. Представлены возможности использования искусственного интеллекта для персонализации клиентских предложений, прогнозирования поведения потребителей и сегментации клиентов с помощью методов машинного обучения. Проанализированы особенности применения искусственного интеллекта в таких крупных компаниях, как Amazon, Walmart, OZON и Netflix, где он позволяет улучшать точность прогнозов и автоматизировать процессы принятия решений. Предложено использование методов обработки естественного языка и нейронных сетей для автоматической генерации рекламных описаний товаров, что способствует повышению эффективности маркетинговых стратегий и снижению издержек.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, автоматизация, электронная коммерция, классификация, регрессия, кластерный анализ, обработка естественного языка, персонализация, прогнозирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пискун, Е. С. Оптимизация бизнес-процессов в электронной коммерции с применением методов и алгоритмов искусственного интеллекта / Е. С. Пискун, Д. В. Нуансенгси, Е. Н. Котько // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 6. С. 103–111. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-103-111>.

OPTIMIZATION OF BUSINESS PROCESSES IN E-COMMERCE USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS AND ALGORITHMS

EKATERINA S. PISKUN, DIANA V. NUANSENGSY, ELIZABETH N. KOTSKO

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

Submitted 06.09.2024

Abstract. The paper discusses methods and algorithms of artificial intelligence aimed at automating and optimizing business processes in e-commerce. The possibilities of using artificial intelligence to personalize customer offers, predict consumer behavior and segment customers using machine learning methods are presented. The features of the application of artificial intelligence in such large companies as Amazon, Walmart, OZON and Netflix are analyzed, where it allows improving the accuracy of forecasts and automating decision-making processes. It is proposed to use natural language processing methods and neural networks to automatically generate advertising descriptions of goods, which helps to increase the effectiveness of marketing strategies and reduce costs.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, automation, e-commerce, classification, regression, cluster analysis, natural language processing, personalization, forecasting.

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

For citation. Piskun E. S., Nuansengsy D. V., Kotsko E. N. (2024) Optimization of Business Processes in E-Commerce Using Artificial Intelligence Methods and Algorithms. *Doklady BGUIR*. 22 (6), 103–111. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-6-103-111> (in Russian).

Введение

Искусственный интеллект (ИИ) играет ключевую роль в трансформации электронной коммерции, выступая инструментом к автоматизации множества бизнес-процессов. С увеличением объема данных и потребностью в глубоком анализе поведения пользователей ИИ стал незаменимым инструментом для повышения эффективности таких процессов, как персонализация взаимодействия с клиентами, управление запасами и создание рекомендательных систем.

Трансформационные процессы, вызванные активным развитием ИИ и его применением, провоцируют значительные финансовые расходы. Также потребности ИИ в финансовых вложениях прогнозируются к росту: к 2028 г. расходы составят 632 млрд долл., из них на долю США совокупные расходы прогнозируются в размере 336 млрд долл., а для Западной Европы – около 108 млрд долл. В значительной мере (примерно 20 % совокупного объема) рост финансирования ИИ будет иметь место для финансовых систем, розничной торговли и информационных сервисов [1].

Благодаря ИИ компании могут прогнозировать поведение пользователей, управлять логистикой и эффективно обрабатывать большие объемы данных, что позволяет улучшать точность таргетинга и персонализации контента. Организации, активно внедряющие ИИ, фиксируют не только рост эффективности, но и снижение издержек, а также повышение уровня удовлетворенности клиентов.

Исследования от Adlucent показывают, что более 71 % пользователей предпочитают персонализированные предложения, что подтверждает важность использования ИИ для улучшения взаимодействия с клиентами [2]. Алгоритмы машинного и глубокого обучения помогают анализировать предпочтения клиентов и предлагать им наиболее релевантные товары, а также предсказывать их поведение на основе данных о прошлых покупках. Это открывает новые возможности для маркетинга и продаж.

Стоит отметить, что ИИ не представляет собой отдельную технологию, а включает в себя различные методы и алгоритмы, которые тесно взаимодействуют для решения задач. Например, машинное и глубокое обучение позволяет обрабатывать большие объемы данных и строить прогнозы, а такие методы, как обработка естественного языка (NLP) и кластерный анализ, являются важными элементами для построения эффективных бизнес-стратегий в электронной коммерции. Таким образом, комплексный подход к применению ИИ способствует автоматизации множества процессов, начиная с анализа данных и заканчивая созданием персонализированных рекламных предложений.

В статье исследованы методы и алгоритмы ИИ, которые направлены на автоматизацию процессов создания рекламных стратегий и описаний товаров в электронной коммерции. Проведен анализ различных подходов к сегментации клиентов, а также генерации персонализированных текстов и рекомендаций с использованием методов машинного обучения и обработки NLP. В рамках исследования выполнен сравнительный анализ двух наиболее используемых алгоритмов кластеризации – K-means (кластеризация происходит на основе алгоритма разбиения векторного пространства на заранее определенное число кластеров) и DBSCAN (применяется для поиска базовых выборок с высокой плотностью для расширения кластеров) – по таким критериям, как точность, быстродействие и качество сгенерированных решений, что позволило оценить их практическую применимость.

Алгоритмы машинного обучения в электронной коммерции

Основными инструментами ИИ для анализа данных и оптимизации процессов являются алгоритмы машинного обучения, которые играют ключевую роль в электронной коммерции, пре-

доставляя компаниям возможность анализировать большие объемы данных и предлагать клиентам более релевантные продукты и услуги. Применение машинного обучения включает использование классификации, регрессии, кластерного анализа и глубокого обучения [3–6].

Классификационные алгоритмы играют важную роль в разделении клиентской базы на группы по поведению и предпочтениям. Это помогает компаниям прогнозировать поведение клиентов, например, кто с наибольшей вероятностью завершит покупку или, наоборот, откажется от нее на этапе добавления товаров в корзину. Такие методы, как логистическая регрессия и алгоритмы принятия решений, помогают точно прогнозировать вероятностные исходы различных действий клиентов.

В качестве примера практического использования алгоритмов классификации можно рассмотреть компанию Amazon, которая широко применяет их для прогнозирования поведения своих клиентов. Модели на основе логистической регрессии помогают Amazon определить вероятность покупки того или иного товара, опираясь на такие факторы, как история посещений сайта, демографические данные клиентов и их предыдущие покупки [3]. Это позволяет более точно нацеливать персонализированные предложения на конкретные сегменты потребителей, что, в свою очередь, способствует росту конверсии.

Регрессионные методы тоже находят свое применение в прогнозировании числовых показателей, например, предполагаемого дохода от клиента или средней суммы чека. Линейная регрессия помогает устанавливать зависимости между различными параметрами, такими как расходы клиентов и временные промежутки. С ее помощью можно предсказать, сколько средств клиент потратит в следующем месяце, что позволяет точнее планировать маркетинговые стратегии. На практике линейная регрессия широко применяется в компании Walmart для прогнозирования спроса на товары. Модель анализирует данные о продажах за прошедшие периоды и на основе этих данных предсказывает будущие объемы продаж. Такой подход помогает компании более эффективно управлять запасами на складах, избегая избыточного хранения или недостатка товаров.

Кластерный анализ широко применяется для сегментации пользователей на группы со схожими предпочтениями и моделями поведения. Один из наиболее популярных методов – алгоритм K-means, при помощи которого клиенты разбиваются на группы исходя из их покупательской активности и взаимодействий с платформой. Это позволяет компаниям улучшить персонализацию предложений и повысить точность таргетинга, что способствует предложению максимально релевантных товаров и услуг. В компании OZON активно используется кластерный анализ для разделения своей клиентской базы на сегменты в зависимости от покупательской активности. Этот подход дает возможность эффективно планировать маркетинговые кампании, направляя их на определенные группы клиентов с учетом их потребностей. Таким образом, сегментация способствует увеличению среднего чека и повышению вовлеченности пользователей.

Методы глубокого обучения, основанные на работе нейронных сетей, особенно полезны для анализа сложных и многомерных данных. Они оказываются незаменимыми при разработке рекомендательных систем и для анализа мультимодальных данных, таких как изображения, текст и другие типы информации. В частности, в компании Netflix нейронные сети глубокого обучения используются для формирования рекомендаций контента. В электронной коммерции такой подход позволяет анализировать множество параметров, связанных с поведением пользователей, и предлагать наиболее подходящие товары на основе их предыдущих действий и интересов.

Обзор существующих инструментов искусственного интеллекта в электронной коммерции

Крупнейшие игроки электронной коммерции уже активно применяют технологии искусственного интеллекта для решения различных бизнес-задач. Для понимания широкого практического использования ИИ приведем примеры его инструментов в электронной коммерции.

Одним из лидеров в применении ИИ является Amazon, который успешно интегрировал ИИ в свои ключевые бизнес-процессы. Сервис Amazon Personalize позволяет создавать персонализированные рекомендации для пользователей на основе их поведения. Personalize использует алгоритмы коллаборативной фильтрации и машинного обучения, что помогает Amazon генерировать уникальные предложения для каждого клиента. Например, система рекомендаций увеличивает вероятность покупки на 15 %. Инструмент Amazon Forecast применяется для прогнозирования

спроса на товары, использует временные ряды для анализа и предсказания будущего спроса. Благодаря Forecast компания может заранее подготовиться к пиковым нагрузкам и предотвратить дефицит товаров [6]. Автоматизация складских процессов в Amazon представлена в виде внедрения роботов, управляемых искусственным интеллектом, для автоматизации операций сбора и упаковки товаров. Это нововведение значительно сократило время обработки заказов и снизило затраты на логистику [7].

Wildberries также активно использует ИИ для оптимизации процессов на своей платформе. Wildberries применяет гибридные рекомендательные системы, которые сочетают коллаборативную и контентную фильтрацию. Это позволяет предложить пользователям товары исходя из их предыдущих покупок и интересов и увеличивает конверсию и время, проведенное на сайте. Также Wildberries использует ИИ для анализа исторических данных и текущих трендов с целью предсказания спроса на товары, что дает возможность более эффективно управлять запасами и улучшать логистику.

AliExpress внедряет ИИ для повышения качества обслуживания и улучшения логистических процессов. Чат-бот AliMe на базе ИИ помогает пользователям находить товары и отвечает на их вопросы в режиме реального времени. Используя обработку NLP, AliMe повышает качество клиентского обслуживания [8].

Логистическая платформа Cainiao Smart Logistics применяет ИИ для оптимизации доставки товаров. Cainiao анализирует данные, такие как время доставки и загруженность дорог, чтобы находить наиболее эффективные маршруты [9].

Экспериментальная часть

В процессе экспериментальных исследований проведена оценка эффективности использования алгоритмов кластеризации и автоматической генерации рекламных текстов с применением методов машинного обучения. Для этого были выбраны два широко известных алгоритма кластеризации – K-means и DBSCAN. Кроме того, для генерации текстов использовалась языковая модель Meta Llama 3 [10], которая автоматически создавала рекламные описания товаров.

Цель эксперимента заключалась в сравнении эффективности данных алгоритмов по таким параметрам, как точность сегментации, скорость выполнения и качество создаваемых текстов. В рамках исследования изучалось, как алгоритмы, основанные на ИИ, могут быть использованы для сегментации клиентской базы и автоматизации процесса генерации рекламных текстов. Особое внимание было уделено интеграции методов машинного обучения и обработки NLP для решения задач персонализации в электронной коммерции. Протестированы алгоритмы кластеризации и языковые модели, что позволило провести комплексную оценку потенциала ИИ в этой области.

Исходный набор данных

Для успешного применения ИИ важно иметь точный и разнообразный набор данных для качественной работы алгоритма машинного обучения. Наиболее часто используемый для анализа набор представлен данными о транзакциях и включает следующие параметры:

- InvoiceNo – уникальный номер счета-фактуры;
- StockCode – код товара;
- Description – описание товара;
- Quantity – количество единиц товара;
- InvoiceDate – дата транзакции;
- UnitPrice – цена за единицу товара;
- CustomerID – уникальный идентификатор клиента;
- Country – страна покупателя.

Эти данные не только служат основой для проведения кластерного анализа, но и позволяют ИИ-моделям обучаться на исторической информации для более точных прогнозов и рекомендаций. На основании вышеприведенных параметров был рассчитан дополнительный показатель – TotalPrice (сумма транзакции), который использовался для кластерного анализа и определялся как произведение Quantity (количества проданных товаров) на UnitPrice (цену за единицу товара).

Сегментация клиентов на основе алгоритмов K-means и DBSCAN

Алгоритм K-means был выбран для выполнения задачи сегментации клиентов на основе данных об их покупательской активности. Основной принцип работы этого алгоритма заключается в минимизации расстояний между объектами внутри каждого кластера, что позволяет группировать клиентов с похожими поведенческими характеристиками. Такой подход помогает формировать компактные группы, в которых клиенты демонстрируют схожие модели покупок. Для настройки работы алгоритма применялись следующие параметры:

- количество кластеров: 4 (подобрано эмпирическим методом для сегментирования клиентов на группы с различными покупательскими привычками);
- начальное распределение центров кластеров: случайное;
- критерий останова: прекращение итераций при минимальных изменениях в позициях центров кластеров.

Программный код для реализации алгоритма K-means приведен в Листинге 1.

Листинг 1 – Программный код для кластеризации по алгоритму K-means

```
# K-Means кластеризация
kmeans = KMeans(n_clusters=4, random_state=42)
X['KMeansCluster'] = kmeans.fit_predict(X[['TotalPrice', 'Quantity']])
# Оценка качества кластеризации с помощью силуэтного коэффициента
kmeans_silhouette = silhouette_score(X[['TotalPrice', 'Quantity']], X['KMeansCluster'])
print(f"Оценка силуэта для K-Means: {kmeans_silhouette:.3f}")
```

Для оценки качества кластеризации использовали силуэтный коэффициент, который позволяет измерить степень разделения кластеров и их удаленность друг от друга. Для алгоритма K-means данный показатель составил 0,931, что свидетельствует о высоком уровне отделимости групп клиентов и хорошей кластеризации данных.

Алгоритм DBSCAN использовался для сегментирования данных, опираясь на плотность точек. Данный метод отлично подходит для работы с неравномерно распределенными данными, поскольку позволяет выделять кластеры различной плотности и эффективно выявлять выбросы. Для настройки алгоритма задавались следующие ключевые параметры:

- eps (максимальное расстояние между точками, при котором они будут объединены в один кластер): 1000;
- min_samples (минимальное количество точек, требуемое для создания плотного кластера): 5.

Код для реализации алгоритма DBSCAN приведен в Листинге 2.

Листинг 2 – Программный код для кластеризации по алгоритму DBSCAN

```
# DBSCAN кластеризация
dbscan = DBSCAN(eps=1000, min_samples=5)
X['DBSCANCluster'] = dbscan.fit_predict(X[['TotalPrice', 'Quantity']])
# Оценка качества кластеризации с помощью силуэтного коэффициента
if len(set(X['DBSCANCluster'])) > 1:
    dbscan_silhouette = silhouette_score(X[['TotalPrice', 'Quantity']], X['DBSCANCluster'])
else:
    dbscan_silhouette = -1
print(f"Оценка силуэта для DBSCAN: {dbscan_silhouette:.3f}")
```

Для визуализации результатов работы алгоритмов были созданы графики (рис. 1), на которых клиенты представлены в пространстве признаков Total Price и Quantity. Графики наглядно демонстрируют распределение клиентов алгоритмами K-means и DBSCAN по кластерам и то, как алгоритмы распределяют данные по кластерам с учетом плотности точек.

На рис. 1 можно наблюдать четко разграниченные группы клиентов, что свидетельствует об эффективности данного метода для сегментации пользователей на основе их покупательской активности. Разделение по группам выполнено таким образом, чтобы клиенты с похожим поведением оказались в одном кластере, что помогает более точно таргетировать предложения. Следует отметить, что качество кластеризации алгоритмом DBSCAN оказалось значительно ниже

по сравнению с K-means (силуэтный коэффициент составил $-0,02$, что указывает на недостаточное качество сегментации), что обусловлено недостаточной плотностью данных для четкого разделения групп. Фрагмент кода, реализующий отображение графиков на рис. 1, представлен на Листинге 3.

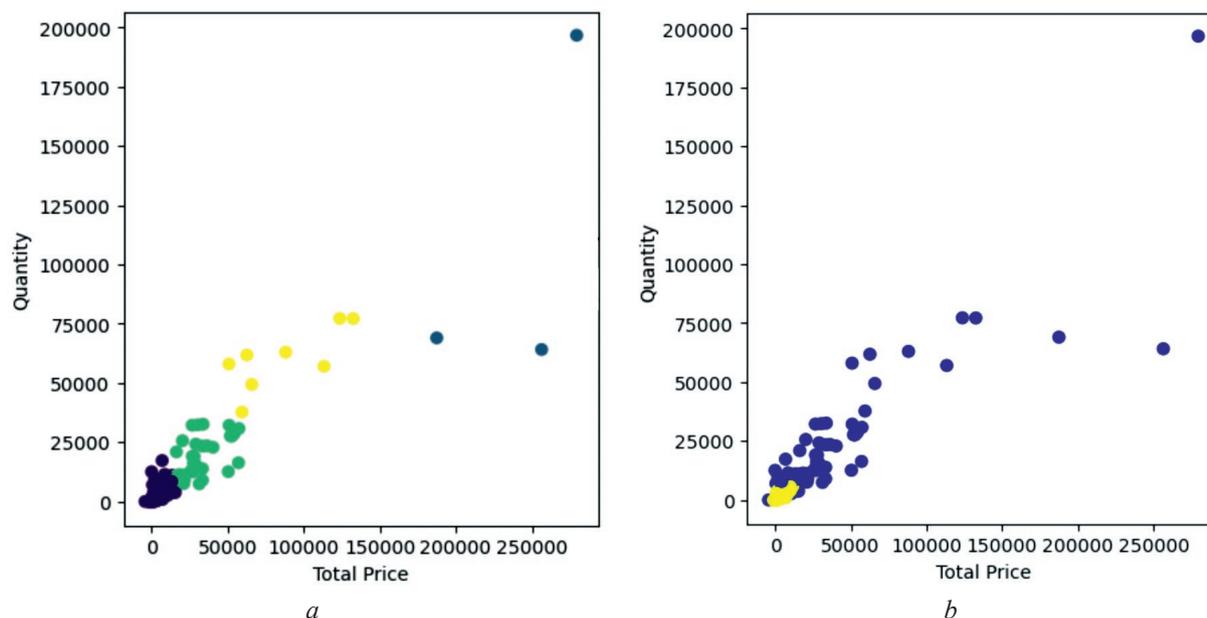


Рис. 1. Сегментация покупателей с использованием алгоритмов K-means (a) и DBSCAN (b)
Fig. 1. Customer segmentation using K-means (a) and DBSCAN (b) algorithms

Листинг 3 – Программный код для визуализации кластеров для алгоритмов K-means и DBSCAN

Визуализация кластеров для K-Means и DBSCAN

plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.subplot(1, 2, 1)

plt.scatter(X['TotalPrice'], X['Quantity'], c=X['KMeansCluster'], cmap='viridis')

plt.title(f"KMeans (Оценка силуэта: {kmeans_silhouette:.3f})")

plt.xlabel('Total Price')

plt.ylabel('Quantity')

plt.subplot(1, 2, 2)

plt.scatter(X['TotalPrice'], X['Quantity'], c=X['DBSCANCluster'], cmap='plasma')

plt.title(f"DBSCAN (Оценка силуэта: {dbscan_silhouette:.3f})")

plt.xlabel('Total Price')

plt.ylabel('Quantity')

plt.show()

Генерация рекламных текстов

Для автоматической генерации рекламных описаний товаров использовалась языковая модель Meta Llama 3, которая создавала персонализированные тексты для различных клиентских сегментов. Процесс разработки текстов состоял из следующих этапов:

- 1) классификация клиентов по кластерам, полученным на основе данных о сегментации;
- 2) применение модели Meta Llama 3 для генерации текстов с учетом специфики поведения каждой группы клиентов.

Для каждого сегмента был создан отдельный сценарий генерации рекламных описаний. Так, для премиум-клиентов делался акцент на уникальность и высокое качество продукции, в то время как для сегмента экономных покупателей упор был сделан на выгодные предложения и скидки.

Процесс создания рекламных текстов для различных клиентских сегментов основывался на том, что для каждого кластера разрабатывались отдельные маркетинговые стратегии, которые учитывали уникальные интересы и потребности каждой группы. Основные сегменты клиентов и их особенности:

– премиум-клиенты: в данном сегменте основной акцент сделан на уникальность и высокое качество товаров. В текстах используются формулировки, которые подчеркивают эксклюзивность и премиальный статус продукта, например, «уникальный дизайн», «высококачественные материалы», «ограниченный выпуск»;

– экономные клиенты: важным фактором в этом сегменте являются скидки и выгодные предложения. Маркетинговые сообщения фокусируются на таких аспектах, как «выгодные предложения», «специальные скидки» и «экономия при покупке»;

– средний класс: клиенты интересуются товарами, которые сочетают в себе качество и доступность. В текстах делается акцент на сбалансированное соотношение цены и качества с выделением практичности продукции;

– редкие покупатели: для данного сегмента создаются предложения, которые мотивируют их вернуться. Тексты ориентированы на специальные акции и эксклюзивные предложения, чтобы привлечь внимание этого сегмента.

Для автоматической генерации рекламных описаний товаров была разработана функция, которая в качестве входных данных принимает название продукта и идентификатор сегмента клиента. В зависимости от сегмента выбирается соответствующий сценарий генерации, после чего модель Meta Llama 3 создает уникальный текст, адаптированный под нужды конкретной группы клиентов. Код реализации функции приведен в Листинге 4.

Листинг 4 – Программный код для генерации рекламного текста для группы клиентов

```
def generate_ad_for_segment(product_name, segment):
```

```
    # Определение сценариев для каждого клиентского сегмента
```

```
    segment_prompts = {
```

```
        0: «премиальных клиентов. Подчеркнуть уникальность и высокое качество.»,
```

```
        1: «экономных клиентов. Сделать акцент на выгодных предложениях.»,
```

```
        2: «клиентов среднего класса. Упомянуть баланс между качеством и ценой.»,
```

```
        3: «редких покупателей. Предложить специальные акции для возвращения клиентов.»
```

```
    }
```

```
    # Создание текстового запроса для модели на основе выбранного сценария
```

```
    prompt = (
```

```
        f“Сгенерировать рекламное описание товара для {segment_prompts[segment]}.”
```

```
        f“Товар: {product_name}. Описание должно быть кратким и эффективным.”
```

```
    )
```

```
    # Вызов модели Meta Llama 3 для генерации текста
```

```
    chat_completion = client.chat.completions.create(
```

```
        messages=[
```

```
            {
```

```
                “role”: “user”,
```

```
                “content”: prompt,
```

```
            }
```

```
        ],
```

```
        model=“Llama3-8b-8192”,
```

```
        max_tokens=150, # Ограничение на количество токенов
```

```
        temperature=0.7 # Контроль разнообразия генерируемого текста
```

```
    )
```

```
    # Возвращение сгенерированного текста
```

```
    return chat_completion.choices[0].message.content.strip()
```

Для демонстрации работы функции генерации рекламных описаний использовался тестовый набор данных, включающий несколько товаров и сегментов клиентов. Уникальные рекламные тексты создавались для каждого продукта исходя из того, к какому кластеру принадлежал клиент. Таким образом, тексты были адаптированы под различные клиентские сегменты с учетом их потребностей и предпочтений. Код реализации функции представлен на Листинге 5.

Листинг 5 – Программный код для отображения тестового набора данных

```
# Пример использования функции для нескольких товаров
test_data = data[['CustomerID', 'StockCode', 'Description']].head()
test_data = test_data.merge(X[['CustomerID', 'KMeansCluster']], on='CustomerID')
# Генерация рекламного описания
test_data['GeneratedAd'] = test_data.apply(
    lambda row: generate_ad_for_segment(row['Description'], row['KMeansCluster']), axis=1
)
# Вывод нескольких примеров
for index, row in test_data.iterrows():
    print(f"\n--- Рекламное описание для {row['StockCode']} ---\n")
    print(f"Товар: {row['Description']}\n\nРекламное описание: {row['GeneratedAd']}")
```

Рекламные тексты, сгенерированные для каждого клиентского сегмента, адаптировались под их специфические потребности и ожидания. Для премиального сегмента основное внимание обращалось на уникальность и высокое качество товаров для привлечения внимания этой группы клиентов. В то же время для экономного сегмента акцент делался на выгодные предложения и скидки, что соответствует ожиданиям клиентов, стремящихся минимизировать свои расходы. Пример сгенерированного рекламного текста для премиальных клиентов приведен в Листинге 6.

Листинг 6 – Сгенерированный текст для премиальных клиентов

Товар: *WHITE HANGING HEART T-LIGHT HOLDER*

Рекламное описание: представляем *WHITE HANGING HEART T-LIGHT HOLDER* – идеальное решение для создания уютной и элегантной атмосферы. Это изделие, выполненное из высококачественных материалов, станет изысканным дополнением вашего интерьера. Подарите себе или своим близким частичку роскоши.

Заключение

1. Использование алгоритмов кластеризации, таких как K-means и DBSCAN, позволило сегментировать клиентов на основе их покупательской активности, это стало основой для достаточно точной персонализации предложений. K-means продемонстрировал более качественную кластеризацию, что подтверждается высокими значениями силуэтного коэффициента. Алгоритм DBSCAN, напротив, показал меньшую эффективность для данной задачи, скорее всего, из-за особенностей распределения данных.

2. Реализована автоматическая генерация рекламных описаний с использованием языковой модели Meta Llama 3. Для каждого сегмента клиентов создавались уникальные рекламные тексты, что позволяет компаниям значительно экономить время на подготовку маркетинговых материалов и одновременно улучшать качество взаимодействия с разными категориями клиентов. В зависимости от сегмента тексты либо акцентировали внимание на эксклюзивности и высоком качестве товаров, либо делали упор на выгодные предложения и скидки, что обеспечивает более точное таргетирование рекламных кампаний.

3. Интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения в ключевые сферы электронной коммерции, такие как сегментация клиентов и генерация рекламных описаний, открывает новые возможности для оптимизации бизнес-процессов. Предложенные в статье подходы позволяют повысить эффективность рекламных стратегий, улучшить персонализацию контента и взаимодействие с клиентами. Внедрение искусственного интеллекта становится важным условием для поддержания конкурентоспособности компаний на рынке электронной коммерции, особенно в условиях растущей конкуренции и увеличения объемов данных.

Список литературы / References

1. *Worldwide Spending on Artificial Intelligence Forecast to Reach \$632 Billion in 2028, According to a New IDC Spending Guide*. Available: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS52530724> (Accessed 9 October 2024).
2. *Content Personalization: The Key to Your Audience's Heart*. Available: <https://svetak.ru/blog/personalizatsiya-kontenta-klyuch-k-serdtsu-vashey-auditorii> (Accessed 9 October 2024) (in Russian).
3. Hosmer D. W., Lemeshow S., Sturdivant R. X. (2013) Applied Logistic Regression. *John Wiley & Sons*. 398 (56), 38–60.

4. Shah H., Rust R. T., Staelin R. (2018) Machine Learning in Marketing. *Journal of Marketing*. 221 (56), 1–18.
5. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. (2015) Introduction to Linear Regression Analysis. *John Wiley & Sons*. 124 (22), 44–56.
6. *Amazon Personalize Documentation*. Available: <https://docs.aws.amazon.com/personalize> (Accessed 1 October 2024).
7. *How Amazon's Robotics Are Reshaping the Supply Chain*. Available: <https://supplychaindigital.com/digital-supply-chain/amazon-warehouse-automation-ai-revolution> (Accessed 1 October 2024).
8. *AliMe: Enhancing Customer Experience with AI*. Available: <https://www.aillabs.global/blog/enhancing-customer-experience-with-ai> (Accessed 9 October 2024).
9. *Cainiao Smart Logistics*. Available: <https://www.cainiao.com/en/index.html> (Accessed 9 October 2024).
10. *Introducing Meta Llama 3: The Most Capable Openly Available LLM to Date*. Available: <https://ai.meta.com/blog/meta-llama-3/> (Accessed 9 October 2024).

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Пискун Е. С., канд. экон. наук, доц. каф. проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Нуансенгси Д. В., магистрант каф. проектирования информационно-компьютерных систем, БГУИР

Котько Е. Н., магистрант каф. проектирования информационно-компьютерных систем, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 292-20-80
E-mail: e.piskun@bsuir.by
Пискун Екатерина Сергеевна

Information about the authors

Piskun E. S., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Design Information and Computer Systems, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Nuansengsy D. V., Master's Student at the Department of Design Information and Computer Systems, BSUIR

Kotsko E. N., Master's Student at the Department of Design Information and Computer Systems, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 292-20-80
E-mail: e.piskun@bsuir.by
Piskun Ekaterina Sergeevna

