

ДОКЛАДЫ БГУИР

Том 24, № 3, 2026

Научный журнал выходит шесть раз в год

Учредитель

Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Журнал включен в Перечень ВАК Республики Беларусь, а также в базы данных:
CNKI, Dimensions, DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, НЭБ «КиберЛенинка», РИНЦ

СОДЕРЖАНИЕ

Дворников О. В., Чеховский В. А., Кунц А. В., Галкин Я. Д., Чичин И. И. Полузаказная микросхема зарядочувствительного усилителя-формирователя с выходом на оптическую линию связи	5
Лобанок М. В., Чижов И. В., Павлышко М. А., Потоцкий А. С. Электрофизические характеристики сенсоров температуры и влажности на основе углеродсодержащего PLA-пластика	14
Лопатченко А. С., Малевич И. Ю. Метод компенсации мешающих отражений в ЛЧМ радиолокационном обнаружителе малозаглубленных объектов	21
Ayad H., Swissi S., Madi R., Alhatab R. Using a Microstrip Antenna to Detect Breast Cancer (Айад Х., Свисси С., Мад Р., Альхатаб Р. Использование микрополосковой антенны для обнаружения рака молочной железы)	29
Максимов С. Е., Шапошников В. Л., Борисенко В. Е. Оптические свойства композитов из полиметилметакрилата и полиэтилена с микронными частицами графитоподобного нитрида углерода	36
Логунов К. Т., Михолап А. А. Влияние режимов очистки в высокоплотной плазме аргона на морфологию и свойства поверхности подложек монокристаллического кремния	44
Ковальчук Н. С., Демидович С. А., Власукова Л. А., Пархоменко И. Н. Синтез пленок нитрида кремния с улучшенными механическими и химическими свойствами методом ICPCVD	52
Мироненко О. С., Бойправ О. В., Мокеров В. С., Лыньков Л. М. Гибкие электромагнитные экраны СВЧ-диапазона на основе графитовых смазок	61
Николаенко Е. А., Шалькевич П. К. Физически информированная нейронная сеть для решения уравнения конвективной диффузии в природных дисперсных средах	69
Kurachka K., Wang Xuemei, Ren Huanhai. Intelligent CT Image Analysis Algorithm for 3D Model Construction (Курочка К. С., Ванг С., Рен Х. Алгоритм интеллектуального анализа КТ-изображений для построения 3D-модели)	77
Dubovsky V., Savchenko V. An Approach to Transfer of Control Between Automated Vehicle and Driver (Дубовский В. А., Савченко В. В. Подход к смене режима вождения в автоматизированном транспортном средстве)	85

**Главный редактор
Вадим Анатольевич Богуш,**

д. ф.-м. н., профессор, ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Редакционная коллегия

Лыньков Л. М., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – заместитель главного редактора

Стемпницкий В. Р., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – заместитель главного редактора

Бойправ О. В., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – ответственный секретарь редколлегии

Батура М. П., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Борисенко В. Е., д. ф.-м. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Гасанов М. Г., д. т. н., профессор, Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Козлов С. В., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Лабунув В. А., акад. НАН Беларуси, д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Писецкий Ю. В., д. т. н., доцент, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми, Ташкент, Узбекистан

Сигов А. С., акад. РАН, д. ф.-м. н., профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Смирнов А. Г., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Татур М. М., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Цветков В. Ю., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Ответственный секретарь А. Л. Потеев

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь, рег. номер 1087

Журнал издается с 2003 г. Дата последней перерегистрации 23 января 2010 г.

Индекс для индивидуальной подписки 00787, для ведомственной – 007872.

Подписано в печать 09.06.2026. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 10,93. Уч.-изд. л 9,1. Тираж 71 экз. Заказ 86.

Адрес редакции:
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, ком. 329а
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

DOKLADY BGUIR

V. 24, No 3, 2026

The scientific journal is published 6 times a year

Founder

Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”

The Journal is included in the List of Scientific Editions in the Republic of Belarus,
as well as the following databases:

CNKI, Dimensions, DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, CyberLeninka, RSCI

CONTENTS

Dvornikov O., Tchekhovski V., Kunts A., Galkin Y., Chichin I. Semi-Custom Microcircuit of Charge-Sensitive Amplifier-Shaper with Output on Optical Communication Line	5
Lobanok M., Chizhov I., Paulyshka M., Pototsky A. Electrophysical Characteristics of Temperature and Humidity Sensors Based on Carbon-Containing PLA Plastic	14
Lopatchenko A., Malevich I. Method of Compensation of Interfering Reflections in a FMCW Radar Detector of Shallow Objects.....	21
Ayad H., Swissi S., Madi R., Alhatab R. Using a Microstrip Antenna to Detect Breast Cancer....	29
Maksimov S., Shaposhnikov V., Borisenko V. Optical Properties of Composites of Polymethylmethacrylate and Polyethylene with Micron Particles of Graphitic Carbon Nitride ..	36
Logunov K., Mikholap A. The Influence of Cleaning Parameters in High-Density Argon Plasma on the Morphology and Surface Properties of Monocrystalline Silicon Substrates	44
Koval'chuk N., Demidovich S., Vlasukova L., Parkhomenko I. Synthesis of Silicon Nitride Films with Improved Mechanical and Chemical Properties by ICPCVD Method.....	52
Mironenko O., Boiprav O., Mokerov V., Lynkou L. Flexible Microwave Electromagnetic Shields Based on Graphite Lubricants.....	61
Nikolaenko E., Shalkevich P. A Physically Informed Neural Network for Solving the Convective Diffusion Equation in Natural Dispersed Media.....	69
Kurachka K., Wang Xuemei, Ren Huanhai. Intelligent CT Image Analysis Algorithm for 3D Model Construction	77
Dubovsky V., Savchenko V. An Approach to Transfer of Control Between Automated Vehicle and Driver.....	85

Editor-in-Chief

Vadim A. Bogush, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor,
Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Editorial Board

Leonid M. Lynkov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Deputy Editor-in-Chief

Viktor R. Stempitsky, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Deputy Editor-in-Chief

Olga V. Boiprav, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Responsible Secretary of the Editorial Board

Mikhail P. Batura, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Victor E. Borisenko, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Mehman H. Hasanov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Sergei V. Kozlov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Vladimir A. Labunov, Acad. of the NAS of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Yuri V. Pisetsky, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

Alexander S. Sigov, Acad. of the RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Alexander G. Smirnov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Mikhail M. Tatur, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Viktor Yu. Tsvetkov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Responsible Secretary A. Patseyeu

The journal is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus, Reg. No 1087.

The journal has been published since 2003. Last re-registration date January 23, 2010.

Index for individual subscription 00787, for departmental – 007872.

Signed for printing 09.06.2026. Format 60×84 ¼. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.

Ed.-pr. l. 10,93. Ed.-ed. l. 9,1. Edition 71 copies. Order 86.

Editorial address

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

6, P. Brovki St., Room 329a, 220013, Minsk

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.

6, P. Brovki St., 220013, Minsk



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-5-13>

УДК 621.382.322

ПОЛУЗАКАЗНАЯ МИКРОСХЕМА ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ-ФОРМИРОВАТЕЛЯ С ВЫХОДОМ НА ОПТИЧЕСКУЮ ЛИНИЮ СВЯЗИ

О. В. ДВОРНИКОВ¹, В. А. ЧЕХОВСКИЙ², А. В. КУНЦ², Я. Д. ГАЛКИН², И. И. ЧИЧИН²

¹ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
(Минск, Республика Беларусь)

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье рассмотрены конструктивные и схемотехнические особенности устройства считывания сигналов время-проекционной камеры многоцелевого детектора для установки ионного коллайдера на базе нуклотрона. Приведены электрические принципиальные схемы, результаты схемотехнического моделирования и упрощенный чертеж топологии для базового матричного кристалла МН2ХА031. Разработанное устройство считывания сигналов позволяет в широком диапазоне варьировать основные параметры. Так, изменением номинала одного внешнего конденсатора от 5 до 100 пФ обеспечивается соответственно изменение длительности выходного импульса на половине его высоты в диапазоне от 150 до 370 нс и эквивалентного шумового заряда от 2130 до 1570 электронов.

Ключевые слова: ядерная электроника, зарядочувствительный усилитель-формирователь, базовый матричный кристалл, полевой транзистор, считывающая электроника.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Полуказная микросхема зарядочувствительного усилителя-формирователя с выходом на оптическую линию связи / О. В. Дворников [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-5-13>.

SEMI-CUSTOM MICROCIRCUIT OF CHARGE-SENSITIVE AMPLIFIER-SHAPER WITH OUTPUT ON OPTICAL COMMUNICATION LINE

OLEG DVORNIKOV¹, VLADIMIR TCHEKHOVSKI², ALIAKSEI KUNTS²,
YAROSLAV GALKIN², IVAN CHICHIN²

¹JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute” (Minsk, Republic of Belarus)

²Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article discusses the design and circuitry features of the signal reading device of the time-projection chamber of the multi-purpose detector for the nuclotron based ion collider facility. Electrical schematic diagrams, circuit simulation results, and a simplified layout for the МН2ХА031 master slice array are presented. The developed signal readout device allows for a wide range of key parameter variations. For example, varying the value of one external capacitor from 5 to 100 pF provides a corresponding change in the output pulse width at half maximum from 150 to 370 ns and an equivalent noise charge from 2130 to 1570 electrons.

Keywords: nuclear electronics, charge-sensitive amplifier-shaper, master slice array, field-effect transistor, read-out electronics.

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

For citation. Dvornikov O., Tchekhovski V., Kunts A., Galkin Y., Chichin I. (2026) Semi-Custom Microcircuit of Charge-Sensitive Amplifier-Shaper with Output on Optical Communication Line. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-5-13> (in Russian).

Введение

Зарядочувствительные усилители (ЗЧУ) являются основным блоком ядерной электроники, преобразующим короткий токовый импульс детекторов частиц в «ступеньку» напряжения, достаточную для последующей обработки поступившего сигнала. Для улучшения отношения сигнал/шум и увеличения временного разрешения регистрирующей поступление частиц системы с выходом ЗЧУ соединяют полосовой фильтр, формирующий из «ступеньки» напряжения импульс, амплитуда которого пропорциональна величине заряда Q_{INP} на входе ЗЧУ и достигается в так называемое время пика T_p (peaking time). Такой полосовой фильтр в ядерной электронике называют формирователем (shaper), а при наличии дополнительного усиления сигнала – усилителем-формирователем (УФ). Методы схемотехнической оптимизации считывающей электроники, содержащей ЗЧУ и УФ, известны и включают [1–5]:

- выбор типа (MOS, JFET, VT) головного транзистора, непосредственно соединенного с детектором, в зависимости от емкости детектора C_D , требуемого времени T_p и уровня шумов, описываемого эквивалентным шумовым зарядом (equivalent noise charge, ENC);
- выбор размеров и рабочего тока (коллекторного I_C или стока I_D) головного транзистора;
- минимизацию вклада, вносимого в ENC всеми элементами ЗЧУ (за исключением головного транзистора) и УФ.

Современные разработки ЗЧУ и УФ, базирующиеся на использовании наиболее распространенных CMOS-технологических маршрутов с малыми проектными нормами (не более 180 нм [6–10]), прежде всего, направлены на уменьшение потребляемой мощности и площади кристалла, занимаемого считывающей электроникой. Такие считывающие системы разрабатываются как полностью заказные интегральные микросхемы, требуют больших временных и материальных затрат на проектирование и чаще всего предназначены для обработки сигналов конкретного детектора при заданных параметрах C_D , T_p и ENC.

На предварительных этапах создания экспериментальных установок, задача которых – изготовление макетов детекторов и уточнение методик обработки сигналов, апробацию новых схемотехнических решений считывающей электроники целесообразно проводить на базовых матричных кристаллах (БМК), предусматривая возможность регулировки режимов работы головных транзисторов и параметров ЗЧУ и УФ с помощью внешних элементов.

Цель статьи – рассмотрение результатов научных трудов по разработке на БМК МН2ХА031 полупроводникового кристалла, содержащего ЗЧУ, УФ и драйвер светодиода, для оптико-электронных устройств считывания сигналов время-проекционной камеры (time projection chamber, TPC) в установке MPD (Multi-Purpose Detector)¹ коллайдера NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility)².

Разработка электрической схемы

Проектирование осуществлялось для элементов БМК МН2ХА031, SPICE-модели (SPICE, simulation program with integrated circuit emphasis – симулятор электронных схем) которых учитывают воздействие флюенса нейтронов F_N на вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов и полевых транзисторов JFET с каналом p -типа (p -JFET) [11] с учетом следующих требований, предъявляемых к устройству считывания сигналов TPC:

- количество каналов – 1;
- состав – ЗЧУ, УФ, драйвер светодиода;
- конструктивное исполнение – бескорпусное, площадь кристалла менее 16 мм²;
- напряжение источников питания – ($\pm 3,5$) В;

¹ Технический проектный отчет MPD [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://nica.jinr.ru/files/mpd_tdr.htm.

² Установка ионных коллайдеров на базе Нуклотрона [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nica.jinr.ru/>.

- время «пика» выходного сигнала УФ – 100–500 нс;
- ENC при $C_D < 5$ пФ и $T_p = 100$ нс – менее 4000 электронов;
- сохранение работоспособности при воздействии флюенса нейтронов – менее 10^{11} н/см².

Разработанная схема устройства считывания сигналов, изображенная на рис. 1, состоит из расположенных на полупроводниковом кристалле входного (input block) и выходного (output block) блоков и внешних элементов, показанных вне пунктирных линий. Следует отметить, что в соответствии с правилами применяемой программы схемотехнического моделирования LTspice все узлы с одинаковым наименованием (Vcc, Vee, Vs) и шины «заземления» соединены между собой.

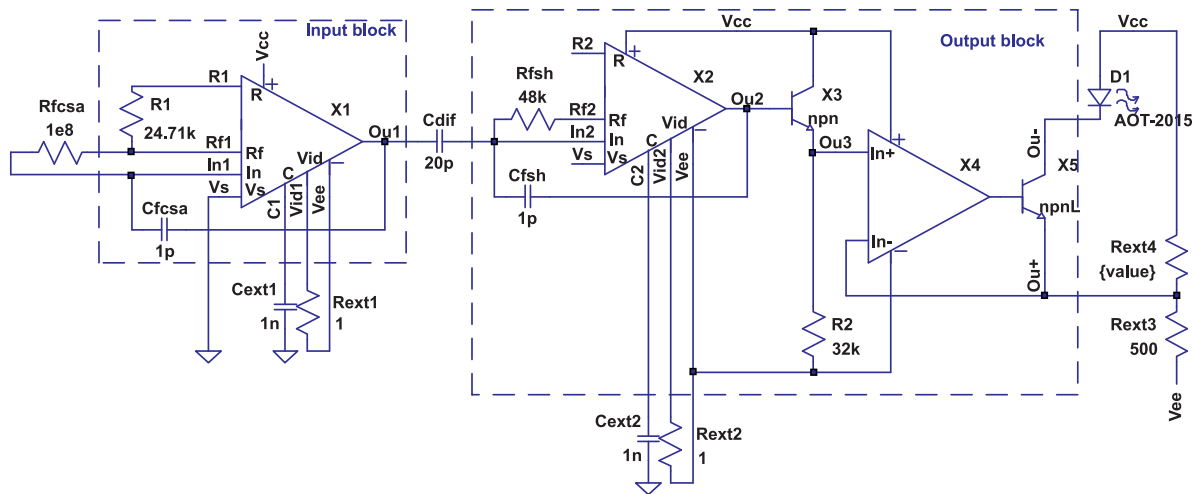


Рис. 1. Электрическая схема устройства считывания сигналов
Fig. 1. Electrical circuit of the readout system

Как ЗЧУ (X1), так и УФ (X2) (рис. 1) выполнены на основе инвертирующего усилителя напряжения с головным двухзатворным *p*-JFET XJ1 (рис. 2) с соединенными затворами. При необходимости со входом In (рис. 2) может быть соединен только верхний затвор Tg (top gate), обеспечивающий высокую крутизну g_m и малую емкость затвора-стока C_{GD} [12]. В этом случае нижний затвор Bg (bottom gate) рекомендуется соединить с истоком. Усилитель X4 на рис. 1 представляет собой простейший дифференциальный каскад с входными *n-p-n*-транзисторами и нагрузкой в виде токового зеркала на *p-n-p*. Для одноканального устройства допустимо применение внешних элементов, поэтому выбраны следующие конструктивные исполнения элементов на рис. 1: $C_{fcsa} = C_{fsh} = 1$ пФ – интегральные конденсаторы для обеспечения максимального коэффициента преобразования входного заряда в выходное напряжение K_{QV} и исключения влияния паразитных емкостей, возникающих при применении дискретных конденсаторов, на форму выходного импульса; $R_{fcsa} = 100$ МОм – внешний резистор для минимизации ENC; C_{dif} , C_{ext} – внешние дифференцирующий и фильтрующие конденсаторы.

Работа и параметрическая оптимизация инвертирующего усилителя подробно рассмотрены в [4], а режимы работы его транзисторов выбраны из следующих соображений:

- в качестве токозадающего элемента применялся *p*-JFET минимального размера XJ2, работающий в термостабильной точке при $I_D \approx 37$ мкА, в качестве головного элемента – один двухзатворный *p*-JFET с соединенными затворами при $I_D \approx 568$ мкА, что очень близко к его термостабильной точке $I_D \approx 624$ мкА. Точное задание термостабильного тока головного транзистора путем параллельного подключения к R7 дополнительных резисторов нецелесообразно в связи с невозможностью обеспечения требуемого значения тока стока при существующем технологическом разбросе параметров интегральных элементов;

- сопротивления всех эмиттерных резисторов обеспечивают падение напряжения на них около 200 мВ для увеличения допустимого выходного напряжения при ограниченном уровне напряжения питания;

- в схеме предусмотрена возможность варьирования режима работы. Так, изменение напряжения на выводе Vid или сопротивления внешнего резистора, соединяющего этот вывод с источ-

Таблица 1. Результаты моделирования параметров инвертирующего усилителя напряжения
Table 1. Results of circuit simulation the parameters of the inverting voltage amplifier

Наименование параметра	Значение параметра			
Напряжение на выводе Vid, В (или сопротивление резистора Rext1, кОм, при Vee = -3,5 В)	-2,1 (21,5)	-2,5 (4,6)	-3,5 (0)	-4,5
Ток стока головного <i>p</i> -JFET, мкА	29,66	183,5	567,9	1145
Постоянное выходное напряжение, мВ	804,6	452,1	9,291	-440,2
Коэффициент усиления напряжения	688,4	1687	2894	3974

Таблица 2. Результаты моделирования амплитуды импульса на выходе усилителя-формирователя (Ou2 на рис. 1) при $C_D = 5$ пФ

Table 2. Simulation results of the pulse amplitude at the output of the amplifier-shaper (Ou2 in Fig. 1) at $C_D = 5$ pF

Параметр	Значение параметра				
	5	10	30	50	100
Cdif, пФ	5	10	30	50	100
VOu2, мВ	329,6	628,26	1528,3	2105,6	2894,3
T_{sh} , нс	74,5	76,5	100,5	125,9	183,8
K_{QV} , мВ/фКл	3,306	6,28	15,28	21,06	28,94
ENC, электронов	2128,46	1942,28	1709,25	1629,29	1566,72

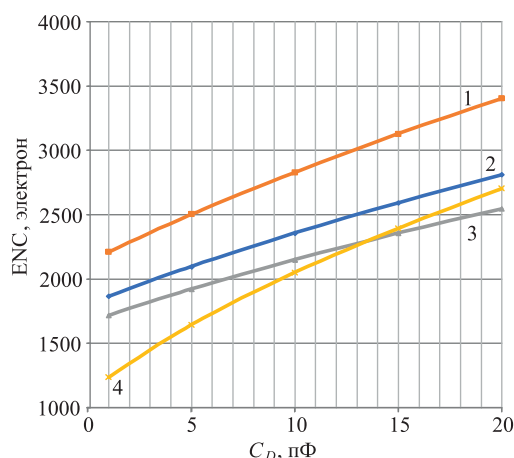


Рис. 3. Зависимость ENC зарядочувствительного усилителя от емкости детектора при I_D :
1 – 184 мкА; 2 – 568 мкА; 3 – 1,145 мА;
4 – 568 мкА (подключен только верхний затвор)

Fig. 3. Dependence of the ENC of the charge-sensitive amplifier on the detector capacitance at I_D :

1 – 184 μ A; 2 – 568 μ A; 3 – 1.145 mA;
4 – 568 μ A (only the top gate is connected)

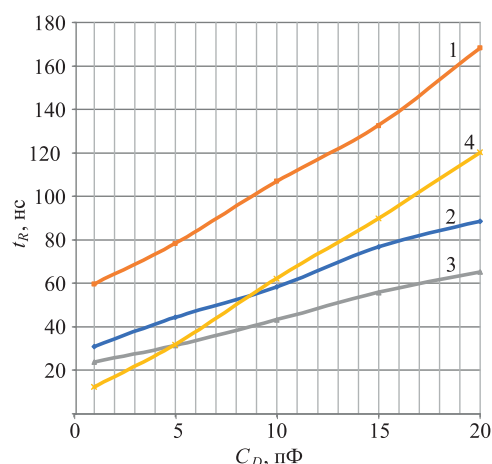


Рис. 4. Зависимость длительности переднего фронта выходного импульса зарядочувствительного усилителя от емкости детектора при I_D :
1 – 184 мкА;
2 – 568 мкА; 3 – 1,145 мА;
4 – 568 мкА (подключен только верхний затвор)

Fig. 4. Dependence of the duration of the leading edge of the charge-sensitive amplifier output pulse on the detector capacitance at I_D :

1 – 184 μ A; 2 – 568 μ A; 3 – 1.145 mA;
4 – 568 μ A (only the top gate is connected)

Анализ результатов моделирования позволяет сделать ряд выводов:

– изменением сопротивления резистора Rext1 в диапазоне от 21,5 кОм до 0 при напряжении $V_{ee} = -3,5$ В можно изменять ток стока головного *p*-JFET соответственно от 29,66 до 567,90 мкА, такой же результат можно достичь при $R_{ext1} = 0$ и напряжении на выводе Vid от (-2,1) до (-3,5) В;

– для увеличения тока стока головного *p*-JFET ориентировочно более 600 мкА рекомендуется соединить вывод Vid с источником напряжения Vee менее (-3,5) В. При этом надо учитывать, что ток стока приблизительно более 2 мА обеспечивается при прямом смещении *p-n*-перехода затвор-исток, при котором изменяется направление тока затвора и он может быть значительной величины (рис. 7);

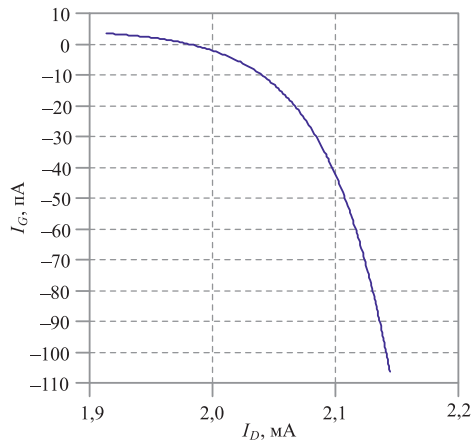


Рис. 5. Зависимость тока затвора головного p -JFET от тока стока
Fig. 5. Gate current of a head p -JFET as a function of drain current

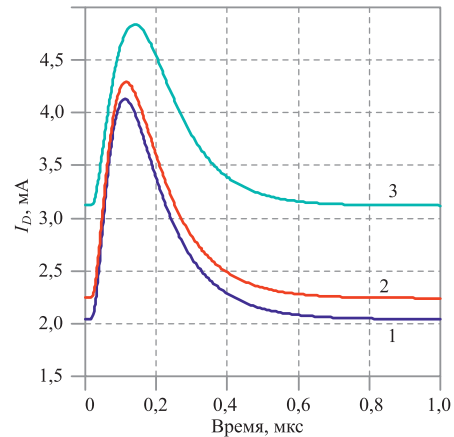


Рис. 6. Импульс тока через светодиод при $C_D = 5$ пФ, $Q_{\text{INP}} = 100$ фКл и флюенсе нейтронов F_N , н/см²:
1 – 1; 2 – 10^{13} ; 3 – $7 \cdot 10^{13}$
Fig. 6. Current pulse through LED at $C_D = 5$ pF, $Q_{\text{INP}} = 100$ fC and neutron fluence F_N , n/cm²:
1 – 1; 2 – 10^{13} ; 3 – $7 \cdot 10^{13}$

- наименьшим уровнем ENC (рис. 3, кривая 4) и длительности переднего фронта ЗЧУ t_R (рис. 4, кривая 4) при $C_D < 5$ пФ обладает ЗЧУ, в котором со входом соединен только один верхний затвор;
- ток потребления устройства считывания определяется в основном драйвером светодиода, причем максимальную величину импульса тока светодиода определяет сопротивление резистора Rext3, а ток потребления полупроводникового кристалла при отсутствии сигнала – Rext4;
- разработанное устройство считывания, без учета радиационного изменения характеристик светодиода и внешних элементов, обеспечивает незначительное изменение параметров при воздействии флюенса нейтронов до 10^{13} н/см² (рис. 6);
- разработанная электрическая схема устройства считывания (рис. 1) довольно универсальна, позволяет выбором внешних элементов изменять ток потребления, T_{sh} , ENC, а при отсутствии необходимости управления светодиодом – значительно уменьшить ток потребления, оставив «оборванными» выводы Ou+ и Ou– и используя в качестве выхода узел Ou2 с применением Rext2 = 10 кОм.

На двух макроячейках БМК МН2ХА031 была разработана топология межсоединений элементов входного и выходного блоков устройства считывания сигналов, показанная на рис. 7 с подписями выводов, соответствующих схеме на рис. 1.

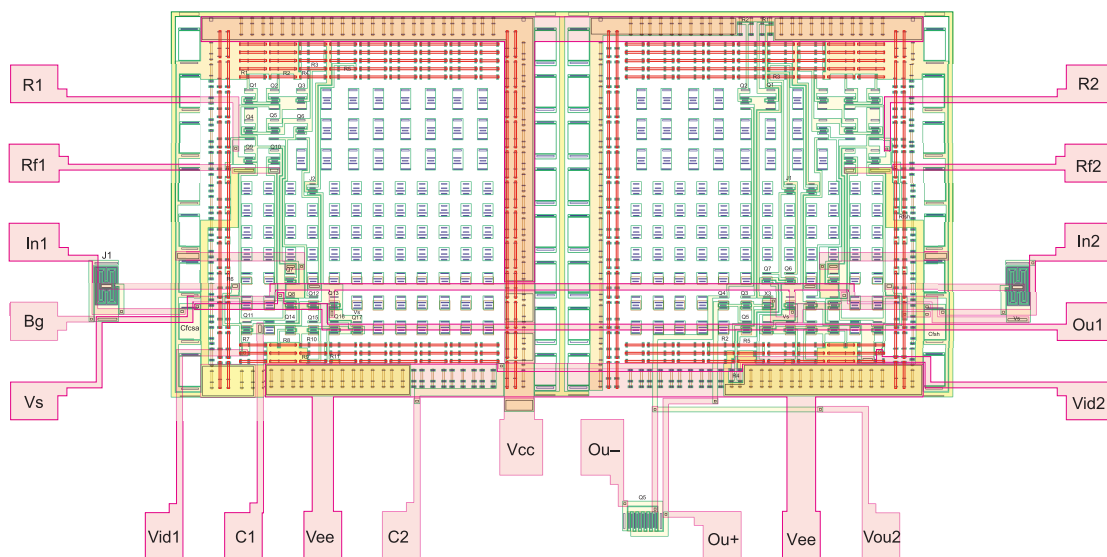


Рис. 7. Топология входного и выходного блоков устройства считывания сигналов на двух макроячейках базового матричного кристалла
Fig. 7. Layout of the input and output blocks of the readout electronic on two master slice array macrocells

Следует отметить, что БМК МН2ХА031 содержит восемь макроячеек и позволяет реализовать двухканальное исполнение устройства считывания сигналов при площади кристалла около 12 мм².

Заключение

1. Для обработки сигналов время-проекционной камеры в установке MPD коллайдера NICA разработано устройство считывания, содержащее расположенные на базовом матричном кристалле МН2ХА031 зарядочувствительный усилитель, усилитель-формирователь, драйвер светодиода, внешние RC-элементы и светодиод.

2. В предлагаемом устройстве реализован ряд схемотехнических решений, обеспечивающих возможность регулировки рабочего режима всех составляющих блоков и, следовательно, сочетания основных параметров: тока потребления, быстродействия, уровня шумов, нагрузочной способности. Для типового режима работы и емкости детектора, равной 5 пФ, изменением номинала только одного внешнего дифференцирующего конденсатора от 5 до 100 пФ обеспечивается соответственно изменение длительности выходного импульса на половине его высоты в диапазоне от 150 до 370 нс и эквивалентного шумового заряда в диапазоне от 2130 до 1570 электронов.

3. На ближайшее время запланировано изготовление и исследование экспериментальных образцов устройства считывания.

Список литературы

1. Абрамов, И. И. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем / И. И. Абрамов, О. В. Дворников. Минск: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2006.
2. Noise Analysis of Radiation Detector Charge Sensitive Amplifier Architectures [Electronic resource] / T. Noulis [et al.]. Mode of access: https://www.academia.edu/20077515/Noise_analysis_of_radiation_detector_charge_sensitive_amplifier_architectures. Date of access: 02.05.2026.
3. Low Noise BiCMOS Front-end Amplifier in the DMILL Technology [Electronic resource] / C. Hu-Guo [et al.]. Mode of access: https://www.academia.edu/27904026/Low_noise_BiCMOS_front_end_amplifier_in_the_DMILL_technology. Date of access: 02.05.2026.
4. Reducing Noises of High-Speed Bi-JFET Charge-Sensitive Amplifiers During Schematic Design / O. V. Dvornikov [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022068.
5. Comparison of Fast Response and Noise of Charge-Sensitive Amplifiers with Various Types of Input Fets / O. V. Dvornikov [et al.] // 2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/INDEL50386.2020.9266185.
6. A Novel Charge Sensitive Pre-Amplifier Structure for Biological Temperature Readout Applications / H. Wang [et al.] // 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Baltimore, MD, USA, 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/ISCAS.2017.8050502.
7. Kasinski, K. A Flexible, Low-Noise Charge-Sensitive Amplifier for Particle Tracking Application / K. Kasinski, R. Kleczek // 2016 MIXDES – 23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, Lodz, Poland. 2016. P. 124–129. DOI: 10.1109/MIXDES.2016.7529715.
8. Beikahmadi, M. A Low-Power Continuous-Reset CMOS Charge-Sensitive Amplifier for the Readout of Solid-State Radiation Detectors / M. Beikahmadi, K. Iniewski, S. Mirabbasi // 2016 14th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), Vancouver, BC, Canada, 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/NEWCAS.2016.7604833.
9. Low-Noise Fast Charge Sensitive Amplifier Methodology for Low Noise Charge Sensitive Amplifier with Input Transistor Working in Moderate Inversion / N. Aimaier [et al.] // 2014 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE2014), Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. P. 189–192. DOI: 10.1109/SMELEC.2014.6920828.
10. Design of a Charge Sensitive Amplifier for Silicon Particle Detector in BCD 180 nm Process / I. Yadav [et al.] // 2019 32nd International Conference on VLSI Design and 2019 18th International Conference on Embedded Systems (VLSID), Delhi, India, 2019. P. 541–542. DOI: 10.1109/VLSID.2019.00126.
11. Проектирование аналоговых микросхем для экстремальных условий эксплуатации на основе базового матричного кристалла МН2ХА031 / О. В. Дворников [и др.] // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2021. № 2. С. 37–46. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-2-37-46.

12. Галкин, Я. Д. Улучшенная модель двухзатворного JFET для аналоговых интегральных микросхем / Я. Д. Галкин, О. В. Дворников, В. А. Чеховский // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 3. С. 20–25. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-20-25>.

Поступила 05.05.2026

Принята в печать 22.05.2026

References

1. Abramov I. I., Dvornikov O. V. (2006) *Analog Integrated Circuit Design for Precision Measurement Systems*. Minsk, Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus (in Russian).
2. Noulis T., Fikos G., Siskos S., Sarrabayrouse G. (2026) *Noise Analysis of Radiation Detector Charge Sensitive Amplifier Architectures*. Available: https://www.academia.edu/20077515/Noise_analysis_of_radiation_detector_charge_sensitive_amplifier_architectures (Accessed 2 May 2026).
3. Hu-Guo C., Schmitt P., Le T. D., Hoffmann C., Zinzinus Y., Hu Y., et al. (2026) *Low Noise BiCMOS Front-end Amplifier in the DMILL Technology*. Available: https://www.academia.edu/27904026/Low_noise_BiCMOS_front_end_amplifier_in_the_DMILL_technology (Accessed 2 May 2026).
4. Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Prokopenko N. N., Pakhomov I. V. (2020) Reducing Noises of High-Speed Bi-JFET Charge-Sensitive Amplifiers During Schematic Design. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 862. DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022068.
5. Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Prokopenko N. N., Titov A. E. (2020) Comparison of Fast Response and Noise of Charge-Sensitive Amplifiers with Various Types of Input Fets. *2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL), Banja Luka, Bosnia and Herzegovina*. 1–6. DOI: 10.1109/INDEL50386.2020.9266185.
6. Wang H., Yuan S., Islam S. K., Britton C. L. (2017) A Novel Charge Sensitive Pre-Amplifier Structure for Biological Temperature Readout Applications. *2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Baltimore, MD, USA*. 1–4. DOI: 10.1109/ISCAS.2017.8050502.
7. Kasinski K., Kleczek R. (2016) A Flexible, Low-Noise Charge-Sensitive Amplifier for Particle Tracking Application. *2016 MIXDES – 23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, Lodz, Poland*. 124–129. DOI: 10.1109/MIXDES.2016.7529715.
8. Beikahmadi M., Iniewski K., Mirabbasi S. (2016) A Low-Power Continuous-Reset CMOS Charge-Sensitive Amplifier for the Readout of Solid-State Radiation Detectors. *2016 14th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), Vancouver, BC, Canada*. 1–4. DOI: 10.1109/NEWCAS.2016.7604833.
9. Aimaier N., Sidek R. M., Hamidon M. N., Sulaiman N. (2014) Low-Noise Fast Charge Sensitive Amplifier Methodology for Low Noise Charge Sensitive Amplifier with Input Transistor Working in Moderate Inversion. *2014 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE2014), Kuala Lumpur, Malaysia*. 189–192. DOI: 10.1109/SMELEC.2014.6920828.
10. Yadav I., Joshi A., Ruscino E., Liberali V., Andrezza A., Shrimali H. (2019) Design of a Charge Sensitive Amplifier for Silicon Particle Detector in BCD 180 nm Process. *2019 32nd International Conference on VLSI Design and 2019 18th International Conference on Embedded Systems (VLSID), Delhi, India*. 541–542. DOI: 10.1109/VLSID.2019.00126.
11. Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Prokopenko N. N., Galkin Y. D., Kunts A. V., Chumakov V. E. (2021) Design of Analog ICs for Extreme Operating Conditions Based on the MN2XA031 Base Matrix Crystal. *Problems of Developing Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems (MES)*. (2), 37–46. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-2-37-46 (in Russian).
12. Galkin Y. D., Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A. (2022) Double Gate JFET Improved Model for Analog Integrated Circuits. *Doklady BGUIR*. 20 (3), 20–25. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-20-25> (in Russian).

Received: 5 May 2026

Accepted: 22 May 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Дворников О. В., д-р техн. наук, доц., гл. науч. сотр., ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»

Чеховский В. А., зав. лаб., Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (НИИ ЯП БГУ)

Кунц А. В., науч. сотр., НИИ ЯП БГУ

Галкин Я. Д., науч. сотр., НИИ ЯП БГУ

Чичин И. И., инж.-электроник, НИИ ЯП БГУ

Адрес для корреспонденции

220113, Республика Беларусь,
Минск, ул. Я. Коласа, 73
ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
Тел.: +375 29 616-45-87
E-mail: oleg.dvornikov@mnipi.by
Дворников Олег Владимирович

Information about the authors

Dvornikov O., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Principal Researcher, JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute”

Tchekhovski V., Head of the Laboratory, Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (INP BSU)

Kunts A., Researcher, INP BSU

Galkin Y., Researcher, INP BSU

Chichin I., Electronics Engineer, INP BSU

Address for correspondence

220113, Republic of Belarus,
Minsk, Ya. Kolasa St., 73
JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute”
Tel.: +375 29 616-45-87
E-mail: oleg.dvornikov@mnipi.by
Dvornikov Oleg



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-14-20>

УДК 621.317.3, 621.389

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО PLA-ПЛАСТИКА

М. В. ЛОБАНОК, И. В. ЧИЖОВ, М. А. ПАВЛЫШКО, А. С. ПОТОЦКИЙ

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Исследованы электрофизические характеристики 3D-печатных сенсоров температуры и влажности на основе проводящего PLA-композита с углеродным наполнителем. Установлены связи между морфологией структуры, полученной методом послойного наплавления расплавом, топологией токопроводящих дорожек и частотно-зависимым откликом при изменении температуры и относительной влажности. Показано, что экструзия через сопло и послойное формирование дорожки увеличивают удельное сопротивление одиночного трека в 3–4 раза по сравнению с исходной нитью вследствие межслоевых границ, пористости и частичной перестройки перколяционной сети. Отмечено, что последовательная топология обеспечивает наибольший относительный отклик, тогда как параллельная – минимальное базовое сопротивление. В диапазоне 20–100 °С наблюдается отрицательный температурный коэффициент сопротивления, а при изменении влажности от 40 до 100 % характер сигнала зависит от частоты измерения. Показано, что в области низких и средних частот сопротивление изменяется слабо и преимущественно определяется барьерно-перколяционным переносом, тогда как при 100 кГц может проявляться слабый вклад межфазной поляризации и емкостного шунтирования.

Ключевые слова: 3D-печать, метод послойного наплавления расплавом, сенсор влажности, сенсор температуры, проводящий полилактид, перколяционный композит, углеродный наполнитель.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Электрофизические характеристики сенсоров температуры и влажности на основе углеродсодержащего PLA-пластика / М. В. Лобанок [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-14-20>.

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF TEMPERATURE AND HUMIDITY SENSORS BASED ON CARBON-CONTAINING PLA PLASTIC

MIKHAIL LOBANOK, IHAR CHIZHOV, MIKHAIL PAULYSHKA, ALEKSEI POTOTSKY

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The electrophysical characteristics of 3D-printed temperature and humidity sensors based on a conductive PLA composite with carbon filler are studied. Relationships are established between the morphology of the structure obtained by fused deposition, the topology of the conductive tracks, and the frequency-dependent response to changes in temperature and relative humidity. It is shown that extrusion through a nozzle and layer-by-layer track formation increase the specific resistance of a single track by 3–4 times compared to the original filament due to interlayer boundaries, porosity, and partial rearrangement of the percolation network. It is noted that the serial topology provides the highest relative response, while the parallel topology provides the lowest baseline resistance. A negative temperature coefficient of resistance is observed in the range of 20–100 °C, and as the humidity changes from 40 to 100 %, the nature of the signal depends on the measurement frequency. It is shown that in the low and medium frequency region the resistance changes weakly and is mainly determined by barrier-percolation transport, whereas at 100 kHz a weak contribution of interfacial polarization and capacitive shunting can appear.

Keywords: 3D printing, fused deposition modeling, humidity sensor, temperature sensor, conductive polylactide, percolation composite, carbon filler.

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

For citation. Lobanok M., Chizhov I., Paulyshka M., Pototsky A. (2026) Electrophysical Characteristics of Temperature and Humidity Sensors Based on Carbon-Containing PLA Plastic. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-14-20> (in Russian).

Введение

Аддитивное производство методом послойного наплавления расплавом (Fused Deposition Modeling, FDM) рассматривается как один из наиболее гибких подходов к созданию встроенных и накладных сенсоров сложной геометрии, поскольку позволяет одновременно формировать конструкционный элемент изделия и функциональную чувствительную зону [1–5]. Для датчиков температуры и влажности особое значение имеют технологическая воспроизводимость, возможность управлять топологией токопроводящих дорожек и совместимость сенсорного материала с массовой печатью.

Одним из наиболее доступных материалов для таких задач является полилактид (Poly(lactic) Acid, PLA). Введение углеродного наполнителя переводит PLA из диэлектрического состояния в проводящий перколяционный композит, электрические свойства которого задаются не только рецептурой, но и морфологией расплава после экструзии, степенью диспергирования наполнителя, пористостью, межслоевыми границами и качеством контакта между соседними филаментами [2, 6–12]. Именно эти факторы во многом определяют как абсолютный уровень сопротивления, так и чувствительность материала к температуре, влаге и частоте тестового сигнала.

В научных трудах показано, что проводящий PLA может использоваться как материал для резистивных температурных сенсоров, электрохимических электродов и влагочувствительных структур [1–3, 6, 8, 12]. Однако большинство опубликованных работ сосредоточено либо на рецептуре филамента и активации печатного материала, либо на квазистационарной калибровке сигнала. Существенно слабее исследован вопрос о том, каким образом FDM-индуцированная микроструктура, топология токопроводящих дорожек и частота измерения совместно определяют базовое сопротивление, перекрестную чувствительность к температуре и влажности и форму дисперсионного отклика. Между тем без такого анализа трудно перейти от демонстрации сенсорного эффекта к проектированию воспроизводимых и селективных 3D-печатных датчиков окружающей среды.

В связи с этим целью исследований было установить связь между морфологией 3D-печатных структур PLA-CPC (Carbon-filled Polymer Composite, CPC), топологией токопроводящих дорожек и их электрофизическим откликом при изменении температуры, относительной влажности и частоты измерения. Предполагалось, что увеличение числа межчастичных и межслоевых переходов в последовательной топологии должно усиливать чувствительность за счет суммирования барьерных вкладов, тогда как параллельные токовые пути будут шунтировать локально высокоомные участки и уменьшать вариабельность отклика.

Методика эксперимента

В качестве материала для печати использовали PLA-филамент для основания и коммерческий проводящий PLA-CPC Proto-pasta с углеродным наполнителем и удельным сопротивлением исходной нити $\rho \approx 3,1$ Ом·см. Сенсорные структуры изготавливались методом FDM на 3D-принтере Bambu Lab P1S при диаметре сопла 0,4 мм, высоте слоя 0,2 мм и укладке $0^\circ/90^\circ$. Были реализованы три топологии дорожек: последовательная, параллельная и комбинированная. Ширина проводящих линий задавалась числом проходов сопла – примерно 0,4, 0,8 и 1,6 мм. Площадь контактных площадок составляла 3–10 мм². Электрические характеристики измеряли на импедансметре LRC-76100. Основные данные получали при амплитуде 1 В и частотах 1 и 100 кГц, а также в диапазоне 10 Гц–100 кГц для анализа дисперсии. Температуру варьировали в интервале 22–100 °С с контролем контактным датчиком и тепловизионной обратной связью, относительную влажность – в диапазоне 40–100 % в камере контролируемого увлажнения. Для каждого режима регистрировали временные зависимости до квазистационарного состояния. Воспроизводимость оценивали по серии из 20 идентичных сенсоров; относительное стандартное отклонение сопротивления в одинаковых условиях не превышало ± 4 %.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены микрофотографии напечатанных сенсорных структур на основе PLA-CPC и схема исследованных топологий. На рисунке изображены: общий вид угла сенсора с четко выраженной межслойной адгезией (а); фрагмент прямолинейного проводящего трека, демонстрирующий шероховатость поверхности и следы экструзии (b); перекрестное пересечение дорожек при укладке $0^\circ/90^\circ$, характерное для FDM-печати (c); схема топологий сенсоров: последовательная (верх), параллельная (центр) и комбинированная (низ) (d).

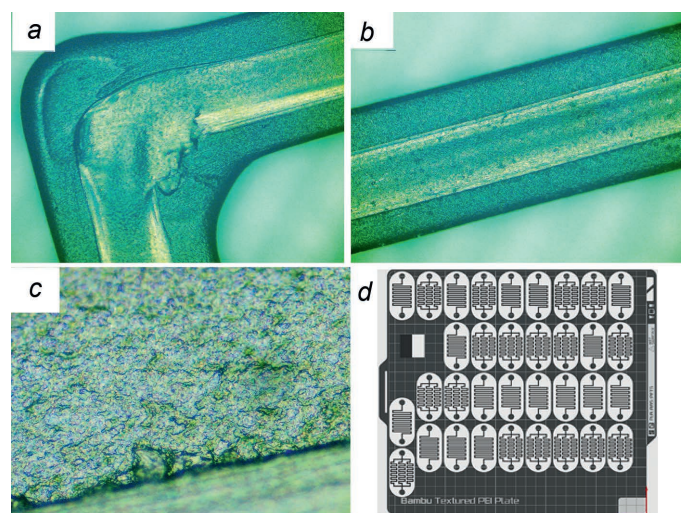


Рис. 1. Микрофотографии сенсорных структур на основе PLA-CPC: *a* – общий вид угла сенсора; *b* – фрагмент прямолинейного проводящего трека; *c* – перекрестное пересечение дорожек при укладке $0^\circ/90^\circ$; *d* – схема топологий сенсоров

Fig. 1. Micrographs of sensor structures based on PLA-CPC: *a* – general view of the sensor corner; *b* – fragment of a rectilinear conductive track; *c* – cross-section of tracks during $0^\circ/90^\circ$ stacking; *d* – diagram of sensor topologies

Рис. 1 важен не только как иллюстрация морфологии, но и как прямое объяснение электрического поведения образцов. На прямолинейных участках дорожек (рис. 1, *b*) отчетливо видны следы экструзии и развитая шероховатость поверхности, что указывает на неоднородность локального распределения наполнителя в затвердевшем расплаве. В областях взаимного перекрытия слоев при укладке $0^\circ/90^\circ$ (рис. 1, *c*) формируется сеть межслойных интерфейсов, которая увеличивает число потенциальных туннельных барьеров и контактных сопротивлений. В угловых зонах (рис. 1, *a*) наблюдаются локальные наплывы материала, связанные с кинематикой печати; такие области способны создавать как шунтирующие, так и ослабленные токовые пути в зависимости от распределения углеродной фазы. Следовательно, уже на уровне микроструктуры FDM-процесс формирует неоднородную перколяционную сеть, что естественным образом объясняет рост удельного сопротивления напечатанного трека по сравнению с исходной нитью.

На рис. 2 приведены температурные и влажностные зависимости сопротивления для сенсоров трех топологий. Исходное сопротивление после печати при комнатной температуре составило 34,8 кОм для последовательной схемы, 6,34 кОм – для параллельной и 6,66 кОм – для комбинированной. Такое соотношение соответствует ожидаемой роли геометрии токового пути: последовательная топология максимизирует эффективную длину проводящего канала, тогда как параллельная формирует набор шунтирующих ветвей. Сопоставление этих данных с морфологией на рис. 1 показывает, что абсолютный уровень сопротивления определяется не только геометрией, но и количеством межслойных и межчастичных переходов, возникающих при печати.

Температурные кривые на рис. 2, *a* демонстрируют монотонное уменьшение сопротивления при нагреве, что соответствует отрицательному температурному коэффициенту сопротивления, характерному для углеродсодержащих перколяционных композитов. Для исследуемых PLA-CPC-структур это означает, что перенос заряда определяется не столько собственной проводимостью углеродной фазы, сколько статистикой межагрегатных зазоров и межслойных контактов, сформированных при FDM-печати.

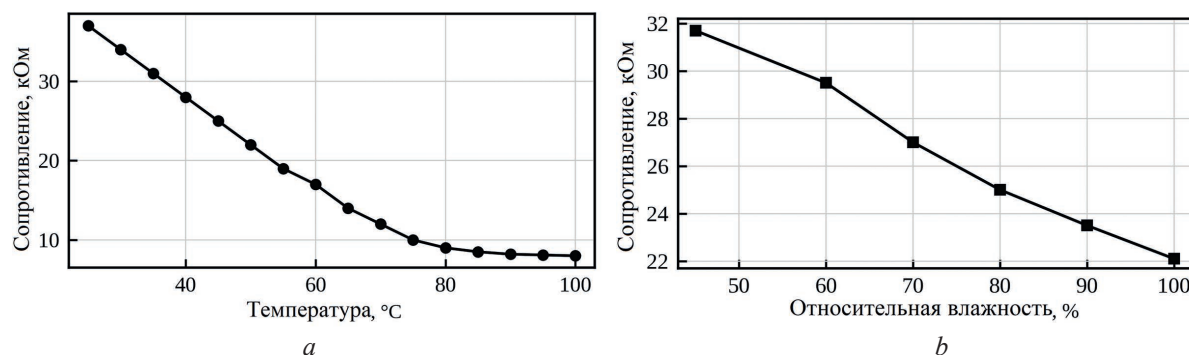


Рис. 2. Зависимость сопротивления сенсоров различных топологий от:
а – температуры; б – относительной влажности

Fig. 2. Dependence of the resistance of sensors of different topologies on: a – temperature; b – relative humidity

При повышении температуры возрастает вероятность термически активируемого туннелирования и прыжкового переноса через тонкие полимерные прослойки между углеродными агломератами, вследствие чего уменьшается суммарное сопротивление наиболее длинного токового пути. Именно поэтому максимальный относительный температурный отклик наблюдается у последовательной топологии: изменение сопротивления отдельных межчастичных переходов в ней не усредняется, а последовательно суммируется вдоль всей проводящей дорожки.

Влажностный отклик на рис. 2, б оказывается не только более сильным, но и физически более сложным. На начальной стадии увлажнения вода адсорбируется в аморфных областях PLA, на стенках пор и на межфазных границах «углеродный наполнитель–полимер», изменяя локальную диэлектрическую проницаемость и параметры межфазной поляризации. При дальнейшем росте влажности возрастает роль мультимолекулярной адсорбции и частичного заполнения межфиламентных полостей, что может одновременно менять эффективное расстояние между агломератами наполнителя и создавать условия для медленного протонно-ионного переноса по адсорбированным водным слоям. Следовательно, влажностный сигнал формируется наложением по меньшей мере двух вкладов – электронно-туннельного и ионно-поляризационного, – тогда как температурный отклик в исследованном диапазоне остается преимущественно барьерно-перколяционным. По этой причине влажность сильнее влияет на сигнал сенсора, а последовательная схема вновь оказывается наиболее чувствительной.

С практической точки зрения полученные данные позволяют более строго интерпретировать роль топологии. Параллельная конфигурация уменьшает вклад отдельных высокоомных контактов за счет шунтирующих ветвей и потому обеспечивает минимальное базовое сопротивление и меньшую восприимчивость к локальным дефектам. Напротив, последовательная топология усиливает вклад каждого межслоевого и межагрегатного перехода, что делает ее предпочтительной для чувствительных датчиков, но одновременно повышает требования к повторяемости печати. Комбинированная схема занимает промежуточное положение и может рассматриваться как инженерный компромисс между чувствительностью и стабильностью.

На рис. 3 показана зависимость сопротивления сенсора с последовательной топологией от частоты в диапазоне 10 Гц–100 кГц.

Как видно из рис. 3, в диапазоне 10 Гц–50 кГц сопротивление сенсора с последовательной топологией изменяется незначительно и остается около значений 34,7–34,9 кОм. Относительное изменение сопротивления в этом диапазоне не превышает ~1 %, что позволяет рассматривать данный участок как квазистационарный резистивный режим. Следовательно, в указанной области частот отклик преимущественно определяется сквозной проводимостью перколяционной сети углеродного наполнителя и межагрегатными туннельными переходами. Наиболее заметное отклонение от среднего уровня наблюдается в области 100 кГц, где сопротивление уменьшается примерно до 34,6 кОм. Это может указывать на появление дополнительного частотно-зависимого вклада, характерного для разупорядоченных композитных систем [13] и связанного с межфазной поляризацией, а также с емкостным шунтированием высокоомных участков перколяционной сети [14]. Однако величина эффекта остается небольшой, поэтому полученную зависимость следует рассматривать как слабую частотную дисперсию, а не как выраженную немонотонную зависимость сопротивления от частоты. Локальные отклонения отдельных точек в области средних

частот не интерпретировались как самостоятельные экстремумы зависимости, поскольку их величина сопоставима с малым относительным изменением сопротивления.

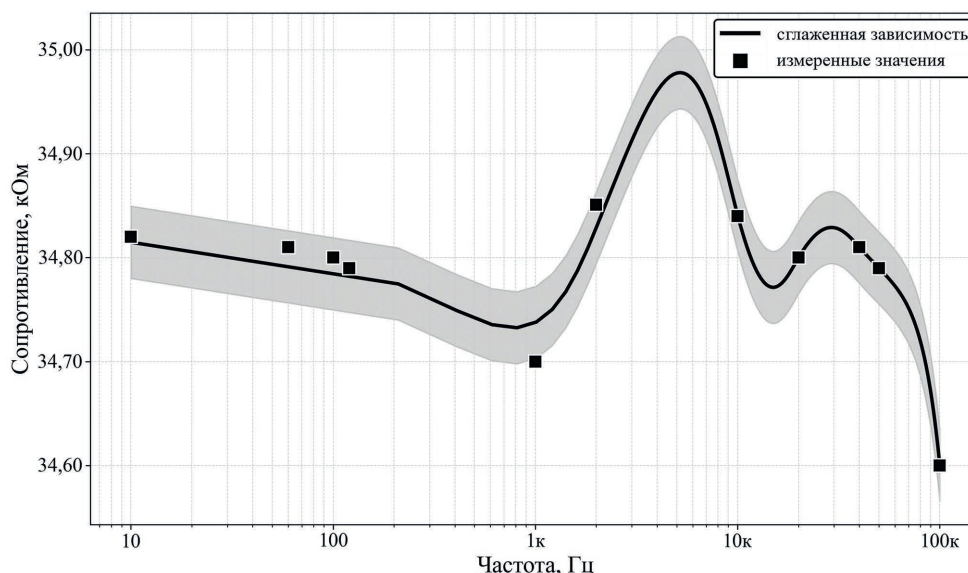


Рис. 3. Зависимость сопротивления сенсора с последовательной топологией от частоты
Fig. 3. Resistance dependence of a sensor with a series topology on frequency

Дополнительную информацию о роли частоты измерения дают частотные зависимости сопротивления сенсора, зарегистрированные при 20 и 50 °С в логарифмическом масштабе (рис. 4).

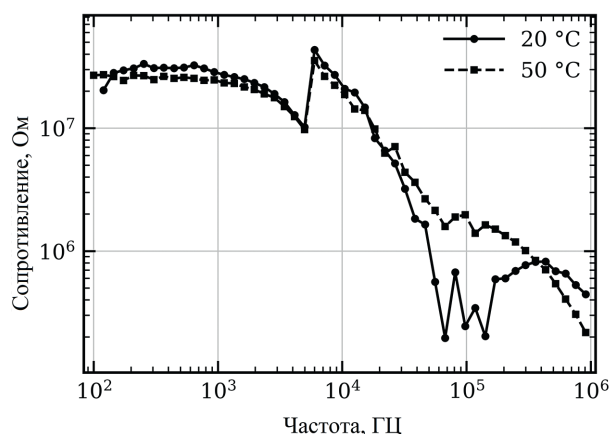


Рис. 4. Частотные зависимости сопротивления сенсора при 20 и 50 °С в логарифмическом масштабе
Fig. 4. Frequency dependences of sensor resistance at 20 and 50 °C plotted on a logarithmic scale

На рис. 4 обе кривые смещаются в область меньших сопротивлений при повышении температуры от 20 до 50 °С. Это согласуется с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, установленным по температурным зависимостям, и указывает на термически активируемый характер переноса заряда через межагрегатные барьеры в перколяционной сети PLA-СРС-композиата. Наиболее заметное различие между кривыми наблюдается в низкочастотной области, где вклад сквозной резистивной проводимости и медленных процессов перераспределения заряда максимален. По мере роста частоты различие между температурными кривыми уменьшается, что указывает на уменьшение относительного вклада медленных барьерно-релаксационных процессов и возрастание роли более быстрых поляризационно-емкостных механизмов.

Таким образом, данные рис. 3 и 4 согласованно показывают, что низкочастотный отклик сенсора преимущественно характеризует барьерно-перколяционную проводимость, тогда как при увеличении частоты возрастает вклад межфазной поляризации и емкостного шунтирования высокоомных участков сети. Это обстоятельство делает многочастотный режим измерения перспективным для последующего разделения температурного и влажностного вкладов в сигнал

сенсора. Вместе с тем полученные результаты следует рассматривать как феноменологическое обоснование такого подхода; для метрологической реализации необходимы дополнительные измерения с большим числом частотных точек, анализом гистерезиса адсорбции-десорбции, циклической повторяемости и с аппроксимацией спектров эквивалентными электрическими схемами.

Заключение

1. Показано, что электрофизический отклик 3D-печатных PLA-СПС-сенсоров определяется совместным действием трех факторов: морфологии, формируемой FDM-процессом, топологии токопроводящих дорожек и частоты измерения. Микроскопические данные свидетельствуют, что шероховатость поверхности, межслоевые интерфейсы и локальные наплывы расплава формируют неоднородную перколяционную сеть, вследствие чего удельное сопротивление напечатанного трека оказывается больше сопротивления исходной нити. Среди исследованных конфигураций последовательная топология обеспечивает максимальную чувствительность, поскольку суммирует изменения на множестве межагрегатных и межслоевых переходов; параллельная минимизирует базовое сопротивление за счет шунтирующих ветвей; комбинированная занимает промежуточное положение и может рассматриваться как компромисс для практической реализации сенсорных узлов.

2. Частотный анализ показал, что в области 10 Гц–50 кГц сопротивление сенсора с последовательной топологией изменяется слабо, что соответствует квазистационарному резистивному режиму, контролируемому перколяционной сетью углеродного наполнителя. При приближении к 100 кГц проявляется дисперсионный вклад, который может быть связан с Maxwell–Wagner–Sillars-поляризацией и емкостным шунтированием высокоомных межагрегатных промежутков. Представление экспериментальных точек без соединения их ломаной линией позволило избежать необоснованной интерпретации слабой частотной дисперсии как сложной немонотонной зависимости. Полученные данные указывают на преимущественно квазистационарный характер сопротивления в диапазоне 10 Гц–50 кГц и на появление слабого высокочастотного вклада при приближении к 100 кГц.

3. Полученные результаты показывают, что температурное воздействие преимущественно изменяет проводимость уже сформированного перколяционного каркаса, тогда как влажность дополнительно влияет на диэлектрическое окружение межчастичных промежутков, межфазную поляризацию и, вероятно, медленные ионно-релаксационные процессы в адсорбированных водных слоях. Поэтому многочастотное измерение является перспективным направлением для разделения температурного и влажностного вкладов в сигнал PLA-СПС-сенсора. Вместе с тем предложенная интерпретация носит феноменологический характер и требует дальнейшей проверки на расширенном наборе частот, при циклическом увлажнении-осушении и с использованием эквивалентных электрических схем.

Список литературы / References

1. Ahmed F., Azhari A., Marzbanrad E., Liravi F., Ali U., Pope M. A., et al. (2019) Graphene Oxide Humidity Sensor Built Entirely by Additive Manufacturing Approaches. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 30, 8980–8988. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01226-y>.
2. Marasso S. L., Cocuzza M., Bertana V., Perrucci F., Tommasi A., Ferrero S., et al. (2018) PLA Conductive Filament for 3D Printed Smart Sensing Applications. *Rapid Prototyping Journal*. 24 (4), 739–743. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2016-0150>.
3. Tirado-Garcia I., Garcia-Gonzalez D., Garzon-Hernandez S., Rusinek A., Robles G., Martinez-Tarifa J. M., et al. (2021) Conductive 3D Printed PLA Composites: On the Interplay of Mechanical, Electrical and Thermal Behaviours. *Composite Structures*. 265. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113744>.
4. Zazoum B., Batooh K. M., Khan M. A. A. (2022) Recent Advances in Flexible Sensors and Their Applications. *Sensors*. 22 (12). <https://doi.org/10.3390/s22124653>.
5. Osman A., Lu J. (2023) 3D Printing of Polymer Composites to Fabricate Wearable Sensors: A Comprehensive Review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 154. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100734>.
6. Stefano J. S., Silva L. R. G., Janegitz B. C. (2022) New Carbon Black-Based Conductive Filaments for the Additive Manufacture of Improved Electrochemical Sensors by Fused Deposition Modeling. *Microchimica Acta*. 189 (11). <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05511-2>.
7. Cieřlik M., Rodak A., Susik A., Wójcik N., Szociński M., Ryl J., et al. (2023) Multiple Reprocessing of Conductive PLA 3D-Printing Filament: Rheology, Morphology, Thermal and Electrochemical Properties Assessment. *Materials*. 16 (3). <https://doi.org/10.3390/ma16031307>.

8. Matsalis S., Paterakis G., Koutroumanis N., Anagnostopoulos G., Galiotis C. (2024) Fabrication and Performance of Capacitive Humidity and Strain Sensors That Incorporate 3D-Printed Nanocomposite Electrodes. *Sensors International*. 5. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2023.100272>.
9. Zhao D., Jia W., Feng X., Yang H., Xie Y., Shang J., et al. (2024) Flexible Sensors Based on Conductive Polymer Composites. *Sensors*. 24 (14). <https://doi.org/10.3390/s24144664>.
10. Silva M. V. C. O., Carvalho M. S., Silva L. R. G., da Rocha R. G., Cambraia L. V., Janegitz B. C., et al. (2024) Tailoring 3D-Printed Sensor Properties with Reduced Graphene Oxide: Improved Conductive Filaments. *Microchimica Acta*. 191 (10). <https://doi.org/10.1007/s00604-024-06720-7>.
11. Wiśniewska P., Łepek A., Ryl J., Khodadadi Yazdi M. (2025) Additive Manufacturing of Electrically Conductive Polymers: A Comprehensive Review. *Journal of Materials Chemistry C*. 13 (42), 21302–21332. <https://doi.org/10.1039/D5TC02571K>.
12. Staffa A., Krivic G., Tocci M., Palmieri M., Cianetti F., Slavič J. (2025) Three-Dimensionally Printed Temperature Sensors Based on Conductive PLA Materials. *Sensors*. 25 (20). <https://doi.org/10.3390/s25206348>.
13. Jonscher A. K. (1977) The “Universal” Dielectric Response. *Nature*. 267, 673–679. <https://doi.org/10.1038/267673a0>.
14. Samet M., Kallel A., Serghei A. (2022) Maxwell-Wagner-Sillars Interfacial Polarization in Dielectric Spectra of Composite Materials: Scaling Laws and Applications. *Journal of Composite Materials*. 56 (20), 3197–3217. <https://doi.org/10.1177/00219983221090629>.

Поступила 09.03.2026
Received: 9 March 2026

Принята в печать 17.04.2026
Accepted: 17 April 2026

Вклад авторов

Лобанок М. В. разработал концепцию исследования, руководил работой, выполнил анализ электрофизических механизмов отклика, подготовил текст статьи.

Чижов И. В. изготовил сенсорные структуры методом FDM-печати, провел измерения температурных и влажностных зависимостей, выполнил обработку экспериментальных данных.

Павлышко М. А. разработал методику импедансных измерений, обеспечил метрологическое сопровождение эксперимента, выполнил частотный анализ отклика сенсоров.

Потоцкий А. С. участвовал в подготовке образцов, проведении оптической микроскопии и первичной обработке результатов.

Authors' contribution

Lobanok M. developed the research concept, supervised the study, analyzed the electrophysical response mechanisms, prepared the manuscript.

Chizhov I. fabricated sensor structures by FDM printing, performed temperature and humidity dependence measurements, and processed experimental data.

Paulyshka M. developed the impedance measurement methodology, provided metrological support for the experiments, and performed frequency-dependent response analysis.

Pototsky A. participated in sample preparation, optical microscopy, and preliminary data processing.

Сведения об авторах

Лобанок М. В., канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физической электроники и нанотехнологий, Белорусский государственный университет (БГУ)

Чижов И. В., асп. каф. физической электроники и нанотехнологий, БГУ

Павлышко М. А., науч. сотр. НИЛ информационно-измерительных систем, БГУ

Потоцкий А. С., студент, БГУ

Адрес для корреспонденции

220064, Республика Беларусь,
Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 29 654-09-53
E-mail: LobanokMV@bsu.by
Лобанок Михаил Владимирович

Information about the authors

Lobanok M., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Nanotechnologies, Belarusian State University (BSU)

Chizhov I., Postgraduate of Physical Electronics and Nanotechnologies Department, BSU

Paulyshka M., Researcher at the Research Laboratory of Information and Measuring Systems, BSU

Pototsky A., Student, BSU

Address for correspondence

220064, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Tel.: +375 29 654-09-53
E-mail: LobanokMV@bsu.by
Lobanok Mikhail



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-21-28>

УДК 621.396.962.25

МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ В ЛЧМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ОБНАРУЖИТЕЛЕ МАЛОЗАГЛУБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

А. С. ЛОПАТЧЕНКО, И. Ю. МАЛЕВИЧ

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

Аннотация. Георадары с непрерывным линейно-частотно-модулированным зондирующим сигналом активно используются при обнаружении приповерхностных и малозаглубленных объектов. Специфика их функционирования связана с работой в ближней зоне в присутствии мощных мешающих отражений от границы укрывающей среды, которые маскируют отклик от объектов в ближних элементах разрешения и усложняют их обнаружение. В статье для решения этой проблемы предложен метод компенсации мешающих отражений от границы укрывающей поверхности в радиолокационном обнаружителе малозаглубленных объектов, использующем линейно-частотно-модулированный зондирующий сигнал. Приведены результаты экспериментальной апробации метода, позволяющего повысить характеристики георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением при обнаружении приповерхностных и малозаглубленных объектов.

Ключевые слова: георадар, линейно-частотно-модулированное излучение, радиолокационный обнаружитель, зондирующий сигнал, малозаглубленный объект.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лопатченко, А. С. Метод компенсации мешающих отражений в ЛЧМ радиолокационном обнаружителе малозаглубленных объектов / А. С. Лопатченко, И. Ю. Малевич // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-21-28>.

METHOD OF COMPENSATION OF INTERFERING REFLECTIONS IN A FMCW RADAR DETECTOR OF SHALLOW OBJECTS

ALEKSANDR LOPATCHENKO, IGOR MALEVICH

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

Abstract. Ground penetrating radars with a continuous frequency-modulated probing signal are widely used to detect near-surface and shallow objects. Their operation requires near-field operation in the presence of powerful interfering reflections from the boundary of the host medium, which mask the response from objects in nearby resolution elements and complicate their detection. To address this issue, this article proposes a method for compensating for interfering reflections from the boundary of the host surface in a radar detector of shallow objects using a frequency-modulated probing signal. The results of experimental testing of this method are presented, allowing for improved performance of ground penetrating radars with continuous frequency-modulated radiation in detecting near-surface and shallow objects.

Keywords: ground penetrating radar, linear frequency-modulated radiation, radar detector, probing signal, shallow object.

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

For citation. Lopatchenko A., Malevich I. (2026) Method of Compensation of Interfering Reflections in a FMCW Radar Detector of Shallow Objects. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 21–28. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-21-28> (in Russian).

Введение

Как известно, радиолокационное обнаружение подповерхностных объектов имеет давнюю историю. Идея «просвечивания» горных пород с помощью радара непрерывного зондирования была запатентована еще в далеком 1910 г. (патент DE 237 944). С того времени число систем и приложений неуклонно растет, что обусловлено высокой востребованностью георадаров (ГР) при оперативном поиске скрытно установленных объектов, проведении неразрушающего контроля дорожных покрытий и строительных конструкций.

В числе перспективных подходов, решающих задачу обнаружения приповерхностных и малозаглубленных объектов, особым образом выделяются ГР с непрерывным линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом (ЗС). Специфика функционирования таких радаров связана с работой в ближней зоне в присутствии мощной компоненты просачивающегося ЗС и значительного уровня мешающих отражений (МО) – эхосигналов (ЭС), отраженных от укрывающей поверхности (границы грунта, строительной конструкции, растительности и т. д.). Эти составляющие обычно маскируют отклик от малоразмерных приповерхностных и малозаглубленных объектов (далее – объектов интереса), расположенных вблизи укрывающей поверхности, уменьшая отношение сигнал/шум в элементе разрешения и усложняя обнаружение объектов. Для решения задачи снижения влияния МО на результаты обнаружения объектов интереса георадарами с ЛЧМ-сигналами в статье рассматривается разработанный авторами метод их компенсации.

Физические основы метода

Работа ГР с ЛЧМ ЗС базируется на частотном методе измерения дальности [1–3], который заключается в определении компонент биений f_{Bi} , получаемых в результате перемножения опорного ЗС и принятых ЭС отражений от укрывающей поверхности, неоднородностей среды и объектов интереса [4]:

$$f_{Bi} = 2\Delta f(r_z + r_m \varepsilon^{1/2})/cT_p, \quad (1)$$

где Δf – диапазон перестройки по частоте (т. е. полная девиация частоты) генератора, управляемого напряжением, $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$; T_p – время развертки по частоте; c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме; ε – диэлектрическая проницаемость исследуемой среды; r_z – расстояние между антенным блоком (АБ) и поверхностью среды; r_m – расстояние между поверхностью среды и заглубленным объектом.

В подавляющем большинстве современных ГР с ЛЧМ ЗС используются бистатическая схема, гомодинное преобразование регистрируемых ЭС и цифровая обработка (рис. 1). В таких системах сверхширокополосный ЛЧМ ЗС подводится к передающей антенне $A1$ (АБ) и одновременно через ответвитель подается на гетеродинный вход смесителя приемного канала. Эхосигналы регистрируются антенной $A2$ и поступают на сигнальный вход смесителя, где перемножаются с отведенной частью ЗС. Фильтр нижних частот выделяет компоненты биений, частоты которых пропорциональны расстоянию до укрывающей поверхности и объекта интереса, а значит, их определение позволяет вычислить глубину его залегания.

Спектр сигнала на выходе смесителя является глубинным портретом, т. е. профилем зависимости амплитуды ЭС от времени задержки, фактически визуализируя электродинамические характеристики разреза грунта под антенной радара. Спектральные составляющие, соответствующие границе укрывающей поверхности, в глубинном портрете имеют высокую энергетику и маскируют близко расположенный спектральный отклик от объекта интереса, ухудшая таким образом чувствительность и разрешающую способность системы. Поскольку объект и МО находятся в соседних элементах разрешения, а соответствующие им сигналы биений имеют сходную структуру, алгоритмические методы фильтрации малоэффективны.

При проведении поиска наибольший интерес представляет обнаружение объектов, не характерных для исследуемой среды, а значит, можно предположить, что их наличие редко. Если параметры среды равномерны в размерах, которые сопоставимы с АБ ГР, и изменяются монотонно, что обычно характерно для грунтов, в том числе с растительностью, и строительных конструкций (например, бетонных плит, стен и т. д.), то для подавления мощных отражений от поверхности зондируемой среды возможно включение в структуру ГР с ЛЧМ ЗС компенсационного кана-

ла, который обеспечит получение сигнала биений от укрывающей среды без объекта интереса (рис. 2).

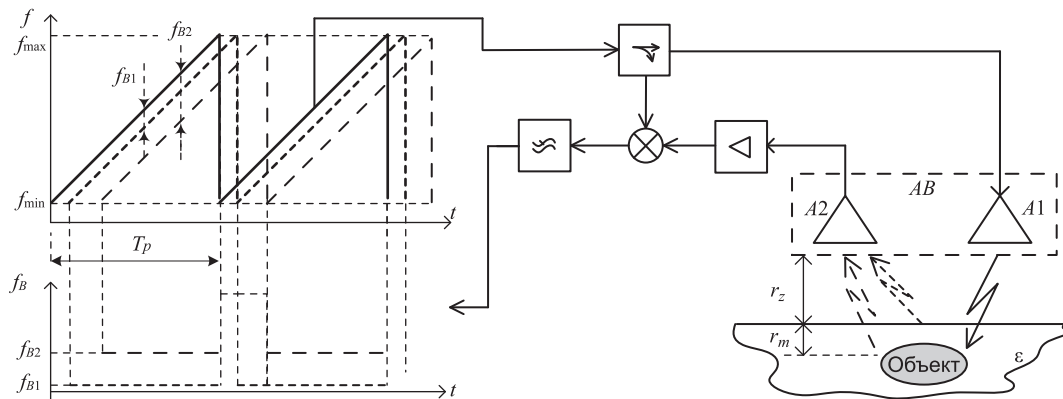


Рис. 1. Иллюстрация принципа работы гомодинного георадара с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением
Fig. 1. Illustration of the operating principle of a homodyne ground penetrating radar with continuous linear frequency-modulated radiation

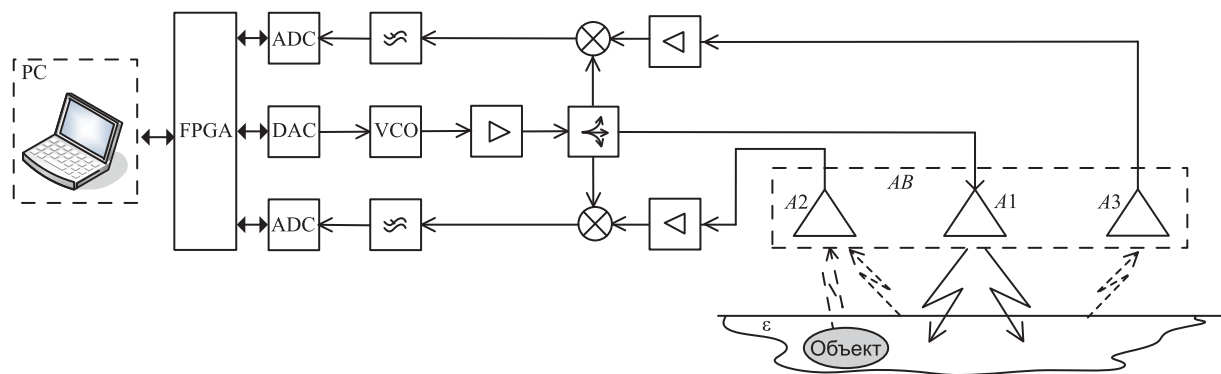


Рис. 2. Функциональная схема гомодинного георадара ближнего действия с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением с компенсацией поверхностных отражений
Fig. 2. Functional diagram of a short-range homodyne ground penetrating radar with continuous linear frequency-modulated radiation and compensation of surface reflections

В предложенной системе по командам, последовательно поступающим от компьютера (PC), цифро-аналоговым преобразователем (DAC), управляемым программируемой логической интегральной схемой (FPGA), формируется пилообразный модулирующий сигнал, который подается на генератор, управляемый напряжением (VCO). VCO выполняет формирование сверхширокополосного ЛЧМ ЗС. Особенностью данной структуры является наличие двух приемных каналов, на гетеродинные входы которых ответвляется часть ЗС. Фильтры нижних частот выделяют компоненты биений, которые преобразуются в цифровую форму аналого-цифровыми преобразователями (ADC) и после предварительной обработки в FPGA передаются в PC, выполняющий спектральное оценивание полученных реализаций сигналов с подавлением МО и отображение глубинных портретов в реальном масштабе времени.

Антенны в АБ выполняются одинаковыми. Передающая антенна А1 размещается в центре АБ, а приемные антенны основного (А2) и компенсационного (А3) каналов – симметрично с противоположных сторон относительно А1. Такая конструкция АБ обеспечивает пространственную развязку между каналами, возможность поиска объектов приемной антенной А2 и получение в процессе сканирования АБ оценки сигнала МО на выходе компенсационного канала.

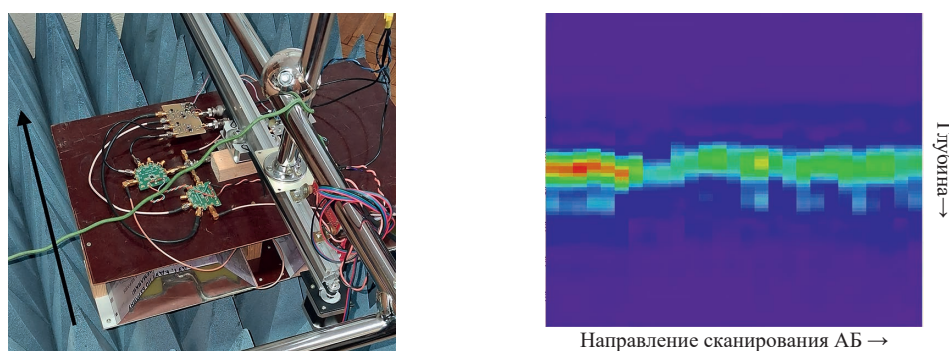
Компенсационный канал выполняется идентичным основному приемному каналу с высокой линейностью и широкополосностью, что минимизирует фазовые расхождения, а значит, и отличия в огибающей спектра между составляющими МО в основном и компенсационном приемных

каналов. Комплексные частотные характеристики основного и компенсационного приемных каналов должны быть практически идентичными.

Высокая корреляция между составляющими МО в приемных каналах и низкая энергетика составляющих, соответствующих полезному сигналу в основном канале, позволяют произвести компенсацию МО путем вычитания нормированного сигнала компенсационного канала из нормированного сигнала основного канала. При одинаковых свойствах среды под приемными антеннами такое вычитание снизит амплитуду МО, а появление объекта интереса только под одной из антенн декоррелирует сигналы в приемных каналах и обеспечит его обнаружение.

Экспериментальная апробация метода

Экспериментальные исследования метода проводились на лабораторном стенде ГР с ЛЧМ ЗС (рис. 3, *a*), разработанном с учетом результатов, полученных в [4–6]. Стрелкой отмечено направление перемещения АБ по направляющей. Линия, соединяющая фазовые центры приемных антенн АБ, перпендикулярна направлению сканирования. Объект интереса в ходе экспериментов находился преимущественно под линией перемещения антенны основного приемного канала.



a

b

Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки (*a*) и результат тестирования (*b*) измерительной площадки

Fig. 3. General view of the experimental setup (*a*) and the test result (*b*) of the measuring platform

Реализованный гомодинный тракт ГР позволяет обрабатывать ЛЧМ-сигналы с базой 3000–8000, с выходной мощностью 10–12 дБм, коэффициентом шума 12–14 дБ и динамическим диапазоном не менее 70 дБ. Расхождение амплитудно-частотных характеристик основного и компенсационного приемных каналов в результате калибровки не превышало 0,5 дБ, расхождение фазо-частотных характеристик – 5°.

Измерительная площадка была организована в лаборатории с поверхностью в виде бетонных плит перекрытия ПТМ с пятью пустотами, поверх которых на битумную мастику выкладывался паркетный пол. Формирование радиолокационных изображений исследуемого участка осуществлялось в результате автоматического перемещения АБ вдоль направляющей. Перемещение АБ производилось перпендикулярно ПТМ.

На рис. 3, *b* представлен результат тестирования площадки для получения контрольного изображения в отсутствии объектов интереса. Для этого площадка укрывалась диэлектрическим радиопоглощающим материалом «ТОРА-39», выполненным в виде отдельных панелей (450×450 мм) пирамидального типа из эластичного пенополиуретана с углеродным наполнителем, который обеспечивает на частоте 1,5 ГГц коэффициент отражения при нормальном падении на рабочую поверхность (–35) дБ. На рис. 3, *b* виден протяженный через все изображение максимум ЭС на выходе тракта обработки, образованный комбинацией просачивающегося и отраженного от радиопоглотителя сигналов, под которым просматривается периодическая структура, соответствующая вершинам радиопоглотителя.

На рис. 4 представлены результаты экспериментов с малоразмерными (100–1000 см³) объектами интереса, размещенными в структуре радиопоглощающего материала «ТОРА-39». В столбцах на рис. 4 последовательно показаны общий вид, глубинный портрет в одноканальном режиме, изображение, полученное в результате выполнения компенсации.

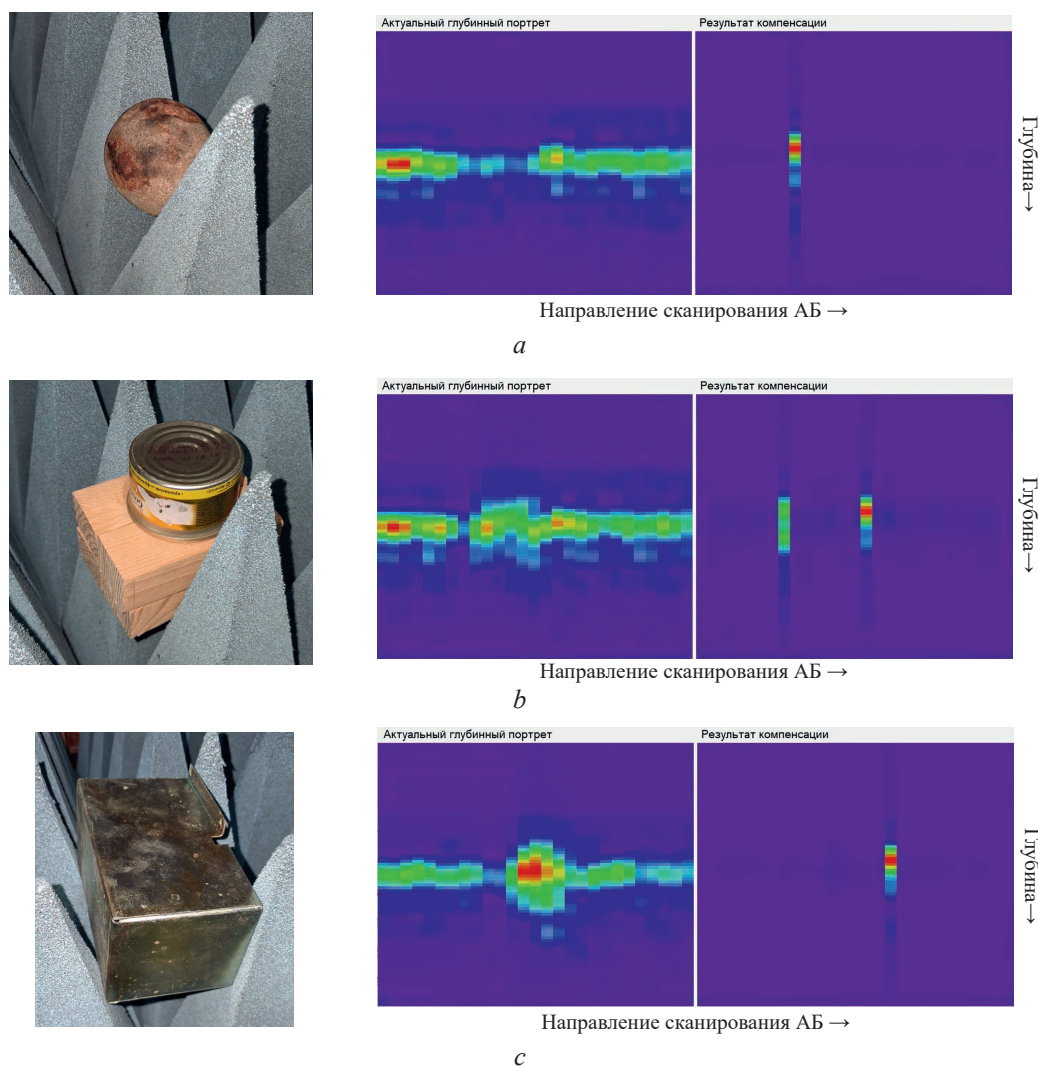


Рис. 4. Обнаружение типовых объектов интереса, расположенных в структуре «ТОРА-39»:
a – гранитный камень; *b* – металлическая тонкостенная банка на деревянных брусках;
c – металлическая толстостенная банка

Fig. 4. Detection of typical objects located in the “TORA-39” structure: *a* – granite stone;
b – thin-walled metal can on wooden blocks; *c* – thick-walled metal can

Данный эксперимент моделирует нахождение объектов в приповерхностном однородном слое среды с небольшой плотностью и позволяет уменьшить влияние плотного бетонного пола на получаемое изображение. Видно, что объекты на рис. 4, *a*, *b* не выделяются на фоне среды, и только относительно большой металлический объект на рис. 4, *c* уверенно обнаруживается. Однако применение метода компенсации эффективно вычитает МО от радиопоглотителя, что позволяет надежно визуализировать объекты интереса, получив контрастную отметку протяженностью в один пиксель.

На рис. 5 показаны результаты обнаружения типовых объектов интереса, расположенных над подстилающей поверхностью в виде бетонной плиты перекрытия ПТМ.

При расположении объектов интереса на поверхности плотной среды в радиолокационном изображении различимы поверхностные отражения и периодическая структура перемычек ПТМ. В правой части изображения видно наличие отражений от стены. Наличие объектов интереса приводит к появлению контрастных максимумов в поверхностных отражениях, размазанных по направлению сканирования. Видно, что применение метода компенсации для малых объектов рис. 5, *a*, *b* эффективно вычитает МО и формирует контрастную отметку протяженностью в один пиксель. Для большего объекта (рис. 5, *c*) начинают просматриваться его контуры, а фон поверхностных отражений уменьшается, что делает изображение более контрастным.

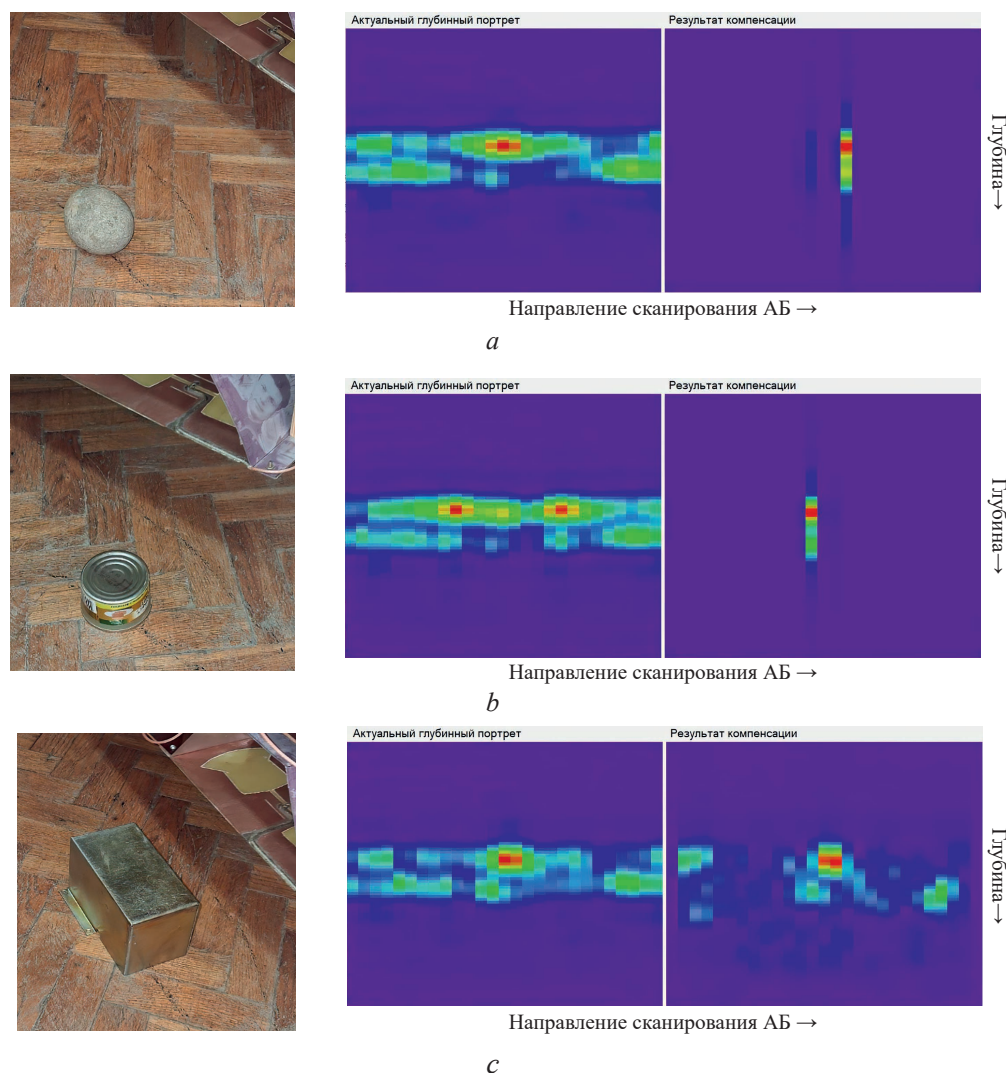


Рис. 5. Обнаружение типовых объектов, расположенных на бетонном полу с паркетом: *a* – гранитный камень; *b* – металлическая тонкостенная банка; *c* – металлическая толстостенная банка
Fig. 5. Detection of typical objects located on a concrete floor with parquet: *a* – granite stone; *b* – thin-walled metal can; *c* – thick-walled metal can

На рис. 6 представлены результаты обнаружения объектов интереса, расположенных над поверхностью с высоким коэффициентом отражения (два положенных внахлест листа фольгированного стеклотекстолита FR4 размерами 80×50 см).

Плоская медная поверхность формирует ровный, контрастный локализованный слой на полученном изображении, наличие объектов интереса над которым хорошо заметно. Контуров объектов интереса размываются по направлению сканирования и для случая на рис. 6, *b* несколько искажаются. Метод компенсации в условиях мощных и равномерных отражений от поверхности с четкой границей показывает наилучшую эффективность, обеспечивая вычитание фона и формирование контрастных отметок от объектов интереса с правильной локализацией по перемещению АБ и с возможностью отображения контуров объектов интереса относительно большого размера (рис. 6, *c*). Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода компенсации МО от поверхности укрывающих и подстилающих сред в радиолокационном обнаружителе объектов интереса с непрерывным ЛЧМ ЗС.

Экспериментальные исследования показали, что применение метода компенсации делает отметки объектов интереса более контрастными на фоне МО и просачивающегося сигнала, что позволяет говорить об увеличении возможностей по их обнаружению. Также видно, что для объектов, сравнимых по размерам с шагом при сканировании (3 см), происходит уменьшение разме-

ров отметки по направлению сканирования АБ. Например, для случая на рис. 5, *a* можно говорить об уменьшении размера отметки с трех до одного пикселя, соответствующего шагу сканирования.

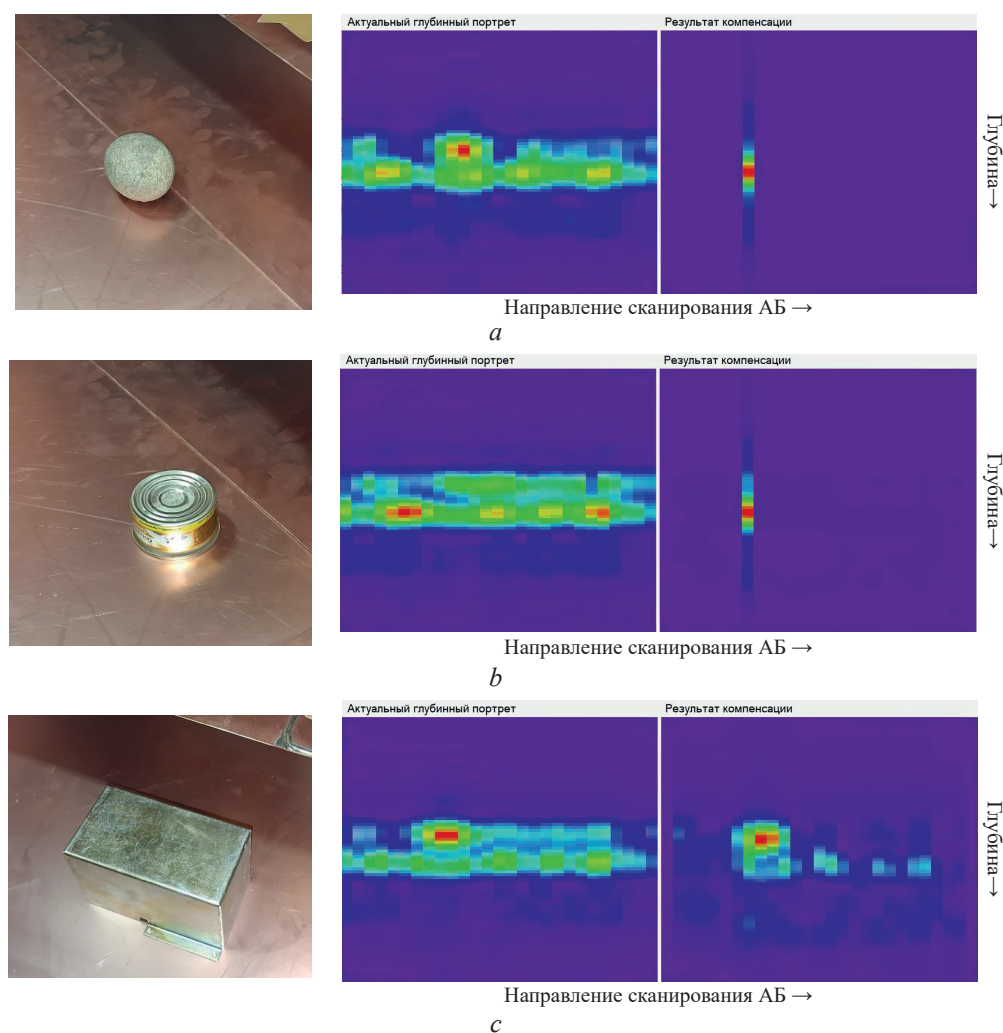


Рис. 6. Обнаружение типовых объектов, расположенных над поверхностью с высоким коэффициентом отражения: *a–c* – то же, что на рис. 5

Fig. 6. Detection of typical objects located above a highly reflective surface: *a–c* – the same as in Fig. 5

Недостатком метода компенсации является размножение отметок цели (рис. 4, *b* и рис. 5, *a*), а также их смещение от истинного положения, что связано со слабо поддающимися анализу особенностями распространения электромагнитного поля в ближней зоне антенн.

Заклучение

1. Предложен метод компенсации мешающих отражений от границы укрывающей поверхности в радиолокационном обнаружителе приповерхностных и малоуглубленных объектов, использующем сверхширокополосный непрерывный линейно-частотно-модулированный зондирующий сигнал. Суть метода заключается в добавлении в структуру радара дополнительного приемного канала, идентичного основному. Антенны приемных каналов располагаются рядом перпендикулярно направлению сканирования. Высокая корреляция фона в приемных каналах при их идентичных комплексных частотных характеристиках позволяет осуществить компенсацию простым вычитанием. Нахождение разведываемого объекта преимущественно под одной из приемных антенн обеспечивает его уверенное обнаружение на фоне остатков мешающих отражений.

2. Проведенные исследования позволяют повысить характеристики георадаров с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением при обнаружении малоразмерных приповерхностных и малоуглубленных объектов.

Список литературы

1. Золотарев, В. П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / В. П. Золотарев, В. А. Кутев, М. И. Финкельштейн. М.: Недра, 1986.
2. Комаров, И. В. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний / И. В. Комаров, С. М. Смольский. М.: Горячая линия – Телеком, 2010.
3. Коган, И. М. Близкая радиолокация / И. М. Коган. М.: Сов. радио, 1973.
4. Малевич, И. Ю. Экспериментальная оптимизация энергетических характеристик георадара с непрерывным линейно-частотно-модулированным излучением / И. Ю. Малевич, А. С. Лопатченко // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 48–55. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-48-55>.
5. Malevich, I. Yu. Self-Propelled Subsurface FMCW Radar Detector of Low-Depth Objects / I. Yu. Malevich, A. S. Lopatchenko, T. V. Shukevich // Proceedings of 5th Central Asian International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering CACSMGE 2022, 5–7 Oct., 2022, Samarkand, Uzbekistan. P. 88–90.
6. Малевич, И. Ю. Радиолокатор ближнего действия с непрерывным излучением для подповерхностного зондирования малоуглубленных объектов / И. Ю. Малевич, А. С. Лопатченко, Т. В. Шукевич // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы: сб. матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. Светлая Роща, 2025. С. 63–68.

Поступила 23.03.2026

Принята в печать 24.04.2026

References

1. Zolotarev V. P., Kutev V. A., Finkelstein M. I. (1986) *Application of Radar Subsurface Sounding in Engineering Geology*. Moscow, Nedra Publ. (in Russian).
2. Komarov I. V., Smol'skiy S. M. (2010) *Fundamentals of the Theory of Radar Systems with Continuous Radiation of Frequency-Modulated Oscillations*. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom Publ. (in Russian).
3. Kogan I. M. (1973) *Short-Range Radar*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ. (in Russian).
4. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S. (2023) Experimental Optimization of the Energy Characteristics of a Ground Penetrating Radar with Continuous Linear-Frequency-Modulated Radiation. *Doklady BGUIR*. 21 (3), 48–55. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-48-55> (in Russian).
5. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S., Shukevich T. V. (2022,) Self-Propelled Subsurface FMCW Radar Detector of Low-Depth Objects. *Proceedings of 5th Central Asian International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering CACSMGE 2022. 5–7 Oct., Samarkand, Uzbekistan*. 88–90.
6. Malevich I. Yu., Lopatchenko A. S., Shukevich T. V. (2025) Short-Range Continuous-Wave Radar for Subsurface Probing of Shallow Objects. *Emergency Prevention and Response: Methods, Technologies, Problems, and Prospects: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*. Svetlaya Roshcha. 63–68 (in Russian).

Received: 23 March 2026

Accepted: 24 April 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Лопатченко А. С., магистр техн. наук, ст. преп. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Малевич И. Ю., д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-96
E-mail: a.lopatchenko@gmail.com
Лопатченко Александр Сергеевич

Information about the authors

Lopatchenko A., M. Sci. (Tech.), Senior Lecturer at the Department of Information Radiotechnologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Malevich I., Dr. Sci. (Tech.), Professor, 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 17 293-88-96
E-mail: a.lopatchenko@gmail.com
Lopatchenko Aleksandr



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-29-35>

UDC 621.396.677

USING A MICROSTRIP ANTENNA TO DETECT BREAST CANCER

HESHAM AYAD, SAJA SWISSI, RIHAM MADI, REHAB ALHATAB

University of Zawia (Az-Zawiya, Libya)

Abstract. This article discusses the design of a Vivaldi microstrip antenna operating at 7 GHz. Its broadband characteristics and high directivity make it ideal for use in a variety of applications. The design utilizes FR4 material, known for its excellent electrical properties. The antenna's performance was analyzed using S-parameters, which demonstrated good stability and high power transfer efficiency. Testing the antenna on healthy and diseased breast tissue revealed significant energy absorption, indicating the antenna's effectiveness in detecting changes in tissue electrical properties.

Keywords: Vivaldi microstrip antenna, FR4, S-parameters, transmitter, receiver.

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

For citation. Ayad H., Swissi S., Madi R., Alhatab R. (2026) Using a Microstrip Antenna to Detect Breast Cancer. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 29–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-29-35>.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Х. АЙАД, С. СВИССИ, Р. МАДИ, Р. АЛЬХАТАБ

Университет Аль-Завия (Эз-Завия, Ливия)

Аннотация. В статье рассмотрена конструкция микрополосковой антенны Вивальди, работающей на частоте 7 ГГц, с широкополосными характеристиками и высокой направленностью, что делает ее идеальной для применения в различных областях. В конструкции использовался материал FR4, известный отличными электрическими свойствами. Характеристики антенны анализировались с помощью S-параметров, которые показали хорошую стабильность и высокую эффективность передачи мощности. При испытании антенны на здоровых и пораженных тканях молочной железы было выявлено значительное поглощение энергии. Это указывает на эффективность антенны в обнаружении изменений электрических свойств тканей.

Ключевые слова: микрополосковая антенна Вивальди, FR4, S-параметры, передатчик, приемник.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Использование микрополосковой антенны для обнаружения рака молочной железы / Х. Айад [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 29–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-29-35>.

Introduction

Antennas are metallic devices used to transmit and receive electromagnetic waves, acting as an interface between outer space and communication equipment. Antennas come in various types and applications, and among these, microstrip antennas are of particular importance [1, 2]. A microstrip antenna consists of a conductive material placed on an insulating surface and mounted on a ground-level support structure [3]. Microstrip antennas are characterized by their small size, ease of manufacture, and relatively low cost [4]. In addition to their radiation characteristics, these antennas offer better directionality, higher gain, and longer transmission range with reduced interference compared to other types of antennas [5, 6].

Breast cancer is the most common cancer among women worldwide, accounting for 23 % of all female cancers. Early detection of breast cancer in asymptomatic women is crucial for saving lives and preserving breast health [7, 8]. However, many patients find it difficult to undergo regular screenings, as most monitoring and follow-up systems are complex and immobile [9, 10]. The flexible and efficient properties of microstrip antennas make them very suitable for imaging and diagnostic applications [11].

Conducting an experiment

Tab. 1 lists the structural characteristics of the breast and their acceptable values. The structure of the mammary gland tissue is shown in Fig. 1.

Table 1. Breast characteristics

Layer	Dielectric constant ϵr	Tangent loss $\tan\delta$
Skin	17.7	0.93
Fat	3.4	0.16
Fibro-globular tissue	16	0.94
Tumor tissue	20	1.05

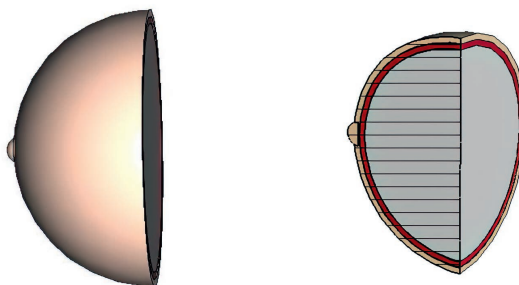


Fig. 1. Breast tissue structure

In the studies conducted for breast cancer detection, the Vivaldi antenna was used. It has excellent ultra-wideband (UWB) characteristics, high directivity, compact size, and a simple planar structure (Fig. 2). These properties make it suitable for biomedical imaging applications, including breast cancer detection. The Vivaldi antenna is capable of generating directional beams and operating over a broad frequency spectrum, penetrating deep into tissue, and detecting changes with high resolution [12, 13].

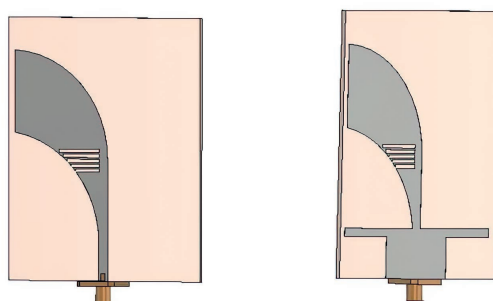


Fig. 2. Vivaldi slot antenna

Design of a Vivaldi microstrip antenna operating at 7 GHz

To design a small Vivaldi slot antenna, the substrate thickness h , dielectric constant ϵ_r , and center frequency response f_r in hertz must be determined. The antenna dimensions W and length L are then defined. In this design, an operating frequency of 7 GHz was used because it offers several important technical advantages for advanced communication applications. FR4 material was chosen due to its suitability for microwave and millimeter wave applications, its lightweight nature, availability, and ease of fabrication. It has a dielectric constant $\epsilon = 2.33$ and a thickness of 0.127 mm. It also has a loss shadow $\tan\delta = 0.0005$. Fig. 3 shows the construction of the Vivaldi slot antenna.

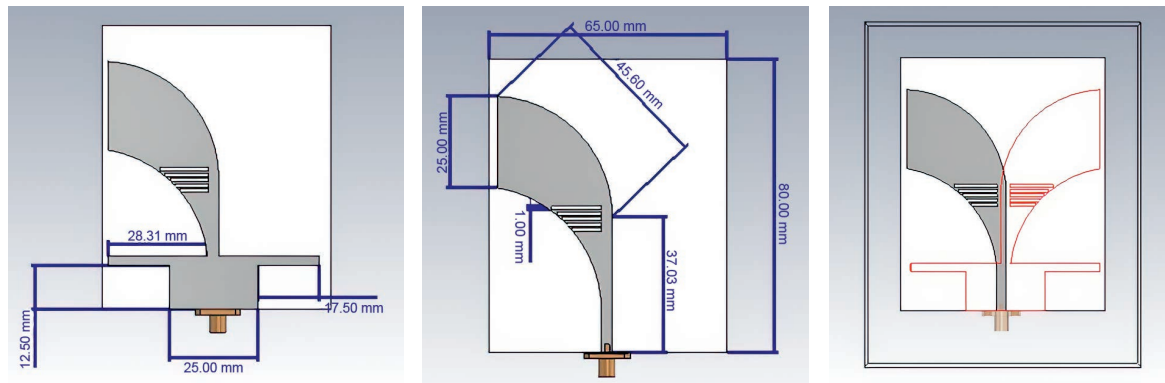


Fig. 3. Construction of the Vivaldi slot antenna

The system is designed with a transmitter and receiver at a frequency of 7 GHz. A sensor system based on experimental construction measurements (S2,1) was designed and analyzed to detect the electromagnetic radiation generated in the medium between two opposing antennas (transmitter and receiver) at a frequency of 7 GHz. The global system operates on the electromagnetic spectrum generated by the antenna, which is generated by the receiving antenna. The characteristics of the transmitter and the antenna separation are shown in Fig. 4.

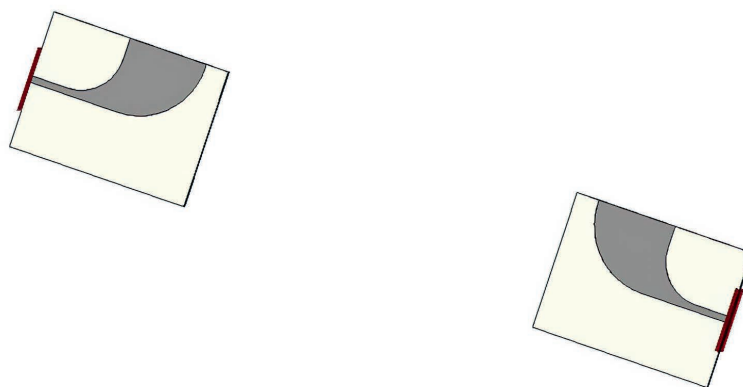


Fig. 4. A system with a transmitter and receiver

Results and its discussion

The S1,1 parameter graph (Fig. 5) shows stable performance across frequencies from 6.0 to 8.0 GHz. At -15 dB, the S1,1 value is -13.570864 , indicating low reflections and efficient energy transfer. The smooth response suggests the component operates effectively without significant fluctuations. These results are ideal for RF applications where minimizing reflections is crucial. Overall, this performance reflects high quality and efficiency in signal transmission within the specified frequency range.

The S2,1 parameter graph (Fig. 6) shows the performance of an RF component across frequencies from 6.0 to 8.0 GHz. It displays a gradual decrease in the S2,1 $= -34.92752$ value with increasing frequency, indicating improved transmission efficiency. Negative values suggest low reflections, reflecting good performance. These results are ideal for use in wireless communication systems. Overall, the component operates with high efficiency in the specified frequency range.

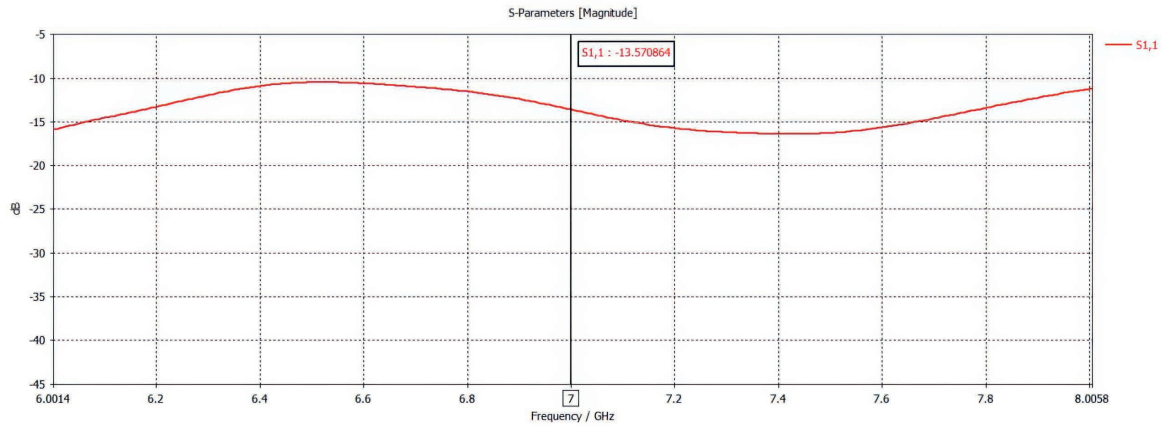


Fig. 5. Reflection coefficient at port 1 in the frequency range from 6.0 to 8.0 GHz

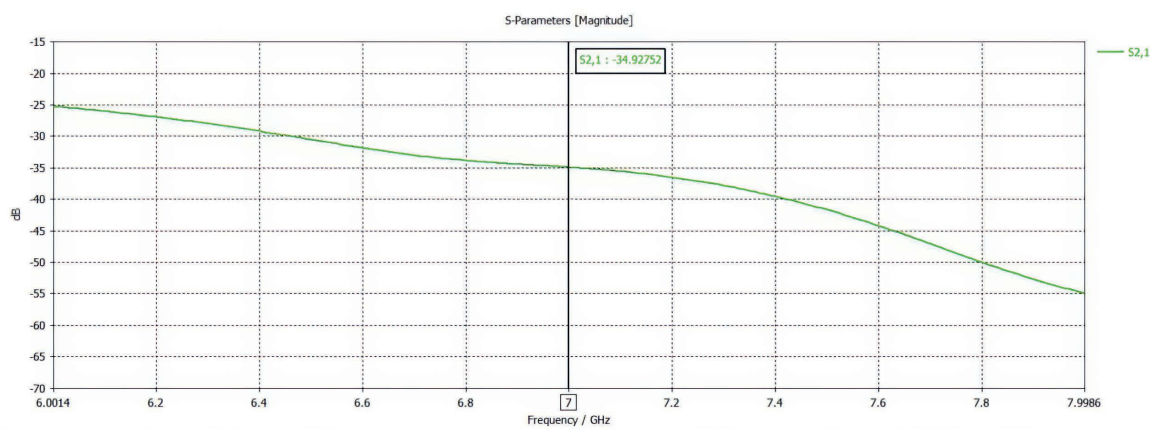


Fig. 6. Transition factor from port 1 to port 2 in the frequency range from 6.0 to 8.0 GHz

The S2,2 parameter graph (Fig. 7) shows stable performance across frequencies from 6.0 to 8.0 GHz. At -15 dB, the S2,2 value is -13.571697 , indicating low reflections and efficient energy transfer. The smooth response suggests the component operates effectively without significant fluctuations. These results are ideal for RF applications where minimizing reflections is crucial. Overall, this performance reflects high quality and efficiency in signal transmission within the specified frequency range.

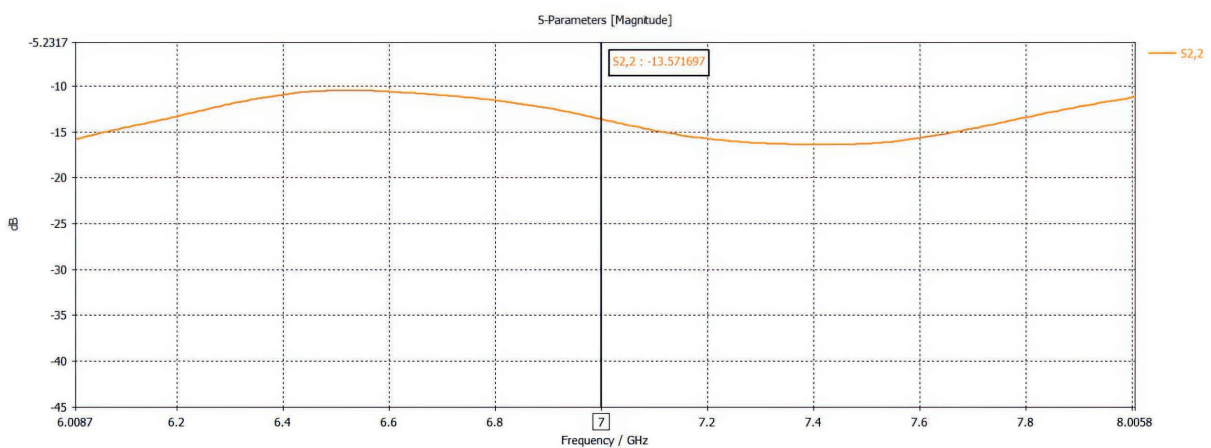


Fig. 7. Reflection coefficient at port 2 in the frequency range from 6.0 to 8.0 GHz

The S1,2 parameter graph (Fig. 8) shows the performance of an RF component across frequencies from 6.0 to 8.0 GHz. It displays a gradual decrease in the S1,2 = -34.92752 value with increasing frequency, indicating improved transmission efficiency. Negative values suggest low reflections, reflecting good performance. These results are ideal for use in wireless communication systems. Overall, the component operates with high efficiency within the specified frequency range.

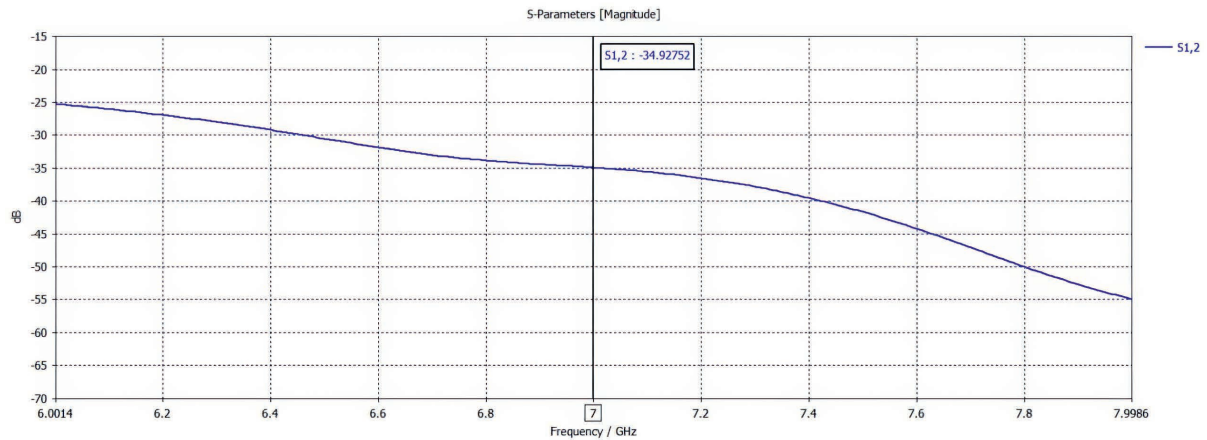


Fig. 8. Transition factor from port 2 to port 1 in the frequency range from 6.0 to 8.0 GHz

In Fig. 9, the breast was placed between two Vivaldi slot antennas design at 7 GHz for the purpose of detecting changes in the transmission coefficient ($S_{2,1}$; $S_{1,2}$). Fig. 10, 11 show the results of $S_{1,2} = -42.908394$ and $S_{2,1} = -42.908438$. It is clear that there is a significant loss in the signal, indicating significant absorption or dispersion of energy through the breast tissue.

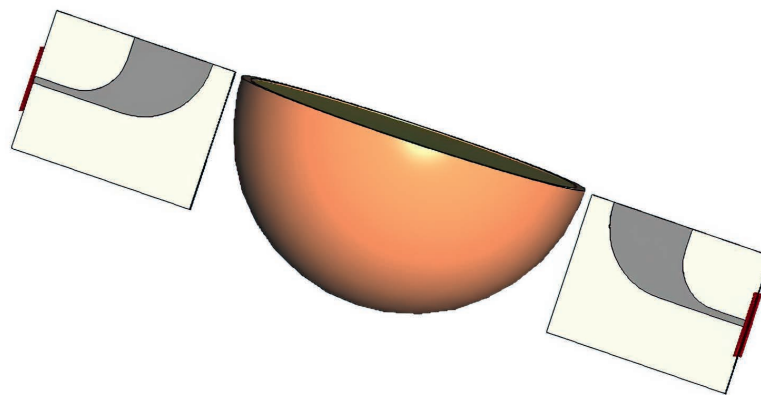


Fig. 9. Healthy breast between the two antenna

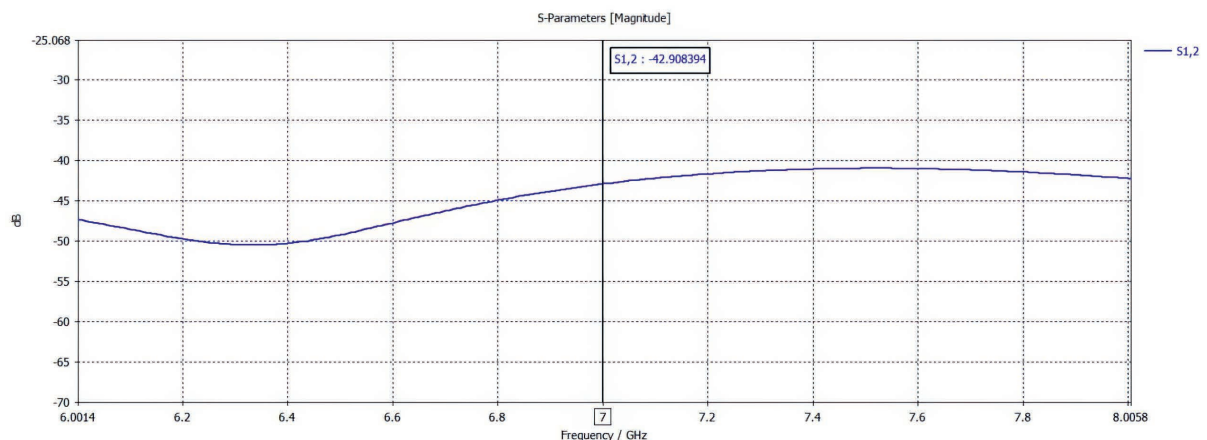


Fig. 10. Transition factor from port 2 to port 1 in the frequency range from 6.0 to 8.0 GHz for the healthy breast

In Fig. 12, the affected breast was placed between two Vivaldi slot antennas at 7 GHz to detect changes in the transmission coefficient ($S_{2,1}$; $S_{1,2}$). Fig. 13, 14 show the results for $S_{1,2} = -45.288975$ and $S_{2,1} = -45.288976$. Significant signal loss is evident, indicating significant absorption or dissipation of energy across the breast tissue.

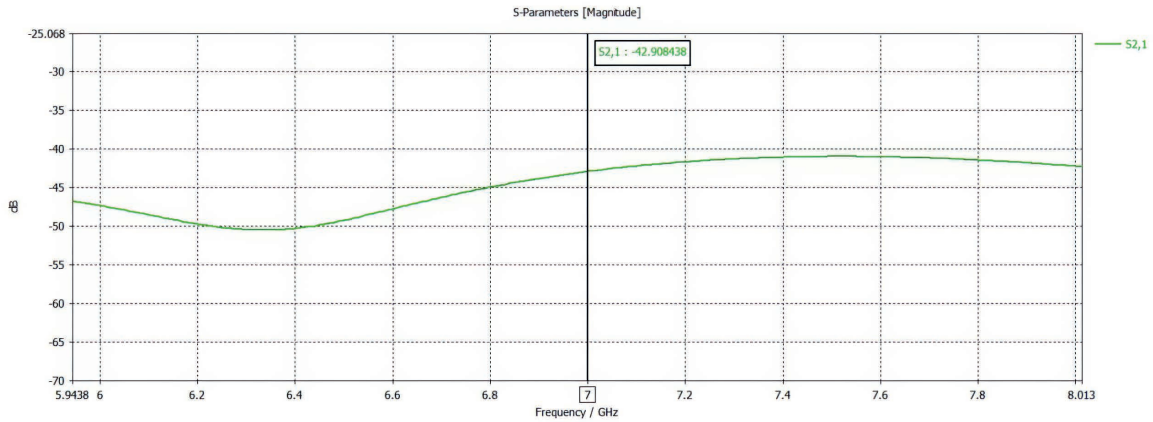


Fig. 11. Transition factor from port 1 to port 2 in the frequency range from 6.0 to 8.0 GHz for the healthy breast

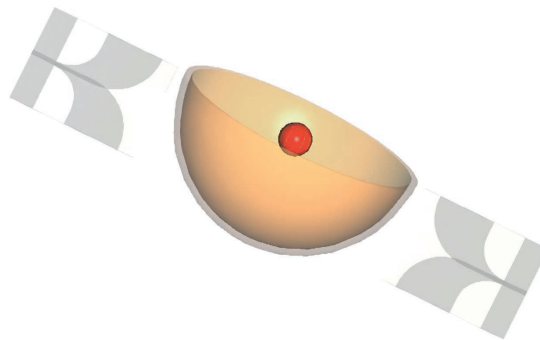


Fig. 12. Place the affected breast between the antenna

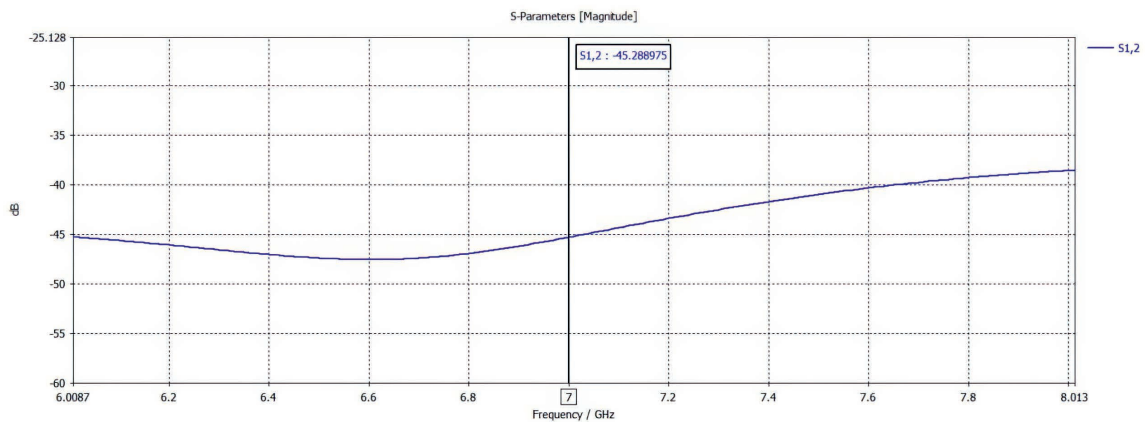


Fig. 13. Transition factor from port 2 to port 1 in the frequency range from 6.0 to 8.0 GHz for the affected breast

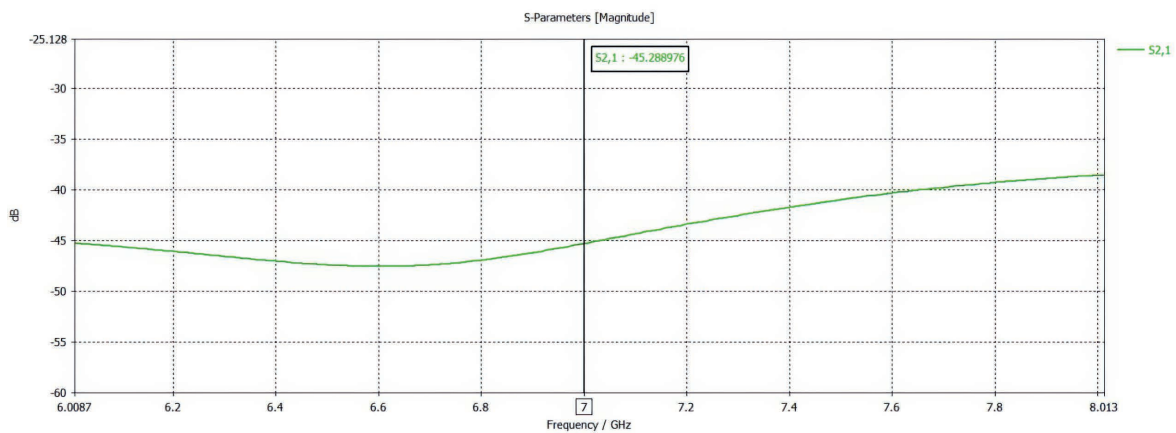


Fig. 14. Transition factor from port 1 to port 2 in the frequency range from 6.0 to 8.0 GHz for the affected breast

Conclusion

1. The Vivaldi antenna design features high efficiency within a specific frequency range, a significantly reduced reflectance coefficient, and negative S-values.

2. The results indicate good signal transmission performance, making the antenna an effective tool in medical applications, such as early breast cancer detection. This design opens new avenues for its use in modern medical imaging technologies.

3. Recommendations of the obtained results development are the following:

- test a wider range of frequencies;
- design a system consisting of more than two antennas to increase accuracy;
- explore broader applications for the designed system, such as detecting other types of tumors;
- integrate artificial intelligence techniques into data analysis.

References

1. Yazbek K., Hassan A. (2018) *Antennas and Wave Propagation*. Damask, Syrian Virtual University.
2. *Radartutorial.eu (2006) Radio Fundamentals – Patch Antennas*. Available: <https://www.radartutorial.eu> (Accessed 1 July 2025).
3. Al-Shehhi H., Al-Zarouni M., Al-Yamahi N. (2020) Wearable Low-Earth Compact Antennas for Breast Cancer Detection. *Technical Report*. Supervisor: Prof. Dr. Raed Shubeir, Dr. Nizar Ali.
4. *A Guide for Early Detection and Periodic Screening for Breast and Cervical Cancer in Primary Healthcare Centers in Iraq*. Ministry of Health, Iraq, 2019.
5. Yadava R. L. (2022) *Antennas and Wave Propagation*. 2nd ed. PHI Learning Pvt. Ltd.
6. Foulakis J. L. (2007) *Fundamentals of Antennas, Arrays, and Mobile Communications*. *Antenna Engineering Handbook*. New York.
7. Palanisamy S. (2005) *Antenna Theory*. Hoboken, NJ, Wiley.
8. Bancroft R. (2009) *Microstrip Antenna and the Printed Antenna*. Bancroft, Randy.
9. Jamal M. A., et al. (2020) Epidemiology of Breast Cancer. *NCBI – NIH*.
10. Allen N. D. M. (2021) *Breast Cancer: A Comprehensive Guide for Patients and Caregivers*.
11. *National Cancer Institute*. United States Government, 1937.
12. Garg R. (2001) *A Guide to the Design of the Microstrip Antenna*. Boston, MA: Artech Publishing.
13. Huang Y., Boyle K. (2008) *Antennas: From Theory to Application*. John Wiley & Sons, Hoboken.

Received: 4 December 2025

Accepted: 17 April 2026

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Information about the authors

Ayad H., PhD, Lecturer of Electrical Engineering and Electronics Department, University of Zawiya (UZ)

Swissi S., Student, UZ

Madi R., Student, UZ

Alhatab R., Student, UZ

Address for correspondence

16418, Libya, Zawiya
University of Zawiya
Tel.: +218 92 7405417
E-mail: h.ayad@zu.edu.ly
Ayad Hisham



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-36-43>

УДК 539.21, 621.382

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ ИЗ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА И ПОЛИЭТИЛЕНА С МИКРОННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА УГЛЕРОДА

С. Е. МАКСИМОВ, В. Л. ШАПОШНИКОВ, В. Е. БОРИСЕНКО

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

Аннотация. Исследованы пленочные гетероструктуры из полиметилметакрилата и полиэтилена низкой плотности с включенными в их состав микронными частицами полупроводника (графитоподобного нитрида углерода $g\text{-C}_3\text{N}_4$), изготовленные по методике смешивания компонентов и литья. Такие гетероструктуры актуальны для создания экологически дружественных новых оптических элементов обработки информации. Созданы свободные сплошные пленки на основе полиметилметакрилата и полиэтилена низкой плотности толщиной 30–50 мкм и пористые пленки на основе полиметилметакрилата толщиной 50–500 мкм. Содержание добавленного полупроводника составляло 5 мас.%, что обеспечивало их целостность и механическую устойчивость при транспортировке и последующих исследованиях. По оптическим спектрам пропускания этих пленок и их фотолюминесценции установлено, что включенный в исследованные полимерные матрицы $g\text{-C}_3\text{N}_4$ сохраняет свой размер и полупроводниковые свойства. Частицы распределены в синтезированных материалах квазиравномерно. Обнаружено, что спектры пропускания исследованных гетероструктур имеют квазилинейную зависимость интенсивности прошедшего излучения от длины волны падающего излучения, что в фотонике может быть использовано для создания спектрально чувствительных элементов.

Ключевые слова: нанокompозит, полиэтилен, полиметилметакрилат, графитоподобный нитрид углерода, оптические свойства, морфология.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Максимов, С. Е. Оптические свойства композитов из полиметилметакрилата и полиэтилена с микронными частицами графитоподобного нитрида углерода / С. Е. Максимов, В. Л. Шапошников, В. Е. Борисенко // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 36–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-36-43>.

OPTICAL PROPERTIES OF COMPOSITES OF POLYMETHYLMETHACRYLATE AND POLYETHYLENE WITH MICRON PARTICLES OF GRAPHITIC CARBON NITRIDE

SERGEI MAKSIMOV, VICTOR SHAPOSHNIKOV, VICTOR BORISENKO

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

Abstract. Film heterostructures made of polymethyl methacrylate and low-density polyethylene with incorporated micron-sized particles of a semiconductor (graphite-like carbon nitride $g\text{-C}_3\text{N}_4$), fabricated using a component mixing and casting technique, were studied. Such heterostructures are relevant for the creation of new environmentally friendly optical elements for information processing. Free-standing continuous films based on polymethyl methacrylate and low-density polyethylene with a thickness of 30–50 μm and porous films based on polymethyl methacrylate with a thickness of 50–500 μm were created. The content of the added semiconductor was 5 wt.%, which ensured their integrity and mechanical stability during transportation and subsequent studies. Based on the optical transmission spectra of these films and their photoluminescence, it was established that $g\text{-C}_3\text{N}_4$

incorporated into the studied polymer matrices retains its size and semiconductor properties. The particles are distributed quasi-uniformly in the synthesized materials. It was found that the transmission spectra of the studied heterostructures have a quasi-linear dependence of the intensity of transmitted radiation on the wavelength of the incident radiation, which can be used in photonics to create spectrally sensitive elements.

Keywords: nanocomposite, polyethylene, polymethylmethacrylate, graphite-like carbon nitride, optical properties, morphology.

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

For citation. Maksimov S., Shaposhnikov V., Borisenko V. (2026) Optical Properties of Composites of Poly-methylmethacrylate and Polyethylene with Micron Particles of Graphitic Carbon Nitride. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 36–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-36-43> (in Russian).

Введение

Графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) – дешевый и простой в изготовлении полупроводниковый материал с шириной запрещенной зоны порядка 2,7 эВ [1], что делает его перспективным для применения в оптических устройствах, таких как фильтры, датчики и фотокатализаторы, предназначенных для работы в видимом диапазоне света. Однако хрупкость объемного материала затрудняет его использование, в связи с чем актуальной является задача создания композитных материалов, содержащих микро- и наночастицы материала в инертной матрице.

Цель исследований – создание методики синтеза гетероструктур, в которых микронные частицы $g\text{-C}_3\text{N}_4$ включены в органическую полимерную матрицу из полиметилметакрилата (ПММА) или полиэтилена низкой плотности (ПЭНП). Синтезированы и изучены оптические свойства таких гетероструктур, что актуально для разработки нового поколения экологичных, легко утилизируемых пластмасс, обладающих при этом перспективными для фотоники характеристиками.

Методика проведения эксперимента

Синтез $g\text{-C}_3\text{N}_4$ проводили в керамическом тигле объемом 20 см³ методом пиролиза тиомочевин (химически чистой) в муфельной печи при температурах 500 и 550 °С в течение 30 мин [2, 3]. Для ограничения доступа воздуха к синтезированному материалу тигель изолировали алюминиевой фольгой. После окончания термообработки печь с тиглем остывала естественным путем до комнатной температуры в течение 16 ч. Полученный материал измельчали в агатовой ступке до микродисперсного состояния. Синтез гетероструктур полупроводника в полимерной матрице проводили методом смешивания и литья [4–6] с использованием промышленно выпускаемых ПММА (ГОСТ 17622–72) и ПЭНП (ГОСТ 16338–85), которые предварительно механически измельчали до порошкообразного состояния.

Для формирования пористых гетероструктур на основе ПММА порошок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ смешивали с порошком ПММА в весовой пропорции 1($g\text{-C}_3\text{N}_4$):20(ПММА), что соответствует 5 мас.% $g\text{-C}_3\text{N}_4$. В полученную смесь добавляли ацетон до полного растворения полимера. Эту жидкую композицию наносили на поверхность дистиллированной воды комнатной температуры. Через 3 мин, достаточные для затвердевания нанесенного материала, образовавшиеся дискообразные пластинки композита снимали с поверхности воды и высушивали на воздухе при комнатной температуре до полного испарения растворителя, которое контролировали периодическим взвешиванием образцов с точностью 0,1 мг. Здесь и далее указанное количество добавленного $g\text{-C}_3\text{N}_4$ было выбрано из требования обеспечения целостности и механической прочности создаваемых пленок.

Для синтеза образцов с матрицей из ПЭНП полимерную основу растворяли в о-Ксилоле при температуре 115 °С. Порошок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ добавляли в диметилформамид и перемешивали. Полученные растворы смешивали в пропорции 1($g\text{-C}_3\text{N}_4$):20(ПЭНМ), необходимой для получения соотношения твердых компонентов, и перемешивали в Multi Speed Vortex MSV-3500 при 600 об/мин до полной однородности. После этого 1 мл смеси переносили на предметное стекло размерами 10×15×3 мм. Полученную пленку на стекле высушивали в муфельной печи при 115 °С в течение 5 мин, а затем – при 60 °С в течение 90 мин. Для наращивания толщины пленки процессы нанесения жидкой композиции и сушки повторяли несколько раз, после чего пленку снимали с поверхности стекла пинцетом.

Структуру и морфологию поверхности полученных композитов исследовали с использованием оптического микроскопа Hitachi S-4200 при увеличении до 20 крат. Размеры кристаллических зерен в них определяли с помощью программы imageJ. Пористость синтезированных материалов оценивали гравиметрически по формуле

$$P = \frac{m_1 - m_2}{\rho S d} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где m_1 – расчетная масса образца из беспористого материала; m_2 – экспериментально определенная масса образца; ρ – объемная плотность композита, учитывающая соотношение концентраций компонентов в образце; S – площадь образца; d – средняя толщина образца.

Оптические спектры отражения и пропускания синтезированных гетероструктур регистрировали с помощью спектрофотометра MC 122 в диапазоне длин волн 300–1000 нм при комнатной температуре. В качестве источника излучения использовали лампу накаливания с вольфрамовой нитью для длин волн более 330 нм.

Исследование фотолюминесцентных свойств осуществляли также при комнатной температуре, используя в качестве источника возбуждающего излучения ксеноновую лампу мощностью 450 Вт. Монохроматором DM160 из спектра излучения лампы выделяли излучение с длиной волны 345 нм. Спектр фотолюминесценции в диапазоне длин волн 365–720 нм регистрировали при помощи монохроматора MS 7504i.

Результаты исследований и их обсуждение

Внешний вид поверхности сформированных гетероструктур показан на рис. 1.

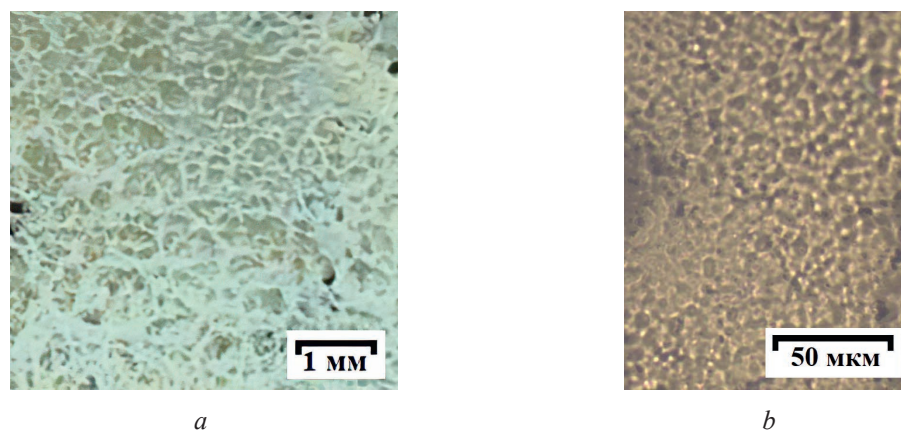


Рис. 1. Морфология поверхности экспериментальных образцов с матрицей из полиметилметакрилата (а) и полиэтилена низкой плотности (b)

Fig. 1. Surface morphology of experimental samples with a matrix of polymethylmethacrylate (a) and low-density polyethylene (b)

Образцы с матрицей из ПММА имеют сильно развитую поверхность с большим количеством видимых невооруженным глазом пор размером от сотен нанометров до сотен микрометров. Оценить толщину подобной структуры сложно, однако предположительно она лежит в пределах 50–500 мкм. Пористость полученных структур оценена в 62–66 %. В свою очередь, образцы с матрицей из ПЭНП имеют гладкую поверхность с относительно слабым рельефом. Их толщина может варьироваться в зависимости от количества циклов нанесения смеси. В данной статье рассматриваются пленки толщиной 30 и 50 мкм.

Установлено, что включенные в исследованные полимерные матрицы полупроводниковые частицы $g\text{-C}_3\text{N}_4$ сохраняют свой размер и состав. Средний размер зерен $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в гетероструктурах составляет 13,5 мкм. Распределены они в синтезированных материалах квазиравномерно.

Исследованы оптические свойства гетероструктур на образцах свободных пленок из композиционных материалов, состоящих из частиц $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в ПММА и ПЭНП. На рис. 2 приведены оптические спектры пропускания пористых беспримесных пленок ПММА и гетероструктур ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ($g\text{-C}_3\text{N}_4$ синтезирован при 550 °C).

Обнаружено существенное влияние $g\text{-C}_3\text{N}_4$ на спектральную зависимость оптического пропускания гетероструктуры ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$. В коротковолновой области 400–500 нм отмечено почти двукратное снижение пропускания, что, вероятнее всего, связано с дополнительным отражением света кристаллическими частицами $g\text{-C}_3\text{N}_4$, проявившимся вследствие развитой пористой структуры всего композита. В более длинноволновой области 600–1000 нм имеет место практически линейная зависимость пропускания от длины волны проходящего излучения. Близкие по характеру спектры пропускания получены на образцах с ПЭНП при температурах синтеза $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 500 и 550 °С (рис. 3).

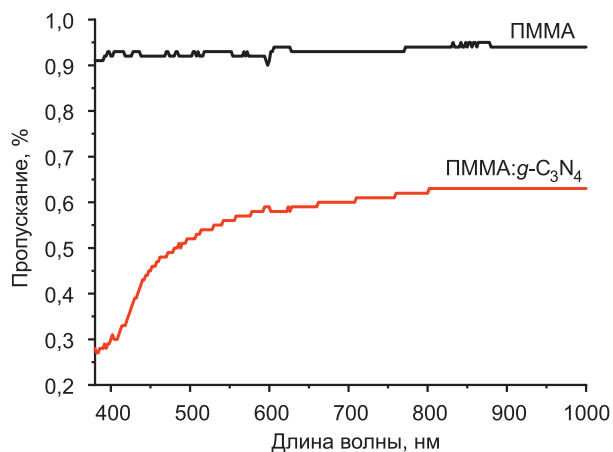


Рис. 2. Оптические спектры пропускания пористых пленок из ПММА и гетероструктур ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ толщиной 50 мкм
Fig. 2. Optical transmission spectra of porous PMMA films and PMMA: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ heterostructures with a thickness of 50 μm

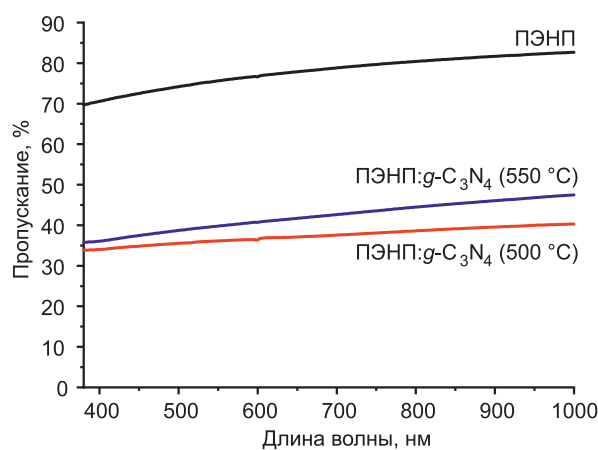


Рис. 3. Оптические спектры пропускания пленок из ПЭНП и ПЭНП: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ толщиной 50 мкм
Fig. 3. Optical transmission spectra of LDPE and LDPE: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ films with a thickness of 50 μm

Спектральные зависимости коэффициента пропускания ПЭНП и ПММА в оптическом диапазоне длин волн качественно близки. Что касается количественных показателей, то обращают на себя внимание на два порядка более низкие коэффициенты пропускания у ПММА-пленок. Это связано главным образом с их разупорядоченной пористой структурой, приводящей к усиленному, по сравнению с ПЭНП-пленками, рассеянию и поглощению падающего зондирующего излучения.

Обнаружены следующие закономерности. Добавление частиц полупроводников в органическую матрицу снижает их оптическую прозрачность, что и можно было ожидать, принимая во внимание появление в данном композитном материале центров рассеяния света, связанных с такими частицами. Это подтверждает снижение прозрачности пленок с увеличением их толщины. При этом, как показывает сравнение для ПЭНП с частицами $g\text{-C}_3\text{N}_4$, синтезированного при разных температурах (500 и 550 °С), стехиометричность и совершенство кристаллической структуры полупроводниковых частиц также являются значимыми факторами.

Зависимость пропускания полимерных пленок, содержащих частицы полупроводника, от длины волны проходящего через них излучения в диапазоне длин волн 400–1000 нм носит квазилинейный характер, что не типично для этих же пленок без примесей. Наклон аппроксимирующих прямых практически не зависит от толщины пленок. Это может быть объяснено суперпозицией результатов взаимодействия зондирующего излучения с компонентами исследованных гетероструктур.

Полученные спектры фотолюминесценции исходных материалов (ПММА, ПЭНП, $g\text{-C}_3\text{N}_4$) синтезированных пленочных гетероструктур ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и ПЭНП: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ представлены на рис. 4 (температуры синтеза $g\text{-C}_3\text{N}_4$ – 550 °С). Для удобства восприятия интенсивность излучения всех образцов приведена к общему максимальному значению. Из полученных результатов можно сделать вывод, что введение $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в полимерную матрицу приводит к пассивации ловушечных уровней на нем. Это видно по уменьшению интенсивности «красного» хвоста, а также по смещению основного пика в сторону больших энергий. Особенно ярко данные эффекты заметны на образце

с матрицей из ПММА. В свою очередь, собственные пики фотолюминесценции матрицы в исследуемом диапазоне не оказывают значительного влияния на профиль общего спектра.

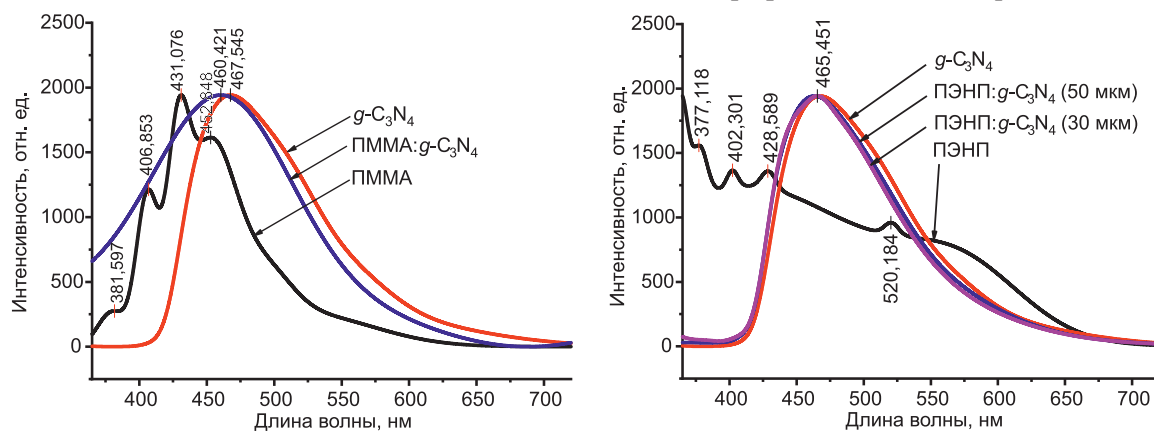


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции исходных материалов (ПММА, ПЭНП, $g\text{-C}_3\text{N}_4$) и синтезированных пленочных гетероструктур ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и ПЭНП: $g\text{-C}_3\text{N}_4$

Fig. 4. Photoluminescence spectra of the starting materials (PMMA, LDPE, $g\text{-C}_3\text{N}_4$) and synthesized film heterostructures PMMA: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ and LDPE: $g\text{-C}_3\text{N}_4$

Для установления природы фотолюминесценции экспериментальных образцов их спектры разложили на гауссовы составляющие (рис. 5).

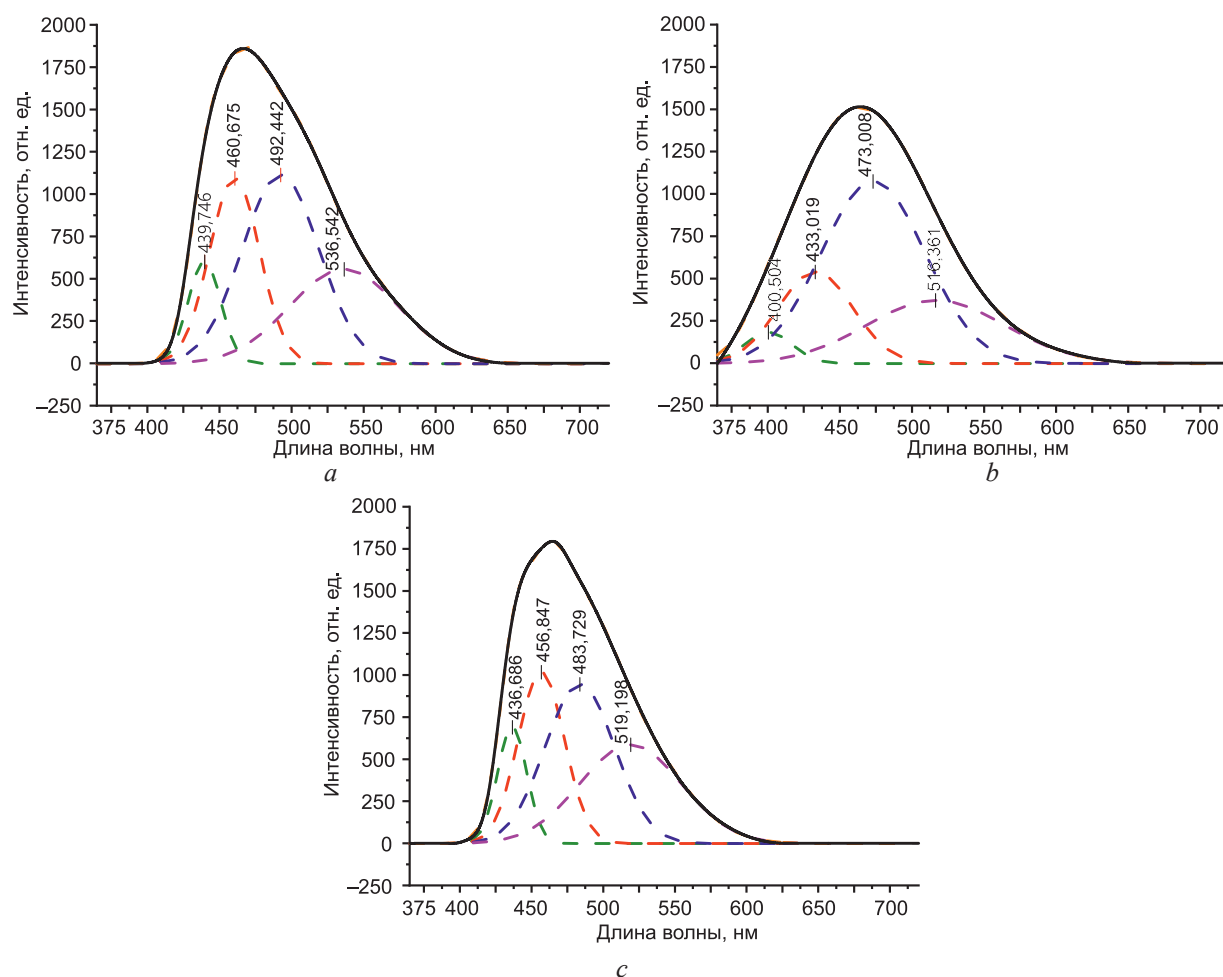


Рис. 5. Разложение спектров фотолюминесценции на гауссовы составляющие:

a – исходный $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (синтезирован при 550 °С); *b*, *c* – ПММА: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и ПЭНП: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ соответственно

Fig. 5. Decomposition of photoluminescence spectra into Gaussian components:

a – initial $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (synthesized at 550 °С); *b*, *c* – PMMA: $g\text{-C}_3\text{N}_4$ and LDPE: $g\text{-C}_3\text{N}_4$, respectively

Характеристики пиков гауссовых кривых, аппроксимирующих экспериментальные спектры фотолюминесценции $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в свободном состоянии и в матрицах из ПММА и ПЭНП, суммарно описывающих наблюдаемые экспериментально зависимости, обобщены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики пиков гауссовых кривых для образцов $g\text{-C}_3\text{N}_4$ с матрицами из полиметилметакрилата и полиэтилена низкой плотности
Table 1. Characteristics of the peaks of the Gaussian curves for $g\text{-C}_3\text{N}_4$ samples with polymethylmethacrylate and low-density polyethylene matrices

Образец	Длина волны, нм	Энергия, эВ	FWHM, нм	Площадь, нм ²	Возможная природа компонента
$g\text{-C}_3\text{N}_4$	439,75	2,82	26,95	17267,7	$\sigma^*\text{-НП}$
	460,68	2,69	41,12	49937,9	$\pi^*\text{-НП}$
	492,44	2,52	62,94	74734,9	$\pi^*\text{-}\pi$
	536,54	2,31	89,35	53074,8	Ловушки
С матрицей из ПММА	400,48	3,10	39,13	7668,0	$\pi\text{-}\pi^*$
	433,19	2,86	60,99	35141,3	$\sigma^*\text{-НП}$
	473,14	2,62	85,09	97370,7	$\pi^*\text{-}\pi$
	516,47	2,40	113,09	44876,6	Ловушки
С матрицей из ПЭНП	437,07	2,84	25,07	16947,52	$\sigma^*\text{-НП}$
	457,71	2,71	40,70	46169,25	$\pi^*\text{-НП}$
	488,95	2,54	64,59	72541,88	$\pi^*\text{-}\pi$
	532,29	2,33	98,35	54042,91	Ловушки

В [7] было показано, что оптическая ширина запрещенной зоны в $g\text{-C}_3\text{N}_4$ лежит в диапазоне 2,73–2,83 эВ в зависимости от условий синтеза. Его валентная зона образована σ -связями C–N с sp^3 -гибридизацией (σ -уровень), π -связями C–N с sp^2 -гибридизацией (π -уровень) и неподеленными электронными парами (НП) азота (уровень НП). Зона проводимости образована возбужденными σ - и π -связями (обозначены в табл. 1 как энергетические уровни σ^* и π^*). В запрещенной зоне $g\text{-C}_3\text{N}_4$ также находятся примесные уровни, связанные с атомами кислорода и дефектами структуры материала. Таким образом, за люминесценцию $g\text{-C}_3\text{N}_4$ отвечают состояния, состоящие из полосы sp^3 C–N σ , полосы sp^2 C–N π и состояния НП мостикового нитридного атома [8, 9]. В связи с этим компоненты с пиком на длинах волн в диапазоне 433,19 нм (2,86 эВ)–439,75 нм (2,82 эВ) интерпретировались как основные межзонные переходы типа $\sigma^*\text{-НП}$. Излучательные переходы в диапазоне длин волн 456,84 нм (2,71 эВ)–460,68 нм (2,69 эВ) интерпретировались как $\pi^*\text{-НП}$ -переходы. Переходы в диапазоне длин волн 473,14 нм (2,62 эВ)–492,44 нм (2,51 эВ) интерпретировались как $\pi^*\text{-}\pi$ -переходы. Оставшиеся переходы были идентифицированы как ловушечные по причине значительных величин параметра FWHM и сравнительно низких значений энергии [10].

Исходя из соотношения площадей под кривыми, соответствующими разным составляющим, можно сделать вывод, что наибольший вклад в фотолюминесценцию как в собственном $g\text{-C}_3\text{N}_4$, так и при помещении его в полимерную матрицу из ПММА или ПЭНП, вносят ловушечные уровни. Их пассивация прослеживается по уменьшению интенсивности «красного» хвоста, а также по смещению основного пика в сторону больших энергий. Особенно ярко данные эффекты заметны на образце с матрицей из ПММА. В свою очередь, собственные пики фотолюминесценции матрицы в исследуемом диапазоне не оказывают значительного влияния на профиль общего спектра.

Заключение

1. Разработанные методики формирования пленок из полиметилметакрилата и полиэтилена низкой плотности с включенными в их состав микронными частицами $g\text{-C}_3\text{N}_4$ обеспечивают создание сплошных пленок из таких гетероструктур толщиной 30–50 мкм и пористых пленок на основе полиметилметакрилата толщиной 50–500 мкм и пористостью 62–66 %. Включение час-

тиц $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в эти полимерные матрицы не изменяет собственные фотолюминесцентные свойства данного полупроводника, однако существенно влияет на оптические свойства всей гетероструктуры. Спектры пропускания таких гетероструктур приобретают квазилинейную зависимость интенсивности прошедшего излучения от длины волны падающего излучения, что свидетельствует о суперпозиции результатов его взаимодействия с компонентами таких гетероструктур.

2. Исследованные пленочные гетероструктуры перспективны не только в биокаталитических применениях для фотокаталитической очистки воды от органики, что можно ожидать от присутствия в них $g\text{-C}_3\text{N}_4$, но и в фотонике для создания люминесцентных меток и спектрально чувствительных элементов.

3. Проведенные исследования финансировались в рамках Государственной программы научных исследований «Конвергенция–2030» (задание 3.1.14).

Список литературы

1. Структурные и фотолюминесцентные свойства графитоподобного нитрида углерода / А. В. Баглов [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54, № 2. С. 176–180. DOI: 10.21883/0000000000.
2. Синтез графитоподобного нитрида углерода на поверхности Fe_3O_4 / Е. Б. Чубенко [и др.] // Неорганические материалы. 2021. Т. 57, № 2. С. 144–149. DOI: 10.31857/S0002337X21020056.
3. Synthesis and Fabrication of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Based Materials and Their Application in Elimination of Pollutants / Z. Chen [et al.] // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139054>.
4. Vasile, C. Polymeric Nanocomposites and Nanocoatings for Food Packaging: A Review / C. Vasile // Materials. 2018. Vol. 11, No 10. <https://doi.org/10.3390/ma11101834>.
5. Nanocomposite Films and Coatings Using Inorganic Nanobuilding Blocks (NBB): Current Applications and Future Opportunities in the Food Packaging Sector / I. U. Unalan [et al.] // RSC Advances. 2014. Vol. 4, No 56. P. 29393–29428. DOI: 10.1039/C4RA01778A.
6. Solution Casting Method for PVC Nanocomposites with Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes / T. V. Vlasova [et al.] // arXiv preprint arXiv:1112.2062. 2011.
7. Структура спектров фотолюминесценции легированного кислородом графитоподобного нитрида углерода / Е. Б. Чубенко [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 87, вып. 1. С. 14–20.
8. Temperature-Dependent Photoluminescence of $g\text{-C}_3\text{N}_4$: Implication for Temperature Sensing / D. Das [et al.] // ASC Applied Materials & Interfaces. 2016. Vol. 8, No 3. P. 2181–2186. DOI: 10.1021/acsami.5b10770.
9. The Origins of the Broadband Photoluminescence from Carbon Nitrides and Applications to White Light Emitting / Z. Gan [et al.] // Nana Research. 2016. Vol. 9, No 6. P. 1801–1812. DOI: 10.1007/s12274-016-1073-2.
10. Fe-Doped $g\text{-C}_3\text{N}_4$: High-Performance Photocatalysts in Rhodamine B Decomposition / M. Nguyen Van [et al.] // Polymers. 2020. Vol. 12, No 9. <https://doi.org/10.3390/polym12091963>.

Поступила 01.04.2026

Принята в печать 24.04.2026

References

1. Baglov A. V., Chubenko E. B., Hnitsko A. A., Borisenko V. E., Malashevich A. A., Uglov V. V. (2020) Structural and Photoluminescent Properties of Graphite-Like Carbon Nitride. *Semiconductors*. 54 (2), 176–180. DOI: 10.21883/0000000000 (in Russian).
2. Chubenko E. B., Baglov A. V., Fedotova Yu. A., Borisenko V. E. (2021) Synthesis of Graphitic Carbon Nitride on the Surface of Nanoparticles Fe_3O_4 . *Inorganic Materials*. 57 (2), 144–149. DOI: 10.31857/S0002337X21020056 (in Russian).
3. Chen Z., Zhang S., Liu Y., Alharbi N. S., Rabah S. O., Wang S., et al. (2020) Synthesis and Fabrication of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ -Based Materials and Their Application in Elimination of Pollutants. *Science of the Total Environment*. 731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139054>.
4. Vasile C. (2018) Polymeric Nanocomposites and Nanocoatings for Food Packaging. *Materials*. 11 (10). <https://doi.org/10.3390/ma11101834>.
5. Unalan I. U., Cerri G., Marcuzzo E., Cozzolino C. A., Farris S. (2014) Nanocomposite films and Coatings Using Inorganic Nanobuilding Blocks (NBB): current applications and future opportunities in the Food Packaging Sector. *RSC Advances*. 4 (56), 29393–29428. DOI: 10.1039/C4RA01778A.
6. Vlasova T. V., Kryshtob V. I., Mironov V. F., Apresyan L. A., Bokova S. N., Obratsova E. D., et al. (2011) Solution Casting Method for PVC Nanocomposites with Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes. *arXiv preprint arXiv:1112.2062*.
7. Chubenko E. B., Baglov A. V., Leonenya M. S., Yablonskii G. P., Borisenko V. E. (2020) Structure of the Photoluminescence Spectra of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride. *Zhurnal Prikladnoy Spektroskopii*. 87 (1), 14–20 (in Russian).

8. Das D., Shinde S. L., Nanda K. K. (2016) Temperature-Dependent Photoluminescence of g-C₃N₄: Implication for Temperature Sensing. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 8 (3), 2181–2186. DOI: 10.1021/acsami.5b10770.
9. Gan Z., Shan Y., Chen J., Gui Q., Zhang Q., Nie S., et al. (2016) The Origins of the Broadband Photoluminescence from Carbon Nitrides and Applications to White Light Emitting. *Nano Research*. 9 (6), 1801–1812. DOI: 10.1007/s12274-016-1073-2.
10. Nguyen Van M., Mai O. L. T., Pham Do C., Lam Thi H., Pham Manh C., Nguyen Manh H., et al. (2020) Fe-Doped g-C₃N₄: High-Performance Photocatalysts in Rhodamine B Decomposition. *Polymers*. 12 (9). <https://doi.org/10.3390/polym12091963>.

Received: 1 April 2026

Accepted: 24 April 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Максимов С. Е., инж.-электр. Центра 4.11, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Шапошников В. Л., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Центра 4.11, БГУИР

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

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 612-92-19
E-mail: maksimov914@gmail.com
Максимов Сергей Евгеньевич

Information about the authors

Maksimov S., Electronics Engineer at the Center 4.11, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Shaposhnikov V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher at the Center 4.11, BSUIR

Borisenko V., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor of 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 29 612-92-19
E-mail: maksimov914@gmail.com
Maksimov Sergei



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-44-51>

УДК 539.25, 548.528

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОЧИСТКИ В ВЫСОКОПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ АРГОНА НА МОРФОЛОГИЮ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

К. Т. ЛОГУНОВ, А. А. МИХОЛАП

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

Аннотация. Исследовано влияние параметров высокоплотной индуктивно-связанной плазмы аргона на морфологию и характеристики поверхности подложек монокристаллического кремния. Обработка образцов проводилась в диапазоне мощностей высокочастотного источника от 100 до 1000 Вт при длительности очистки до 300 с. Морфология поверхности анализировалась методом атомно-силовой микроскопии с последующим исследованием краевого угла смачивания и работы адгезии. Отмечено влияние очистки в высокоплотной плазме на поверхностную энергию. Установлено, что эффективные параметры очистки для получения минимальной шероховатости и удаления загрязнений без повреждения поверхности – это мощность разряда 300–500 Вт и длительность воздействия 60–120 с. Полученные данные могут быть использованы при подборе режимов плазменной очистки подложек монокристаллического кремния в технологических процессах микроэлектроники.

Ключевые слова: очистка поверхности, высокоплотная индуктивно-связанная плазма, морфология поверхности, атомно-силовая микроскопия, монокристаллический кремний.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают благодарность Д. А. Котову и Д. Б. Мигасу за ценные рекомендации и замечания в процессе работы над статьей, а также В. А. Лапицкой и О. М. Чернаусик за проведение исследований методом атомно-силовой микроскопии.

Для цитирования. Логунов, К. Т. Влияние режимов очистки в высокоплотной плазме аргона на морфологию и свойства поверхности подложек монокристаллического кремния / К. Т. Логунов, А. А. Михолап // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 44–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-44-51>.

THE INFLUENCE OF CLEANING PARAMETERS IN HIGH-DENSITY ARGON PLASMA ON THE MORPHOLOGY AND SURFACE PROPERTIES OF MONOCRYSTALLINE SILICON SUBSTRATES

KONSTANTIN LOGUNOV, ALIAKSEI MIKHOLAP

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

Abstract. The influence of high-density inductively coupled argon plasma parameters on the morphology and surface characteristics of single-crystal silicon substrates was studied. Samples were treated with high-frequency source powers ranging from 100 to 1000 W, with cleaning times of up to 300 s. Surface morphology was analyzed using atomic force microscopy, followed by a study of the contact angle and adhesion work. The effect of high-density plasma cleaning on surface energy was noted. It was found that effective cleaning parameters for achieving minimal roughness and removing contaminants without damaging the surface include a discharge power of 300–500 W and an exposure time of 60–120 s. The obtained data can be used to select plasma cleaning modes for single-crystal silicon substrates in microelectronics processes.

Keywords: surface cleaning, high-density inductively coupled plasma, surface morphology, atomic force microscopy, monocrystalline silicon.

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

Gratitude. The authors express gratitude to D. A. Kotov and D. B. Migas for valuable recommendations and comments during the work on the article, as well as to V. A. Lapitskaya and O. M. Chernausik for conducting research using atomic force microscopy.

For citation. Logunov K., Mikholaп A. (2026) The Influence of Cleaning Parameters in High-Density Argon Plasma on the Morphology and Surface Properties of Monocrystalline Silicon Substrates. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 44–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-44-51> (in Russian).

Введение

Подложки из монокристаллического кремния (Si) широко применяются в микро- и оптоэлектронике, фотовольтаике и других высокотехнологичных отраслях [1]. Для обеспечения высокой производительности и надежности устройств, сформированных на кремниевых подложках, требуется тщательная очистка их поверхности от загрязнений и дефектов. Однако даже после заключительной полировки и химической очистки поверхность Si в условиях хранения и эксплуатации быстро деградирует вследствие окисления, адсорбции органических соединений и накопления различных загрязнений [2]. Дефекты и контаминации служат центрами рекомбинации носителей заряда, ухудшают адгезию осаждаемых пленок и негативно влияют на параметры устройства, сформированного на кремниевой подложке [3, 4]. В результате снижаются выход годных изделий и их эксплуатационная надежность.

Очистка поверхности подложек монокристаллического Si проводится при помощи химических и физических методов. Однако многие методы имеют ряд недостатков, таких как риск повторного загрязнения, отсутствие однородности обработки, недостаточная эффективность, экологические ограничения и т. д. [5]. Все это приводит к необходимости поиска альтернативных способов очистки, где одно из перспективных направлений – методы очистки в плазме, в особенности, использующие высокоплотную индуктивно-связанную плазму [6]. Она характеризуется высокой плотностью заряженных частиц при относительно низких энергиях ионов, что обеспечивает интенсивное химическое взаимодействие с поверхностью загрязненными при минимальном физическом распылении и повреждении подложки [6, 7].

Стоит отметить, что воздействие методов очистки в плазме на поверхность монокристаллического Si представляет собой сложный физико-химический процесс, приводящий не только к удалению загрязнений, но и к модификации самой поверхности. Это может послужить причиной изменения шероховатости, микрорельефа, состава поверхностных функциональных групп и, как следствие, поверхностной энергии [8, 9].

Цель исследований – установление взаимосвязи между параметрами процесса очистки в высокоплотной плазме в среде аргона (Ar) (мощностью высокочастотного разряда (ВЧ-разряда), длительностью очистки) и их влиянием на поверхность подложки монокристаллического Si. Полученные данные позволят глубже понять процессы взаимодействия высокоплотной плазмы с поверхностью Si и подобрать эффективные режимы очистки.

Проведение эксперимента

Для проведения исследований в качестве образцов были выбраны подложки из монокристаллического Si марки КДБ-12, диаметром 100 мм и ориентацией (100). С целью оценки значимости влияния очистки на свойства подложек монокристаллического кремния выполнялась очистка методом высокоплотной индуктивно-связанной плазмы в вакуумной камере. Исследования проводили на экспериментальном комплексе на основе модифицированной ВУ-1БСп. Первоначально система была откачана до базового давления порядка $8 \cdot 10^{-3}$ Па. Расстояние источник–подложка составляло 110 мм, а частота питающего напряжения – 13,56 МГц. Длительность очистки подложек в высокоплотной индуктивно-связанной плазме Ar – 0–300 с, мощность ВЧ-источника варьировалась в диапазоне 100–1000 Вт. Расход газа Ar – 3,6 л/ч.

Исследование морфологии поверхности и влияния режимов очистки на ее изменения проводилось методом атомно-силовой микроскопии. Сканирование выполнялось на атомно-силовом микроскопе Dimension FastScan (Bruker, США) с использованием кремниевых кантилеверов типа ScanAsyst (Bruker, Германия) с радиусом закругления острия 9 нм и жесткостью консоли 0,32 Н/м.

Для получения более точных значений параметров шероховатости поверхность исследовали контактным методом. Центральные области образцов сканировали на участке размерами 10×10 мкм². Параметры шероховатости, включая среднеарифметическое отклонение высот R_a , среднеквадратичное отклонение R_q и среднюю шероховатость по 10 точкам R_z , рассчитывали по полученным снимкам морфологии поверхности (рис. 1) с использованием специализированного программного обеспечения.

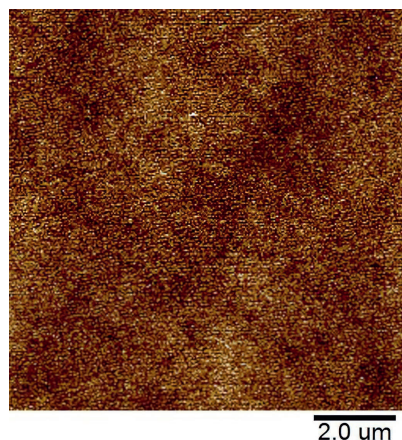


Рис. 1. Снимок морфологии поверхности подложки монокристаллического кремния, исследованной с помощью атомно-силовой микроскопии

Fig. 1. A snapshot of the surface morphology of a single-crystal silicon substrate examined using atomic force microscopy

Одним из ключевых параметров, характеризующих изменение поверхностных свойств твердого материала после плазменной обработки, является краевой угол смачивания. Его измерение позволяет оценить гидрофильность/гидрофобность поверхности, что, в свою очередь, тесно связано с такими факторами, как химический состав приповерхностного слоя, степень загрязненности, рельеф и шероховатость. Определение краевого угла смачивания необходимо для косвенной оценки эффективности удаления органических и неорганических загрязнений, а также для выявления возможных модификаций поверхностной энергии. Значение краевого угла смачивания находили методом лежащей капли. Определение статического краевого угла смачивания покрытия водой осуществлялось нанесением на поверхность капли дистиллированной воды объемом порядка 2,5 мкл с помощью специального шприца-дозатора. Затем выполнялись ее фотофиксация в режиме микросъемки на цифровом фотоаппарате (рис. 2) и последующий расчет.

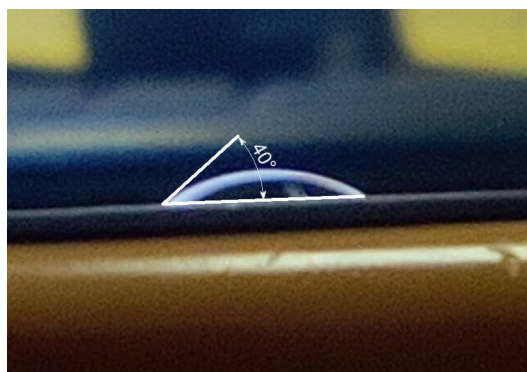


Рис. 2. Характерное изображение капли воды на поверхности подложки монокристаллического кремния

Fig. 2. A characteristic photo of a water droplet on the surface of a monocrystalline silicon substrate

Центральным элементом термодинамического подхода к оценке поверхностных свойств твердых тел является взаимосвязь краевого угла смачивания с работой адгезии, описываемая уравнением Дюпре – Юнга. Исходя из этого уравнения, работа адгезии W_a выражается через поверхностное натяжение тестовой жидкости γ_l и краевой угол θ : $W_a = \gamma_l(1 + \cos\theta)$. Тестовой жидкостью в проводимом исследовании выступала дистиллированная вода. Уравнение Дюпре – Юнга

служит основой для всех современных моделей определения поверхностной энергии твердых тел, так как позволяет перейти от измеренных контактных углов к расчету энергии межфазных взаимодействий, что, в конечном итоге, дает возможность оценить и саму поверхностную энергию твердого тела [10].

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам экспериментальных исследований были получены зависимости параметров шероховатости R_a , R_q и R_z поверхности подложки Si от времени очистки и мощности ВЧ-источника (рис. 3), которые позволяют сделать вывод о применимости высокоплотной индуктивно-связанной плазмы аргона для очистки подложек монокристаллического кремния: показана возможность уменьшения значений параметров шероховатости ниже исходных (соответствуют нулю по оси абсцисс). Данный эффект достигает наименьших величин при режиме с мощностью разряда 300 Вт и длительностью обработки поверхности 60 с. Этот режим оказывает минимальное влияние на поверхность, в основном взаимодействуя лишь с имеющимися на ней инородными элементами.

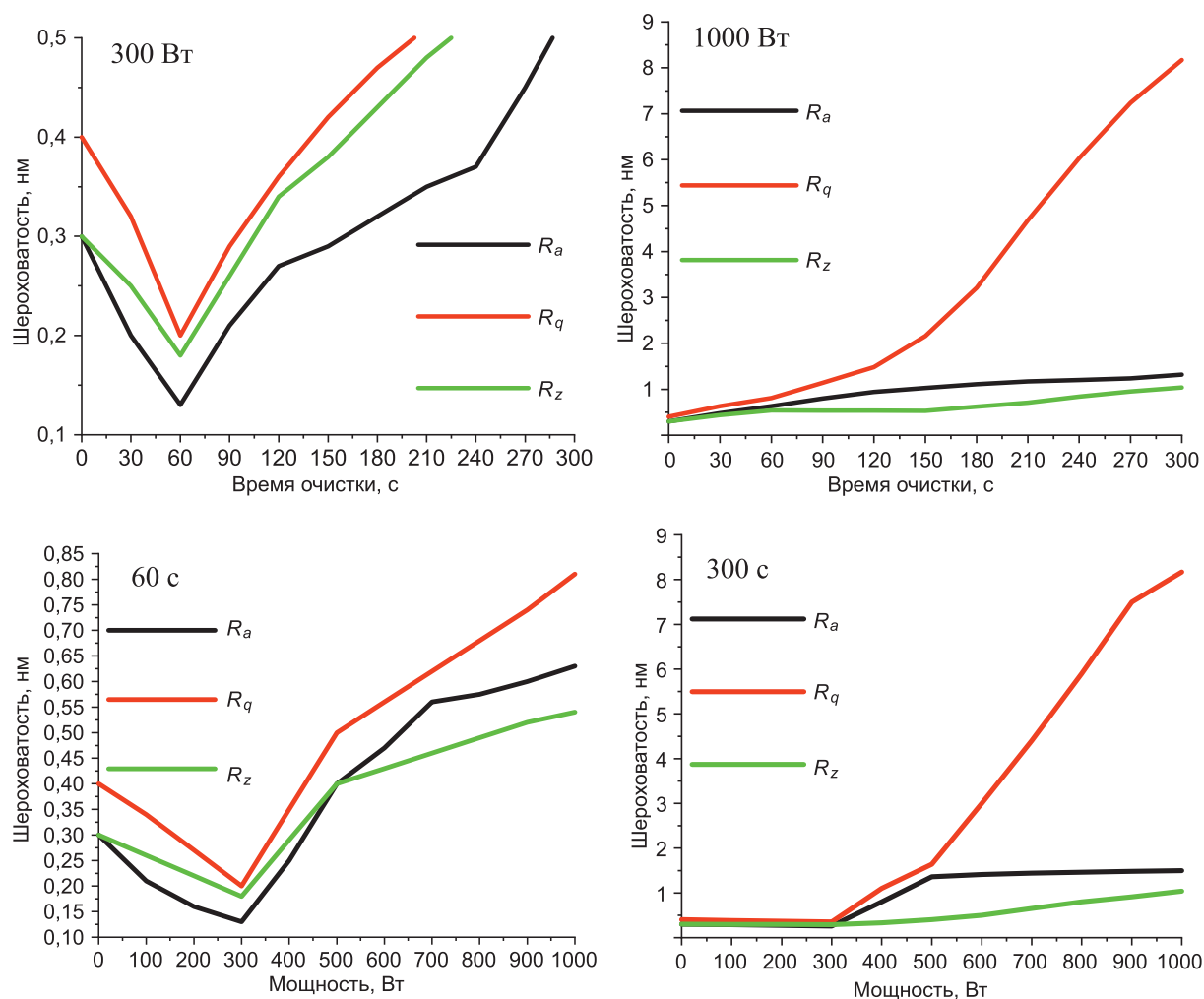


Рис. 3. Зависимость параметров шероховатости поверхности кремниевой подложки от времени очистки и мощности ВЧ-источника

Fig. 3. Dependence of silicon substrate surface roughness parameters on cleaning time and RF source power

Установлено, что уменьшение мощности приводит к увеличению длительности очистки. Напротив, при увеличении мощности разряда можно предположить появление значительного взаимодействия высокоплотной плазмы непосредственно с поверхностью подложки, приводящего к увеличению значений параметров шероховатости. В рассматриваемом случае при длительности более 150 с наблюдалось увеличение изменения параметра R_q на порядок по сравнению с изме-

нениями в режимах до 1000 Вт. Это указывает на появление множества дефектов на поверхности, за счет чего среднеквадратичная шероховатость начинает расти значительно быстрее. Также данный факт подтверждается большим значением R_z на начальных этапах очистки.

Исследовали изменение краевого угла смачивания в зависимости от режимов очистки поверхности Si. На основе полученных данных и уравнения Дюпре – Юнга проводили оценку работы адгезии на границе раздела фаз. Зависимости краевого угла смачивания и работы адгезии поверхности монокристаллического кремния от времени очистки высокоплотной индуктивно-связанной плазмой в среде аргона и мощности ВЧ-разряда приведены на рис. 4.

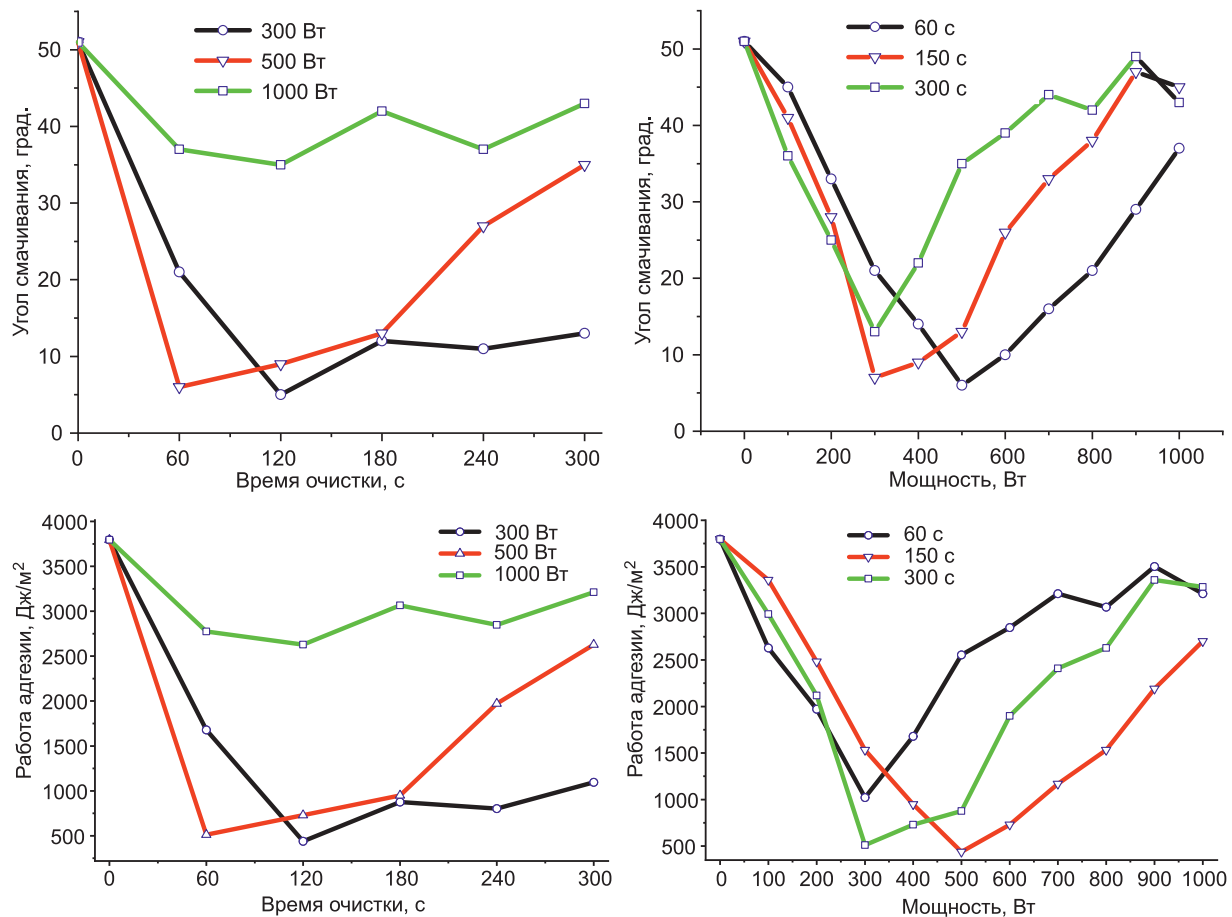


Рис. 4. Зависимость краевого угла смачивания и работы адгезии поверхности монокристаллического кремния от времени очистки и мощности ВЧ-разряда

Fig. 4. Dependence of the contact angle of wetting and the work of adhesion of the surface of monocrystalline silicon on the cleaning time and the power of the RF discharge

При всех длительностях обработки зависимости имеют нелинейный характер и демонстрируют выраженный минимум, соответствующий эффективной очистке и активации поверхности. Наблюдается резкое уменьшение значения работы адгезии на границе раздела фаз в течение первой минуты обработки. Также отмечен минимум значения работы адгезии в зависимости от величины мощности ВЧ-разряда. В частности, в случае мощности ВЧ-источника 500 Вт и более достижение минимума происходит в течение 60 с, а при уменьшении мощности разряда до 300 Вт минимальная работа адгезии достигается при длительности очистки порядка 120 с. Дальнейшее уменьшение мощности разряда продолжает эту тенденцию, в связи с чем режимы с мощностью до 300 Вт можно признать нецелесообразными для очистки поверхностей подложек монокристаллического кремния.

Анализ зависимостей краевого угла смачивания и работы адгезии от времени очистки и мощности ВЧ-разряда на рис. 4 указывает на возможность получения минимальных значений при определенных режимах: 5° – 6° и 500 Дж/м^2 при 60–120 с взаимодействия плазмы с поверхностью и при мощности 300–500 Вт. При увеличении мощности ВЧ-разряда до 1000 Вт и/или дли-

тельности очистки более 150 с происходит увеличение значений шероховатости обрабатываемой поверхности, что может быть обусловлено ее значительным повреждением [11].

Полученные данные доказывают эффективность высокоплотной индуктивно-связанной плазмы для очистки поверхности от органических загрязнений и ее активации. При этом длительность процесса обработки остается небольшой для устранения влияния плазмы непосредственно на подложку монокристаллического кремния. Данный эффект обусловлен комплексом физико-химических процессов, происходящих на поверхности подложки при воздействии высокоплотной индуктивно-связанной плазмой и ее производными.

Основным механизмом, приводящим к уменьшению шероховатости поверхности подложки монокристаллического кремния, ее краевого угла смачивания и, как следствие, работы адгезии, является удаление органических загрязнений, неизбежно присутствующих на кремниевой поверхности после хранения в атмосфере и подготовки к обработке. Эти загрязнения обладают гидрофобными свойствами и способствуют увеличению угла смачивания. При воздействии на обрабатываемую подложку монокристаллического кремния высокоплотной индуктивно-связанной плазмой в среде аргона происходит взаимодействие поверхности подложки и ионов Ar^+ , что приводит к диссоциации молекул загрязнений и их десорбции из подложки в объем плазмы [12–14]. Кроме того, несмотря на обработку в вакууме, полностью исключить образование гидрофильных групп за счет взаимодействия остаточной влаги или атмосферного кислорода, сорбированного на поверхности подложки, с активными плазменными частицами в результате плазменной обработки невозможно. При воздействии высокоплотной плазмой происходит активация поверхности кремния [15]. Это приводит к увеличению поверхностной энергии и, как следствие, к уменьшению значения краевого угла смачивания.

Заключение

1. Проведено комплексное исследование влияния режимов очистки в высокоплотной индуктивно-связанной плазме аргона на параметры шероховатости и энергию поверхности подложек монокристаллического кремния. Использование атомно-силовой микроскопии позволило определить оптимальные условия обработки, при которых достигается минимальная шероховатость без повреждения исходной поверхности, что особенно важно для последующего нанесения ультратонких покрытий. Определено, что при малых мощностях (до 300 Вт) воздействие плазмы минимально и ограничивается удалением загрязнений. Энергия более 500 Вт инициирует рост шероховатости.

2. Результаты измерения краевого угла смачивания и последующие расчеты работы адгезии позволили подтвердить эффективность плазменной очистки для активации поверхности. Наиболее существенное уменьшение угла смачивания до 5° – 6° и минимальная величина работы адгезии поверхности (438 и 511 Дж/м) достигаются при мощности 300–500 Вт и времени обработки в диапазоне 60–120 с. Дальнейшее увеличение времени и мощности увеличивает угол смачивания, значение работы адгезии и параметры шероховатости поверхности монокристаллического кремния.

3. Выявленные зависимости позволяют точно настраивать режимы очистки согласно требуемым целям, таким как достижение планарности при минимальных значениях шероховатости поверхности или создание более развитых поверхностей за счет увеличения мощности и длительности процесса очистки. Практическая значимость исследований заключается в повышении воспроизводимости и качества обработки подложек монокристаллического кремния, что особенно важно для микроэлектроники.

Список литературы

1. A Review of Silicon-Based Wafer Bonding Processes, an Approach to Realize the Monolithic Integration of Si-CMOS and III–V-on-Si Wafers / S. Y. Bao [et al.] // Journal of Semiconductors. 2021. Vol. 42, Iss. 2. P. 023–106. <http://doi.org/10.1088/1674-4926/42/2/023106>.
2. Koichiro, S. Influence of Silicon-Wafer Loading Ambients in an Oxidation Furnace on the Gate Oxide Degradation Due to Organic Contamination / S. Koichiro, H. Takeshi // Applied Physics Letters. 1997. Vol. 71, No 25. P. 3670–3672.

3. Removal Efficiency of Organic Contaminants on Si Wafer Surfaces by the N₂O ECR Plasma Technique / D. K. Kim [et al.] // *Materials Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 91, Iss. 2. P. 490–493.
4. Hattori, T. Chemical Contamination Control in ULSI Wafer Processing / T. Hattori // *AIP Conference Proceedings*. 2001. Vol. 550. P. 275–284. <https://doi.org/10.1063/1.1354411>.
5. Bera, B. Silicon Wafer Cleaning: A Fundamental and Critical Step in Semiconductor Fabrication Process / B. Bera // *International Journal of Applied Nanotechnology*. 2019. Vol. 5, Iss. 1. P. 8–13.
6. Sammut, S. A. Comprehensive Review of Plasma Cleaning Processes Used in Semiconductor Packaging / S. A. Sammut // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No 13. <https://doi.org/10.3390/app15137361>.
7. Cheng, Y. L. Plasma Damage on Low-k Dielectric Materials / Y. L. Cheng, C. Y. Lee, C. W. Haung // *Plasma Science and Technology*. 2018. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.79494>.
8. Argon Plasma Improves the Tissue Integration and Angiogenesis of Subcutaneous Implants by Modifying Surface Chemistry and Topography / M. Griffin [et al.] // *International Journal of Nanomedicine*. 2019. Vol. 14. P. 1993–1994. <https://doi.org/10.2147/IJN.S206850>.
9. ICP Polishing of Silicon for High-Quality Optical Resonators on a Chip / A. Laliotis [et al.] // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2012. Vol. 22, No 12. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/22/12/125011>.
10. Karbowski, T. Importance of Surface Tension Characterization for Food, Pharmaceutical and Packaging Products: A Review / T. Karbowski, F. Debeaufort, A. Voilley // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition References*. 2006. Vol. 46, No 5. P. 391–407.
11. Hess, D. W. Plasma Stripping, Cleaning, and Surface Conditioning. *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology*. 3rd ed. / D. W. Hess, A. K. Reinhardt // William Andrew Publishing. 2018. P. 379–455.
12. Two Modes of Surface Roughening During Plasma Etching of Silicon: Role of Ionized Etch Products / N. Nobuya [et al.] // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 116. P. 223–302.
13. Alam, A. U. The Effects of Oxygen Plasma and Humidity on Surface Roughness, Water Contact Angle and Hardness of Silicon, Silicon Dioxide and Glass / A. U. Alam, M. Howlader, M. J. Deen // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2014. Vol. 24, No 3. P. 10–35.
14. Lieberman, M. A. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* / M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2005.
15. Belford, R. E. Surface Activation Using Remote Plasma for Hydrophilic Bonding at Elevated Temperature / R. E. Belford, S. Sood // *Electrochemical and Solid State Letters*. 2007. Vol. 10, No 5. DOI: 10.1149/1.2709397.

Поступила 07.04.2026

Принята в печать 04.05.2026

References

1. Bao S. Y., Wang Y., Lina K., Zhang L., Wang B., Sasangka W. A., et al. (2021) A Review of Silicon-Based Wafer Bonding Processes, an Approach to Realize the Monolithic Integration of Si-CMOS and III–V-on-Si Wafers. *Journal of Semiconductors*. 42 (2), 023–106. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/42/2/023106>.
2. Koichiro S., Takeshi H. (1997) Influence of Silicon-Wafer Loading Ambients in an Oxidation Furnace on the Gate Oxide Degradation Due to Organic Contamination. *Applied Physics Letters*. 71 (25), 3670–3672.
3. Kim D. K., Park Y. K., Biswas S., Lee C. (2005) Removal Efficiency of Organic Contaminants on Si Wafer Surfaces by the N₂O ECR Plasma Technique. *Materials Chemistry and Physics*. 91 (2), 490–493.
4. Hattori T. (2001) Chemical Contamination Control in ULSI Wafer Processing. *AIP Conference Proceedings*. 550, 275–284. <https://doi.org/10.1063/1.1354411>.
5. Bera B. (2019) Silicon Wafer Cleaning: A Fundamental and Critical Step in Semiconductor Fabrication Process. *International Journal of Applied Nanotechnology*. 5 (1), 8–13.
6. Sammut S. A. (2025) Comprehensive Review of Plasma Cleaning Processes Used in Semiconductor Packaging. *Applied Sciences*. 15 (13). <https://doi.org/10.3390/app15137361>.
7. Cheng Y. L., Lee C. Y., Haung C. W. (2019) Plasma Damage on Low-k Dielectric Materials. *Plasma Science and Technology*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.79494>.
8. Griffin M., Palgrave R., Baldovino-Medrano V. G., Butler P. E., Kalaskar D. M. (2019) Argon Plasma Improves the Tissue Integration and Angiogenesis of Subcutaneous Implants by Modifying Surface Chemistry and Topography. *International Journal of Nanomedicine*. 14, 1993–1994. <https://doi.org/10.2147/IJN.S206850>.
9. Laliotis A., Trupke M., Cotter J. P., Lewis G., Kraft M., Hinds E. A. (2012) ICP Polishing of Silicon for High-Quality Optical Resonators on a Chip. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 22 (12). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/22/12/125011>.
10. Karbowski T., Debeaufort F., Voilley A. (2006) Importance of Surface Tension Characterization for Food, Pharmaceutical and Packaging Products: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition References*. 46 (5), 391–407.

11. Hess D. W., Reinhardt A. K. (2018) Plasma Stripping, Cleaning, and Surface Conditioning. Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology. 3rd ed. *William Andrew Publishing*. 379–455.
12. Nobuya N., Hirota T., Yoshinori T., Koji E., Kouich O. (2014) Two Modes of Surface Roughening During Plasma Etching of Silicon: Role of Ionized Etch Products. *Journal of Applied Physics*. 116, 223–302.
13. Alam A. U., Howlader M., Deen M. J. (2014) The Effects of Oxygen Plasma and Humidity on Surface Roughness, Water Contact Angle and Hardness of Silicon, Silicon Dioxide and Glass. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 24 (3), 10–35.
14. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. (2005) *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. USA, John Wiley and Sons, Inc. Publ.
15. Belford R. E., Sood S. (2007) Surface Activation Using Remote Plasma for Hydrophilic Bonding at Elevated Temperature. *Electrochemical and Solid State Letters*. 10 (5). DOI: 10.1149/1.2709397.

Received: 7 April 2026

Accepted: 4 May 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Логунов К. Т., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, зам. декана факультета радиотехники и электроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Михолап А. А., студент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-91
E-mail: k.logunov@bsuir.by
Логунов Константин Тимофеевич

Information about the authors

Logunov K., Postgraduate of Micro- and Nanoelectronics Department, Deputy Dean of the Faculty of Radio Engineering and Electronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Mikholap A., Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-91
E-mail: k.logunov@bsuir.by
Logunov Konstantin



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-52-60>

УДК 539.25, 538.91, 538.97

СИНТЕЗ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ МЕТОДОМ ICPCVD

Н. С. КОВАЛЬЧУК¹, С. А. ДЕМИДОВИЧ¹, Л. А. ВЛАСУКОВА², И. Н. ПАРХОМЕНКО²

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

²Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Приведены результаты исследования уровня остаточных механических напряжений и стойкости к обработке в кислотных и щелочных травителях пленок SiN_x, полученных методом плазменно-активируемого осаждения из газовой фазы в реакторе индуктивно-связанной плазмы. Процесс осаждения проводился из смеси газов SiH₄-N₂-Ar-He при 400–500 °С. Обычно осаждение диэлектрических пленок в плазме высокой плотности осуществляется при давлении в рабочей камере в диапазоне 0,13–4,00 Па. В проведенных исследованиях за счет увеличения давления до 12–18 Па удалось существенно снизить уровень остаточных механических напряжений в пленках SiN_x. При этом компактная микроструктура пленок обеспечивала их высокую химическую стойкость. Значения показателя преломления пленок варьировали от 2,06 до 1,93 в зависимости от режима осаждения. Скорость травления пленок в 50%-ной фтористоводородной кислоте составляла 25–32 нм/мин, что сравнимо со значениями для нитридных пленок, полученных высокотемпературным методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении. Синтезированные пленки SiN_x также были устойчивы к воздействию 40%-ного раствора гидроксида калия при 90 °С.

Ключевые слова: пленки SiN_x, индуктивно-связанная плазма, механические напряжения, жидкостное травление, фтористоводородная кислота, гидроксид калия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Синтез пленок нитрида кремния с улучшенными механическими и химическими свойствами методом ICPCVD / Н. С. Ковальчук [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 52–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-52-60>.

SYNTHESIS OF SILICON NITRIDE FILMS WITH IMPROVED MECHANICAL AND CHEMICAL PROPERTIES BY ICPCVD METHOD

NATALIA KOVAL'CHUK¹, SERGEY DEMIDOVICH¹, LIUDMILA VLASUKOVA²,
IRINA PARKHOMENKO²

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

²Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of a study of the residual mechanical stress level and resistance to processing in acid and alkaline etchants of SiN_x films obtained by plasma-activated vapor deposition in an inductively coupled plasma reactor. The deposition process was carried out from a SiH₄-N₂-Ar-He gas mixture at 400–500 °С. Typically, the deposition of dielectric films in high-density plasma is carried out at a pressure in the working chamber in the range of 0.13–4.00 Pa. In the conducted studies, by increasing the pressure to 12–18 Pa, it was possible to significantly reduce the level of residual mechanical stresses in the SiN_x films. At the same time, the compact microstructure of the films ensured their high chemical resistance. The refractive index of the films varied from 2.06 to 1.93, depending on the deposition mode. The etching rate of the films in 50 % hydrofluoric acid was 25–32 nm/min, which was comparable to values for nitride films obtained by high-temperature chemical vapor deposition at low pressure. The synthesized SiN_x films were also resistant to exposure to a 40 % potassium hydroxide solution at 90 °С.

Keywords: SiN_x films, inductively coupled plasma, mechanical stresses, wet etching, hydrofluoric acid, potassium hydroxide.

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

For citation. Koval'chuk N., Demidovich S., Vlasukova L., Parkhomenko I. (2026) Synthesis of Silicon Nitride Films with Improved Mechanical and Chemical Properties by ICPCVD Method. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 52–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-52-60> (in Russian).

Введение

Нитрид кремния (SiN_x) – ключевой диэлектрический материал в микроэлектронике, используемый при производстве МЭМС-датчиков (для микроэлектромеханических систем), оптоэлектронных и КМОП-приборов [1]. Традиционно пленки SiN_x получают методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) или методом плазменно-активированного осаждения из газовой фазы (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD). Методом LPCVD при 750–800 °С получают пленки стехиометрического состава (Si₃N₄). Плазменная активация процесса осаждения позволяет снизить температуру синтеза SiN_x до 200–400 °С, при этом в качестве газов-прекурсоров используются моносилан (SiH₄) и аммиак (NH₃). Недостатком PECVD-метода является высокая (до 40 ат.%) концентрация водорода в пленках в виде связей Si–H и N–H. Это снижает плотность и химическую стойкость пленок и ухудшает характеристики приборов [2, 3]. Устойчивость нитридных пленок к травлению в кислотах и щелочах критична, если их используют как «стоп-слои» [4]. Синтез SiN_x с пониженным содержанием водорода (8–10 ат.%) и составом, близким к стехиометрическому, при температурах 200–400 °С возможен в плазме высокой плотности, в которой скорость диссоциации N₂ достаточно высока, чтобы использовать его в качестве прекурсора вместо NH₃ для снижения концентрации водорода в растущей пленке.

Для создания плазмы высокой плотности используется метод химического осаждения из газовой фазы с индуктивно-связанной плазмой (Inductively-Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition, ICPCVD). Показателем качества нитридных пленок является скорость их травления $v_{\text{травл}}$ в растворах фтористоводородной кислоты (HF) и гидроксида калия (KOH). Существует корреляция между $v_{\text{травл}}$ в HF и плотностью SiN_x [5], что позволяет качественно оценивать плотность нитридных пленок по скорости травления в 50%-ном водном растворе HF. Процессы травления в кислотных и щелочных травителях и их связь с режимами осаждения и физическими свойствами пленок PECVD-SiN_x исследованы в [2, 4, 6, 7]. Однако данных по химической стойкости пленок SiN_x, полученных в плазме высокой плотности из смеси SiH₄+N₂, в литературе немного.

В [8] изучалась устойчивость ICPCVD-SiN_x к HF в зависимости от соотношения SiH₄/N₂, мощности ICP-электрода и давления в рабочей камере. Показано, что устойчивость к травителю высока при малых скоростях осаждения SiN_x (~10 нм/мин), что связывается с более компактной микроструктурой пленок. Осаждение нитридных пленок в [8] проводилось при давлениях в рабочей камере 0,5–1,3 Па. В [9] показано, что увеличение давления в камере до 2,5–3,5 Па способствует уплотнению микроструктуры пленок SiN_x и устраняет дрейф остаточных напряжений со временем. Уровень механических напряжений в нитридных пленках имеет существенное значение для ряда применений. Так, для использования в МЭМС необходимы нитридные пленки с минимизированными напряжениями [10]. С другой стороны, пленки нитрида кремния с высокими растягивающими напряжениями улучшают подвижность носителей заряда в полевых транзисторах (MOSFET) [11].

С учетом вышесказанного выполнена оценка параметров нитридных пленок, полученных методом ICPCVD в условиях повышенного давления в реакционной камере. Исследованы механические напряжения, показатель преломления и стойкость к обработке в растворах HF и KOH для пленок ICPCVD-SiN_x, осажденных при давлениях в рабочей камере до 18 Па. Цель проведенных экспериментов – получение нитрида кремния с низким уровнем механических напряжений для использования в изделиях МЭМС, а также в качестве маски при травлении в кислотах и щелочах.

Методика проведения эксперимента

Пленки SiN_x осаждались методом химического вакуумного осаждения на установке STE ICP200D (SemiTEq, Санкт-Петербург) при 400 и 500 °С. Пластины кремния КДБ-10 (111)

обрабатывались в растворе Каро (перекисно-сернокислотный раствор), ПАР-5 (перекисно-аммиачный раствор), затем в реакторе проводилась ионная очистка в аргоне в течение 30 с. Расход SiH_4 поддерживался на постоянном уровне $15 \text{ см}^3/\text{мин}$, расход N_2 варьировался от 9 до $11 \text{ см}^3/\text{мин}$. В качестве газа-носителя использовалась смесь аргона и гелия с расходами 350 и $120 \text{ см}^3/\text{мин}$ соответственно. Мощность ИСР-электрода изменялась от 600 до 1200 Вт при частоте 13,56 МГц, давление в камере p варьировалось в диапазоне 5–18 Па.

Визуальный контроль, измерение толщины пленок и контроль рельефа поверхности пластин проводились на конфокальном датчике CFM 100× установки оптической метрологии FRT MicroProf 200 (Германия), для измерения остаточных механических напряжений σ использовался быстрый оптический датчик CWL. Подробно измерение остаточных напряжений описано в [9]. Показатель преломления n измерялся на лазерном эллипсомере ЛЭФ-3М-1. Измерения σ и n выполнялись для пленок толщиной $\sim 100 \text{ нм}$, в особо отмеченных случаях использовались пленки толщиной 1000 нм.

Обработка в 50%-ной HF проводилась при комнатной температуре в течение 120 с, обработка в 40%-ном водном растворе KOH – при 90°C в течение 20 мин. Использовались реагенты квалификации «осч» (особо чистые вещества) и деионизированная вода. Скорость травления определялась по отношению толщины удаленного слоя ко времени травления.

Результаты исследований и их обсуждение

Повышение давления в рабочей камере при прочих равных условиях приводит к существенному уменьшению скорости травления пленки SiN_x в HF. На рис. 1, *a* изображена зависимость скорости травления пленки в HF от давления в реакционной камере при соотношении $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2] = 1,37$ в процессе осаждения. Так, увеличение давления от 5 до 15 Па приводит к уменьшению скорости травления SiN_x в HF почти в четыре раза.

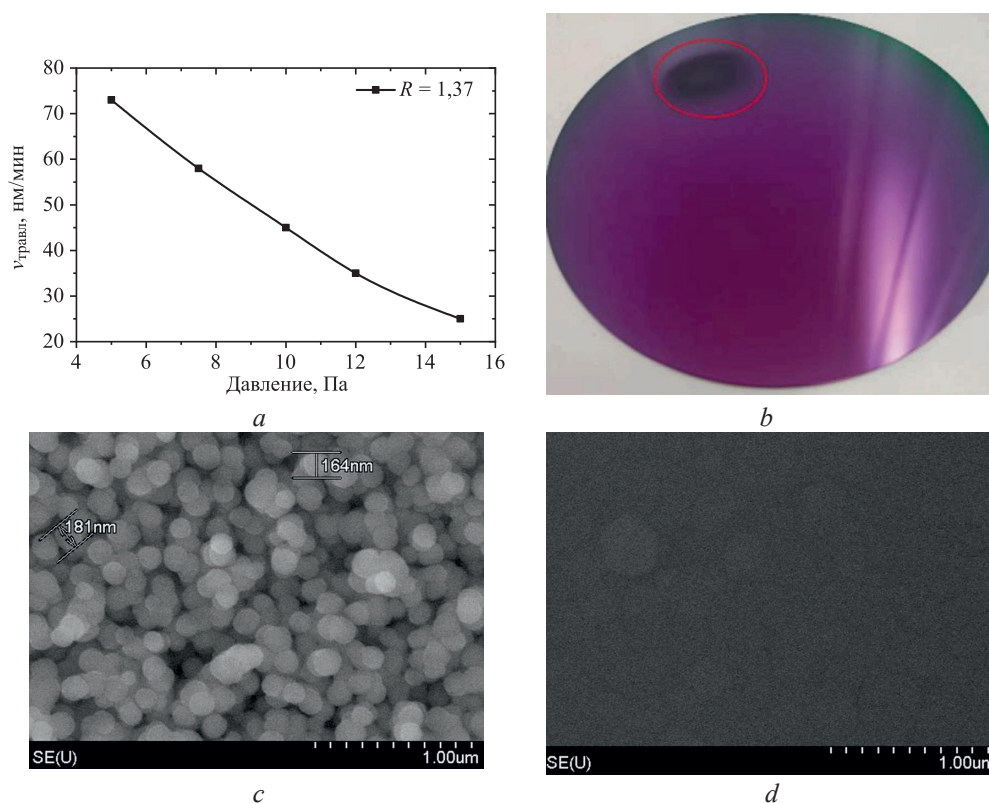


Рис. 1. Зависимость скорости травления SiN_x в HF от давления в реакционной камере (*a*); вид матового пятна на пленке, осажденной при давлении 17,5 Па (*b*) [12]; СЭМ-изображение поверхности пленки в области пятна (*c*) и в чистой области (*d*) [12]
Fig. 1. Dependence of the etching rate of SiN_x in HF on the pressure in the reaction chamber (*a*); appearance of a matte spot on a film deposited at a pressure of 17.5 Pa (*b*) [12]; SEM image of the film surface in the spot region (*c*) and in the clean region (*d*) [12]

Как отмечено в [12], дальнейшее увеличение давления может приводить к появлению на поверхности пленки макродефектов роста в виде матовых пятен (рис. 1, *b*). В этих областях наблюдаются скопления дефектов роста в сочетании с микроотверстиями (рис. 1, *c*) вместо сплошного покрытия, как на бездефектных участках (рис. 1, *d*), а концентрация кислорода существенно выше в сравнении с неповрежденной поверхностью пленки. Увеличение мощности ИСР-источника препятствует появлению матовых пятен. Однако, чем выше рабочее давление, тем большую мощность нужно подавать, чтобы предотвратить появление макродефектов. Таким образом, мы упираемся в «потолок» подаваемой мощности, которую может обеспечить установка.

В экспериментах осаждение пленок проводилось при давлении ≤ 18 Па. Наибольшее влияние на механические напряжения, показатель преломления, скорость роста и травления пленок SiN_x в HF оказывают соотношение реагирующих газов $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2]$ (R) и мощность ИСР-источника. На рис. 2 приведены характеристики пленок SiN_x в зависимости от мощности для различных R и уровней давления в рабочей камере. При $p = 12$ Па мощность источника варьировалась в диапазоне 700–900 Вт, при $p = 15$ Па – от 900 до 1200 Вт.

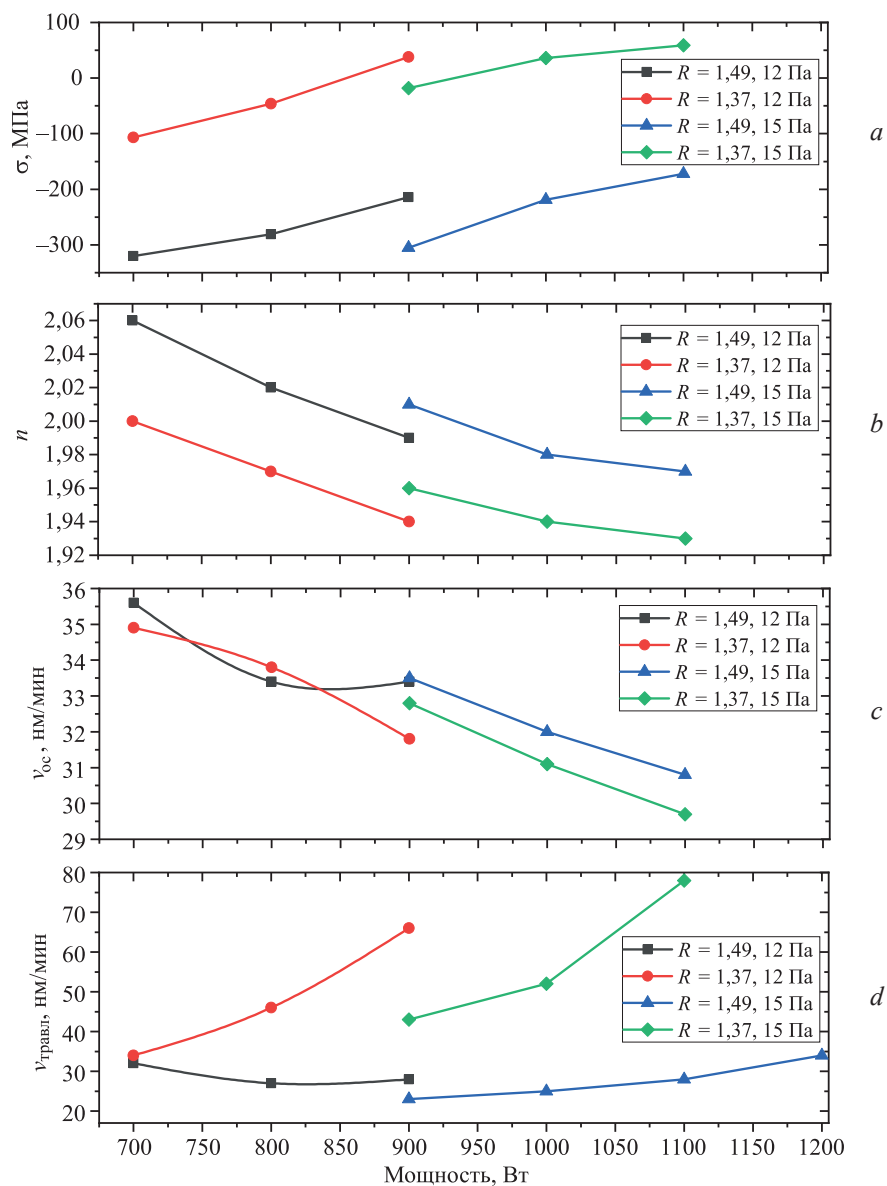


Рис. 2. Зависимость остаточных механических напряжений (*a*), показателя преломления (*b*), скорости осаждения (*c*) и скорости травления в HF (*d*) от мощности ИСР-источника для различных соотношений R и давлений в камере

Fig. 2. Dependence of residual mechanical stresses (*a*), refractive index (*b*), deposition rate (*c*) and etching rate in HF (*d*) on the ICP source power for different R ratios and chamber pressures

Как видно из рис. 2, а, при меньшем R (1,37) напряжения σ минимальны и варьируются от (-100) до (+50) МПа, если процесс проводится при $p = 12$ Па, и от (-25) до (+50) МПа – при $p = 15$ Па. С увеличением мощности источника происходит переход от сжимающих напряжений к растягивающим. С ростом содержания SiH_4 в газовой смеси ($R = 1,49$) сжимающие напряжения возрастают до значений (-300)–(-150) МПа, при этом увеличение мощности источника приводит к уменьшению уровня напряжений. Тенденцию к снижению уровня сжимающих напряжений в пленке и/или изменению знака напряжений (от сжимающих к растягивающим) с повышением мощности источника можно объяснить эффектом бомбардировки поверхности растущей пленки ионами аргона и гелия и активными радикалами азота из газовой смеси. Как показано в [11], обработка в плазме N_2 , аргона или гелия приводит к повышению уровня растягивающих напряжений в PECVD- SiN_x -пленке за счет разрыва связей Si–H и N–H и восстановления связей Si–N. Это запускает химическую перестройку в растущей пленке, приводя к ее уплотнению и сжатию.

Таким образом, плазменная бомбардировка позволяет снизить содержание водорода в растущей пленке. С увеличением мощности источника энергия и концентрация активных частиц в смеси возрастают, усиливая эффект. В рассматриваемом эксперименте за счет увеличения давления в рабочей камере удалось существенно снизить уровень остаточных напряжений в пленках SiN_x в сравнении с данными [1] для PECVD- SiN_x .

Химический состав SiN_x качественно оценивался по показателю преломления. Для стехиометрического материала $n = (2,02 \pm 0,02)$. Большие значения n соответствуют обогащению пленки кремнием, меньшие – обогащению азотом и нежелательными примесями типа водорода и кислорода. В проводимом эксперименте максимальные значения n наблюдались при $R = 1,49$ и составляли 2,06–1,99 при $p = 12$ Па и 2,01–1,97 при $p = 15$ Па. Снижение $[\text{SiH}_4]$ ожидаемо приводило к уменьшению n с минимальными значениями 1,96–1,93 при $p = 15$ Па и $R = 1,37$. Повышение мощности источника уменьшало значения как n , так и соотношения Si/N.

Скорость осаждения пленки при варьировании мощности, давления в камере и соотношения реагентов изменялась незначительно. При $p = 12$ Па ее значения были в диапазоне 35,5–31,5 нм/мин, при $p = 15$ Па она снижалась до минимального значения 29,5 нм/мин при $R = 1,37$ и мощности источника 1100 Вт.

Характер изменения скорости травления нитридных пленок в HF в зависимости от мощности источника определялся соотношением расходов прекурсоров и давлением в камере. При $R = 1,37$ с ростом мощности скорость $v_{\text{травл}}$ увеличивалась от 35 до 65 нм/мин при $p = 12$ Па и от 45 до 80 нм/мин – при $p = 15$ Па. При $R = 1,49$ $v_{\text{травл}}$ изменялась незначительно (от ~25 до 32 нм/мин) во всем исследованном диапазоне мощности. По данным [8], при обработке ICPCVD- SiN_x -пленок в смеси 50%-ной HF и воды (1:7) $v_{\text{травл}} \approx 10$ нм/мин. Такие малые значения получены для пленок с повышенным содержанием кремния, показатель преломления которых варьировался от 2,7 до 2,2. В [13] отмечено, что для пленок ICPCVD- SiN_x $v_{\text{травл}}$ в смеси 50%-ной HF и воды (1:5) также составляла ~10 нм/мин. Нужно учитывать, что в [8, 13] оценивалась устойчивость пленок к разбавленным растворам HF, а в рассматриваемом эксперименте измерялась $v_{\text{травл}}$ в неразбавленной 50%-ной HF.

Скорость травления SiN_x увеличивается линейно с повышением концентрации HF. В [3] показано, что для пленок PECVD- SiN_x , осажденных при 380 °С, $v_{\text{травл}}$ в разбавленной смеси HF(50 %): $\text{H}_2\text{O} = 1:100$ составляла 1–2 нм/мин, а растворение пленки в смеси HF(50 %): $\text{H}_2\text{O} = 1:10$ происходило со скоростью 10–17 нм/мин. Для сравнения, $v_{\text{травл}}$ в 50%-ной HF для LPCVD-пленок, полученных при температурах 700–900 °С, и полученных методом PECVD при 350 °С, составляют 8 и 150–300 нм/мин соответственно [14]. Таким образом, в рассматриваемом эксперименте при $p = 15$ Па, $R = 1,49$ и температуре осаждения 400 °С получены пленки с повышенной стойкостью к HF, сравнимой со стойкостью LPCVD-пленок.

При использовании SiN_x в качестве маски для глубокого травления кремния применяют травители на основе KOH [7, 15]. Одной из проблем при этом является неконтролируемое травление через микропоры в маскирующем покрытии нитрида кремния. При обработке раствор щелочи проникает через микроотверстия в пленке к поверхности подложки и начинает травить кремний с образованием локальных областей травления, форма которых определяется кристаллографической ориентацией подложки. В проводимом исследовании химическая стойкость пленок SiN_x к раствору KOH оценивалась из анализа количества локальных областей травления кремния на единицу площади, их размеров и глубины. Толщина пленок SiN_x в этом случае составляла ~1000 нм. Следует отметить, что под воздействием щелочи области матовых пятен (рис. 1, б)

на пленках нитрида кремния разрушаются гораздо быстрее в сравнении неповрежденными участками пленки.

В табл. 1 приведены результаты травления в KOH в зависимости от режимов формирования пленок SiN_x: лучшими по устойчивости к воздействию щелочи оказались пленки SiN_x, полученные при P = 16 Па и T_{осажд} = 500 °С. Соотношение SiH₄/N₂ в меньшей степени влияет на устойчивость нитрида кремния к щелочи. Однако увеличение содержания кремния в пленке улучшает ее химическую стойкость.

Таблица 1. Результаты травления пленок SiN_x в растворе 40%-ного KOH (90 °С, 20 мин) в зависимости от режимов осаждения

Table 1. Results of etching SiN_x films in a 40 % KOH solution (90 °C, 20 min) depending on the deposition modes

Номер режима	SiH ₄ /N ₂	p, Па	T _{осажд} , °С	Результат травления
1	1,67	18	500	Скопление локальных областей травления различных размеров, но не более 20 мкм
2	1,49	18	500	Единичные локальные области травления размером <7 мкм
3	1,49	15	400	
4	1,37	16	500	
5	1,49	15	400	
6	1,49	16	500	Локальных областей травления на поверхности кремния не обнаружено
7	1,67	16	500	

Примечание – Для всех режимов мощность источника составляла 1000 Вт.

Следует отметить, что оптимальные по стойкости к воздействию раствора щелочи режимы осаждения нитридных пленок сходны с режимами, для которых наблюдались минимальные скорости растворения SiN_x в 50%-ной HF. Показатели для режимов из табл. 1 показаны на рис. 3.

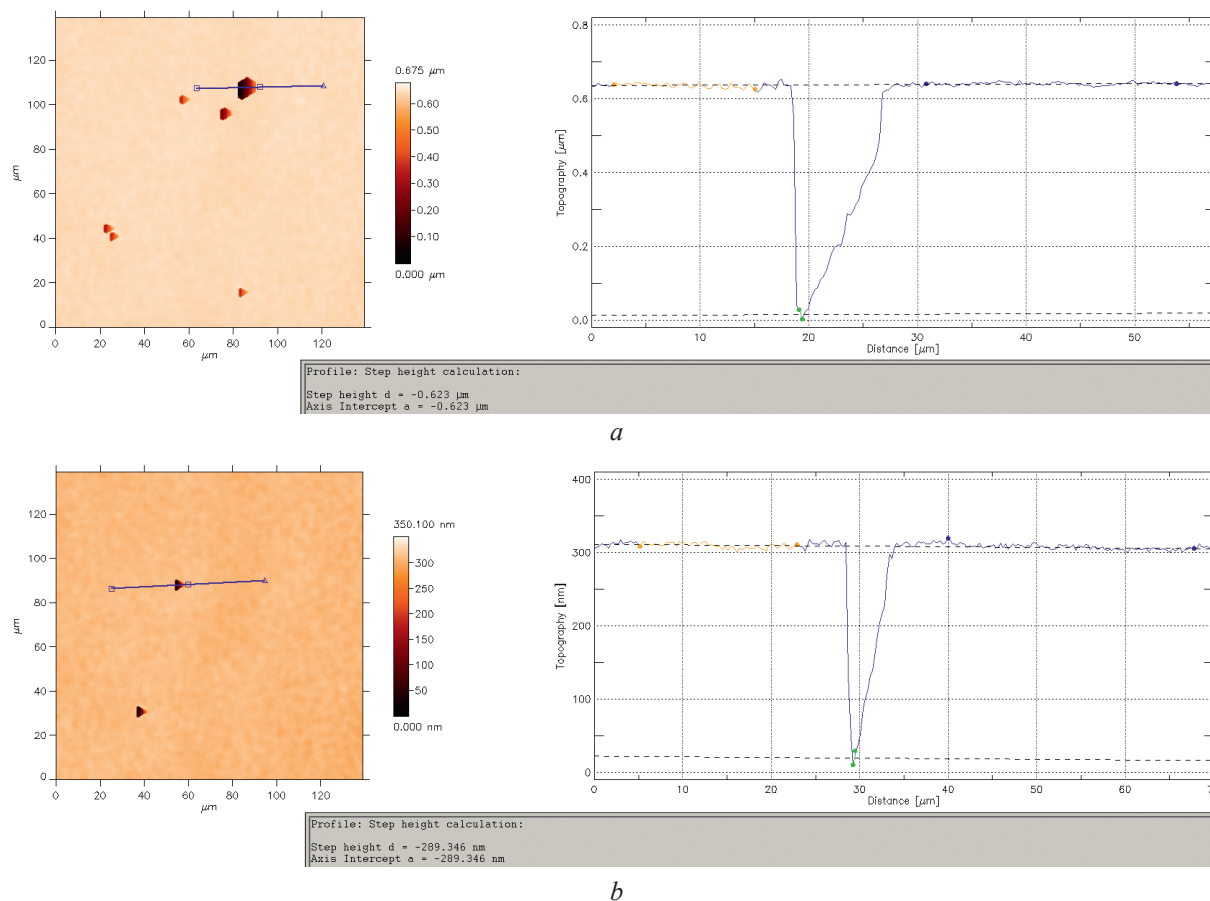


Рис. 3. Вид поверхности кремния после травления и профили поверхности для режимов из табл. 1: а – № 1; б – № 2–5

Fig. 3. Appearance of the silicon surface after etching and surface profiles for the modes from Tabl. 1: а – No 1; б – No 2–5

Заключение

1. Исследованы параметры нитридных пленок, полученных в плазме высокой плотности методом плазменно-активируемого осаждения из газовой фазы с индуктивно-связанной плазмой в условиях повышенного (12–18 Па) давления в рабочей камере при 400–500 °С. Определены режимы осаждения нитрида кремния с малыми механическими напряжениями. Показано, что при соотношении реагирующих газов $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2] = 1,37$ остаточные напряжения в пленке нитрида минимальны и варьируются от (–100) до (+50) МПа, если процесс проводится при давлении 12 Па, и от (–25) до (+50) МПа – при 15 Па. С повышением мощности источника наблюдается переход от сжимающих напряжений к растягивающим. При $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2] = 1,49$ и температуре осаждения 400 °С скорость травления SiN_x в 50%-ном растворе фтористоводородной кислоты составляла 25–32 нм/мин, что сравнимо с результатами для пленок, полученных методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении и температуре 700–900 °С. Лучшими по устойчивости к воздействию щелочи оказались пленки SiN_x , полученные при мощности ICP-источника 1000 Вт, рабочем давлении 16 Па и температуре 500 °С.

2. Использование метода плазменно-активируемого осаждения из газовой фазы с индуктивно-связанной плазмой в условиях повышенного давления в рабочей камере позволяет получать пленки SiN_x с компактной микроструктурой, пригодные для применения в качестве как конструкционного материала в МЭМС-датчиках, так и маски при травлении в растворах фтористоводородной кислоты и гидроксида калия.

Список литературы

1. Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: State-of-the-Art Processing Technologies, Properties, and Applications / A. E. Kaloyeros [et al.] // ECS J. of Solid-State Science and Technology. 2020. Vol. 9. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/aba447>.
2. Васильев, В. Ю. Технология получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Ч. 8. Влияние водорода в пленках на их свойства / В. Ю. Васильев // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. С. 352–367. <https://doi.org/10.17587/nmst.21.352-367>.
3. Differences in HF Wet Etching Resistance of PECVD $\text{SiN}_x\text{:H}$ Thin Films / M. Barcellona [et al.] // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 306. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128023>.
4. Investigation of the Physical Properties of Plasma Enhanced Atomic Layer Deposited Silicon Nitride as Etch Stopper / H. S. Kim [et al.] // ACS Applied Materials & Interfaces. 2018. Vol. 10. P. 44825–44833. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b15291>.
5. Correlation of Film Density and Wet Etch Rate in Hydrofluoric Acid of Plasma Enhanced Atomic Layer Deposited Silicon Nitride / J. Provine [et al.] // AIP Advances. 2016. Vol. 6. <https://doi.org/10.1063/1.4954238>.
6. Dependence of Wet Etch Rate on Deposition, Annealing Conditions and Etchants for PECVD Silicon Nitride Film / T. Longjuan [et al.] // Journal of Semiconductors. 2009. Vol. 30. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/30/9/096005>.
7. Improved PECVD Si_xN_y Film as a Mask Layer for Deep Wet Etching of the Silicon / J. Han [et al.] // Materials Research Express. 2017. Vol. 4. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa8782>.
8. Fundamental Properties of a- $\text{SiN}_x\text{:H}$ Thin Films Deposited by ICP-PECVD for MEMS Applications / D. Dergez [et al.] // Applied Surface Science. 2013. Vol. 84. P. 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.104>.
9. Механические напряжения в пленках SiN_x при химическом осаждении из газовой фазы в плазме высокой плотности / Н. С. Ковальчук [и др.] // Неорганические материалы. 2022. Т. 58. С. 938–944. <https://doi.org/10.31857/S0002337X2209007X>.
10. The Impact of Residual Stress on Resonating Piezoelectric Devices / G. Ross [et al.] // Materials and Design. 2020. Vol. 196. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109126>.
11. Comparative Study on the Influence Mechanism of He/Ar/ N_2 Plasma Treatments on the High Tensile Stress of a Multilayer Silicon Nitride Film / J. Ning [et al.] // RSC Advances. 2025. Vol. 15. <https://doi.org/10.1039/d5ra02111a>.
12. Демидович, С. А. Особенности нанесения пленок SiN_x методом ICP CVD в области повышенного давления / С. А. Демидович, А. Д. Юник // Электронные системы и технологии: сб. матер. 60-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апр. 2024 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2024. С. 254–257.
13. Multifunctional ICP-PECVD Silicon Nitride Layers for High-Efficiency Silicon Solar Cell Applications / J. Engelhardt [et al.] // Energy Procedia. 2015. Vol. 77. P. 786–790. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.111>.

14. LPCVD and PECVD Silicon Nitride for Microelectronics Technology / B. C. Joshi [et al.] // *Indian Journal Engineering and Material Sciences*. 2000. Vol. 7. P. 303–309.
15. Fabrication of Free-Standing Nanoscale SiN_x Membranes with Enhanced Burst Pressure Via Improved Etching Process / H.-J. Shin [et al.] // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol. 297. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111538>.

Поступила 18.03.2026

Принята в печать 15.04.2026

References

1. Kaloyeros A. E., Pan Y., Goff J., Arkles B. (2020) Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: State-of-the-Art Processing Technologies, Properties, and Applications. *ECS J. of Solid-State Science and Technology*. 9. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/aba447>.
2. Vasilyev V. Yu. (2019) Silicon Nitride Thin Film Deposition for Microelectronics and Microsystems Technologies. Part 8. Hydrogen Influence on Basic Film Properties. *Nano- and Microsystems Technology*. 21, 352–367. <https://doi.org/10.17587/nmst.21.352-367> (in Russian).
3. Barcellona M., Samperi O., Russo D., Battaglia A., Fischer D. (2023) Differences in HF Wet Etching Resistance of PECVD SiN_x:H Thin Films *Materials Chemistry and Physics*. 306. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128023>.
4. Kim H. S., Meng X., Kim S. J., Lucero A. T., Cheng L., Byun Y.-Ch., et al. (2018) Investigation of the Physical Properties of Plasma Enhanced Atomic Layer Deposited Silicon Nitride as Etch Stopper. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 10, 44825–44833. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b15291>.
5. Provine J., Schindler P., Kim Y., Walch S. P., Kim H. J., Kim K.-H., et al. (2016) Correlation of Film Density and Wet Etch Rate in Hydrofluoric Acid of Plasma Enhanced Atomic Layer Deposited Silicon Nitride. *AIP Advances*. 6. <https://doi.org/10.1063/1.4954238>.
6. Longjuan T., Yinfang Z., Jinling Y., Yan L., Wei Z., Jing X., et al. (2009) Dependence of Wet Etch Rate on Deposition, Annealing Conditions and Etchants for PECVD Silicon Nitride Film. *Journal of Semiconductors*. 30. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/30/9/096005>.
7. Han J., Yin Y. J., Han D., Dong L. Z. (2017) Improved PECVD Si_xN_y Film as a Mask Layer for Deep Wet Etching of the Silicon. *Materials Research Express*. 4. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa8782>.
8. Dergez D., Schalko J., Bittner A., Schmid U. (2013) Fundamental Properties of a-SiN_x:H Thin Films Deposited by ICP-PECVD for MEMS Applications. *Applied Surface Science*. 84, 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.104>.
9. Koval'chuk N. S., Demidovich S. A., Vlasukova L. A., Parkhomenko I. N., Komarov F. F. (2022) Mechanical Stress in SiN_x Films Grown by High Density Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition. *Inorganic Materials*. 58, 906–911. <https://doi.org/10.1134/S0020168522090072> (in Russian).
10. Ross G., Dong H., Karuthedath C. B., Sebastian A. Th., Pensala T., Paulasto-Krücke M. (2020) The Impact of Residual Stress on Resonating Piezoelectric Devices. *Materials and Design*. 196. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109126>.
11. Ning J., Tang Z., Sun Y., Niu Ch., Yang J., Zhou D. (2025) Comparative Study on the Influence Mechanism of He/Ar/N₂ Plasma Treatments on the High Tensile Stress of a Multilayer Silicon Nitride Film. *RSC Advances*. 15. <https://doi.org/10.1039/d5ra02111a>.
12. Demidovich S., Yunik A. (2024) Features of Application of SiN_x Films by ICP CVD Method in the Area of High Pressure. *Electronic Systems and Technologies: Proceedings of the 60th Scientific Conference of Postgraduate, Master's and Undergraduate Students of BSUIR, Minsk, April 22–26*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 254–257 (In Russian).
13. Engelhardt J., Hahn G., Terheiden B. (2015) Multifunctional ICP-PECVD Silicon Nitride Layers for High-Efficiency Silicon Solar Cell Applications. *Energy Procedia*. 77, 786–790. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.111>.
14. Joshi B. C., Eranna G., Runthala D. P., Dixit B. B., Wadhavan O. P., Vyas P. (2000) LPCVD and PECVD Silicon Nitride for Microelectronics Technology. *Indian Journal Engineering and Material Sciences*. 7, 303–309.
15. Shin H.-J., Park I. S., Jang Y. J., Wi S. J., Lee G. S., Ahn J. (2019) Fabrication of Free-Standing Nanoscale SiN_x Membranes with Enhanced Burst Pressure Via Improved Etching Process. *Sensors and Actuators A: Physical*. 297. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111538>.

Received: 18 March 2026

Accepted: 15 April 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Ковальчук Н. С., канд. техн. наук, доц., зам. ген. дир. – гл. инж., ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

Демидович С. А., вед. инж. отрасл. лаб. новых технологий и материалов, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Власукова Л. А., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. НИЛ материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет (БГУ)

Пархоменко И. Н., канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. НИЛ материалов и приборных структур микро- и нанoeлектроники, БГУ

Адрес для корреспонденции

220045, Республика Беларусь,
Минск, ул. Курчатова, 5
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 17 209-59-29
E-mail: vlasukova@bsu.by
Власукова Людмила Александровна

Information about the authors

Koval'chuk N., Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Deputy Director – Chief Engineer, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

Demidovich S., Leading Engineer at the Branch Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL”

Vlasukova L., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher at the Research Laboratory of Materials and Device Structures for Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University (BSU)

Parkhomenko I., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher at the Research Laboratory of Materials and Device Structures for Micro- and Nanoelectronics, BSU

Address for correspondence

220045, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5
Belarusian State University
Tel.: +375 17 209-59-29
E-mail: vlasukova@bsu.by
Vlasukova Liudmila



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-61-68>

УДК 538.971

ГИБКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ГРАФИТОВЫХ СМАЗОК

О. С. МИРОНЕНКО¹, О. В. БОЙПРАВ², В. С. МОКЕРОВ², Л. М. ЛЫНЬКОВ²

¹Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Установлены и обоснованы закономерности изменения характеристик поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц у трех типов гибких электромагнитных экранов. Данные экраны представляли собой многослойные композитные материалы, у которых средний слой состоял из сетчатой ткани и синтепона, пропитанных графитовыми смазками СДМ (тип 1) и ВМПАВТО (тип 2) соответственно, а также из соединенных вместе ткани и синтепона, пропитанных графитовой смазкой FAVORIT (тип 3). Наружный и внутренний слой электромагнитных экранов – фрагменты синтепона. Среднее значение коэффициента поглощения электромагнитного излучения в эффективной полосе поглощения в диапазоне частот 2–17 ГГц для исследуемых экранов различных типов составило 0,61, 0,60 и 0,59 отн. ед. соответственно. Максимальное значение коэффициента поглощения (0,77 отн. ед.) показали экраны типа 1. Предлагаемые гибкие электромагнитные экраны в виде многослойных композитных материалов могут быть использованы для обеспечения электромагнитной совместимости приборов электронной техники и СВЧ-устройств.

Ключевые слова: коэффициент поглощения, графитовые смазки, синтепон, электромагнитное излучение, СВЧ-диапазон, композитные материалы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гибкие электромагнитные экраны СВЧ-диапазона на основе графитовых смазок / О. С. Мироненко [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-61-68>.

FLEXIBLE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC SHIELDS BASED ON GRAPHITE LUBRICANTS

OLEG MIRONENKO¹, OLGA BOIPRAV², VYACHESLAV MOKEROV², LEONID LYNKOU²

¹Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Patterns of changes in the characteristics of electromagnetic radiation absorption in the frequency range of 2–17 GHz were established and substantiated for three types of flexible electromagnetic shields. These shields were multilayer composite materials, the middle layer of which consisted of mesh fabric and synthetic padding impregnated with graphite lubricants SDM (type 1) and VMPAVTO (type 2), respectively, as well as of fabric and synthetic padding connected together, impregnated with graphite lubricant FAVORIT (type 3). The outer and inner layers of the electromagnetic shields were fragments of synthetic padding. The average value of the absorption coefficient of electromagnetic radiation in the effective absorption band in the frequency range of 2–17 GHz for the studied shields of various types was 0.61, 0.60, and 0.59 relative units, respectively. The maximum absorption coefficient value (0.77 relative units) was demonstrated by type 1 shields. The proposed flexible electromagnetic shields in the form of multilayer composite materials can be used to ensure electromagnetic compatibility of electronic devices and microwave devices.

Keywords: absorption coefficient, graphite lubricants, synthetic padding, electromagnetic radiation, microwave range, composite materials.

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

For citation. Mironenko O., Boiprav O., Mokerov V., Lynkou L. (2026) Flexible Microwave Electromagnetic Shields Based on Graphite Lubricants. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 61–68. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-61-68> (in Russian).

Введение

Электромагнитные экраны на основе углеродсодержащих материалов в последние годы приобрели широкое распространение, о чем свидетельствует большое количество публикаций [1]. В зависимости от конструктивного исполнения такие экраны подразделяются на твердотельные и гибкие. К твердотельным относятся жесткие экранирующие конструкции, включая металлические экраны и композиционные материалы с твердеющими связующими. Гибкие экраны, напротив, изготавливаются на основе композитов с незатвердевающими связующими, а также из тканей и других текстильных основ.

С практической точки зрения наиболее перспективными являются гибкие электромагнитные экраны. Это обусловлено тем, что они удобнее в транспортировке, хранении и монтаже, а также позволяют экранировать изделия и конструкции сложной формы, для которых применение твердотельных экранов затруднено. Гибкие электромагнитные экраны СВЧ-диапазона на основе графитовой смазки обладают хорошими свойствами экранирования электромагнитного излучения. Основными их достоинствами являются легкость в изготовлении, поскольку нет необходимости создавать специальный технологический процесс, а все необходимые материалы выпускаются в больших количествах и изначально готовы к применению, а также гибкость конструкции, что позволяет покрывать данными экранами поверхности сложных геометрических форм.

В настоящее время разработка гибких углеродсодержащих экранов является одним из наиболее практически значимых направлений. Гибкие углеродсодержащие электромагнитные экраны СВЧ-диапазона условно можно разделить на три группы:

- 1) представляющие собой полимерные матрицы, в которые включены частицы порошкообразного углеродсодержащего материала (углеродные нанотрубки, углеродные пластины, углеродные волокна);
- 2) характеризующиеся ячеистой структурой, заполненной частицами порошкообразного углеродсодержащего материала;
- 3) представляющие собой волокнистые и текстильные материалы, содержащие углеродные волокна.

Экраны первой группы рассмотрены в [2–4]. В [2, 3] представлены экраны, в которых в качестве наполнителей использовались углеродные нанотрубки различных марок, отличающиеся геометрическими параметрами, прежде всего, диаметром и длиной. В этих работах отмечено, что геометрия углеродных нанотрубок существенно влияет на экранирующие свойства материалов. Для рассмотренных в [4] этапов в качестве наполнителя использовался графен, который сочетает уникальные механические, тепловые и электрические свойства. Даже при содержании в экране графена 1 % он обеспечивает экранирование на уровне 16–18 дБ в диапазоне 0,3–1,0 ТГц.

Основной недостаток экранов первой группы состоит в том, что они характеризуются достаточно большой массой, что ограничивает их эксплуатацию. Для исключения этого недостатка полимерную матрицу следует вспенивать [4]. Однако это сопровождается увеличением временных затрат на изготовление электромагнитных экранов, поскольку технология получения композитов включает многостадийную подготовку и продолжительную сушку. Кроме того, используемые в технологии реагенты не являются широкодоступными, что увеличивает стоимость производства.

Экраны второй и третьей групп обладают меньшей массой по сравнению с экранами первой группы. Экраны второй группы рассмотрены в [1, 5]. Так, в [5] предложены модульные экраны, состоящие из ячеек, заполненных порошкообразными материалами, представляющими собой смеси на основе технического углерода или активированного угля в сочетании с диоксидом титана либо вермикулитом. Дополнительное повышение эффективности рассматриваемого экрана достигается благодаря заполнению ячеек диэлектрическим водным раствором и формированию псевдопирамидальной поверхности, уменьшающей отражение волн. Наибольшую эффектив-

ность экранирования электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц продемонстрировал образец, содержащий смесь технического углерода и вермикулита, для которого коэффициент передачи достигал (–44) дБ, а коэффициент отражения – примерно (–10) дБ. В [1] рассмотрены экраны толщиной 2,3–3,0 мм на основе ТЕМ-ячеек, заполненных ферритами, графитом, техническим углеродом и мелкодисперсным порошком железа. Показано, что наибольшей эффективностью экранирования ЭМИ в диапазоне частот 10 МГц–1 ГГц из указанных экранов характеризуются те, которые изготовлены с использованием графита и имеют толщину 2,6 мм, что свидетельствует о высокой эффективности графита как наполнителя.

К основным недостаткам экранов второй группы, по сравнению с экранами первой группы, можно отнести длительность их изготовления и использование большого количества разнородных материалов, обладающих высокой стоимостью. Экраны третьей группы распространены в меньшей степени, чем первой и второй групп, так как характеризуются более высокой стоимостью [1]. Однако экраны третьей группы, по сравнению с экранами первой и второй групп, обладают меньшей массой.

В настоящее время актуальными являются исследования, направленные на поиск подходов к снижению стоимости электромагнитных экранов на основе углеродсодержащих волокнистых материалов. Один из перспективных подходов – метод, состоящий в инкорпорировании частиц мелкодисперсного углеродсодержащего материала в волокна и межволоконные пространства диэлектрических волокнистых материалов [6]. Суть этого подхода состоит в пропитывании волокнистого материала смесью поверхностно-активного вещества и мелкодисперсного углеродсодержащего материала, в дальнейшем высушивании и термопрессовании полученного углеродсодержащего волокнистого материала.

Для усовершенствования данного метода авторы статьи предлагают при изготовлении углеродсодержащих волокнистых материалов и электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на их основе использовать графитовые смазки вместо смеси поверхностно-активного вещества и мелкодисперсного углеродсодержащего материала. В процессе исследований установлены закономерности изменения характеристик поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц графитовых смазок в зависимости от их типа. Разработаны конструкции гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе таких смазок. При проведении экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- изучение характеристик отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц графитовых смазок различных типов;
- выбор оптимальной графитовой смазки для изготовления гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона;
- изготовление и исследование экспериментальных образцов гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона с использованием выбранной графитовой смазки;
- разработка рекомендации по практическому применению изготовленных и исследованных экранов.

Методика проведения эксперимента

Способность образцов гибких электромагнитных экранов поглощать электромагнитное излучение в СВЧ-диапазоне оценивали по методике и алгоритму, описанным в [7]. С этой целью в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц определяли коэффициенты отражения и передачи ЭМИ с помощью панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0,01–18,00 (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники). В статье представлены результаты для интервалов 2–17 ГГц, где исследуемые образцы электромагнитных экранов демонстрировали наиболее высокие и достаточно стабильные показатели экранирования. Значения коэффициента поглощения ЭМИ для изготовленных образцов электромагнитных экранов в диапазоне частот 2–17 ГГц рассчитывали по следующим формулам:

$$R(f) = 10^{\frac{S_{11}(f)}{10}}; \quad (1)$$

$$T(f) = 10^{\frac{S_{21}(f)}{10}}; \quad (2)$$

$$A(f) = 1 - R(f) - T(f), \quad (3)$$

где $R(f)$ – коэффициент отражения ЭМИ на частоте f в диапазоне 2–17 ГГц; $S_{11}(f)$, $S_{21}(f)$ – коэффициент отражения и передачи ЭМИ соответственно, дБ; $T(f)$, $A(f)$ – коэффициент передачи и поглощения ЭМИ на частоте f , отн. ед.

Помимо измерения величин, непосредственно определяющих экранирующие характеристики гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, проводилась оценка удельной электропроводности σ экспериментальных образцов графитовой смазки, использованных для их создания. Для этого исследуемую графитовую смазку помещали в специальную непроводящую ячейку, содержащую два электрода. В случае использования аэрозоля для обеспечения контакта смазку распыляли непосредственно в ячейку до тех пор, пока она не заполнялась. Для определения сопротивления ячейку присоединяли к измерителю иммитанса E7-20 (ОАО «МНИПИ», РБ), после чего полученные значения переводили в удельную электропроводность по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{l}{RS}, \quad (4)$$

где l – расстояние между электродами ячейки, м; R – сопротивление ячейки, заполненной графитовой смазкой, Ом; S – площадь электродов ячейки, м².

Для каждого вида графитовой смазки было выполнено по пять экспериментов. Полученные результаты усредняли по формуле

$$\sigma_g = \frac{\sum_{k=1}^5 \sum_{n=1}^5 \frac{\sigma_{k,n}}{5}}{5}, \quad (5)$$

где σ_g – средняя удельная электропроводность графитовой смазки, использованной при изготовлении образцов g -й группы; g – номер группы образцов-поглотителей ЭМИ, соответствующей определенному виду графитовой смазки, $g = \{1, 2, 3\}$; $\sigma_{k,n}$ – удельная электропроводность, полученная в k -м эксперименте для смазки n -го вида, использованной для изготовления образцов-поглотителей ЭМИ g -й группы; n – номер вида смазки.

Результаты исследований и их обсуждение

Проведенное исследование включало в себя два этапа:

- 1) выбор оптимальной графитовой смазки для изготовления гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона;
- 2) изготовление и исследование гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, содержащих смазку, выбранную на первом этапе.

На первом этапе изготавливались три типа экспериментальных образцов путем нанесения графитовой смазки на поверхность нетканого материала (синтепона) плотностью 200 г/м². Образец каждого из типов отличался графитовой смазкой, которая применялась для его изготовления. Для изготовления образцов типа 1 использовалась смазка СДМ в аэрозольной форме (ЧПУП «Аэро СДМ», РБ), типов 2 и 3 – смазки ВМПАВТО в аэрозольной форме (ООО «ВМПАВТО», РБ) и FAVORIT в пастообразной форме (ООО «Евразия Лубрикантс», РБ) соответственно.

Экспериментальные образцы изготавливались размерами 35×45 см, обусловленными геометрическими параметрами рупора антенны (30×40 см), которая использовалась для определения характеристик отражения и передачи ЭМИ образцов. Запас в 5 см был необходим для гарантированного перекрытия рабочей плоскости антенны и минимизации влияния окружающей среды на результаты измерений. Расход графитовой смазки на изготовление образцов типов 1 и 2 составил 200 мл, образца типа 3 – 400 г. Выбор синтепона в качестве подложки для нанесения смазки был обусловлен возможностью диффузии вещества вглубь него, что может создать дополнительное переотражение электромагнитного излучения внутри синтепона, тем самым увеличив его эффективность как экранирующего материала.

В табл. 1 представлена динамика высыхания изготовленных образцов гибких электромагнитных экранов различных типов, высушенных при комнатной температуре. Из табл. 1 видно, что продолжительность высыхания образцов составила двое суток.

Таблица 1. Результаты изменения массы образцов гибких электромагнитных экранов
Table 1. Results of changing the mass of flexible electromagnetic shields samples

Характеристика материала	Масса образца, г, типа		
	1 (СДМ)	2 (ВМПАВТО)	3 (FAVORIT)
Исходный синтепон	30 ± 2		
Синтепон после нанесения смазки	37 ± 2	57 ± 2	310 ± 2
Образец после 2 сут. сушки	35 ± 2	48 ± 2	
Ткань после 4 сут. сушки		47 ± 2	

Частотные зависимости коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} исследованных образцов трех типов представлены на рис. 1. Значения S_{11} измерялись с использованием металлической подложки.

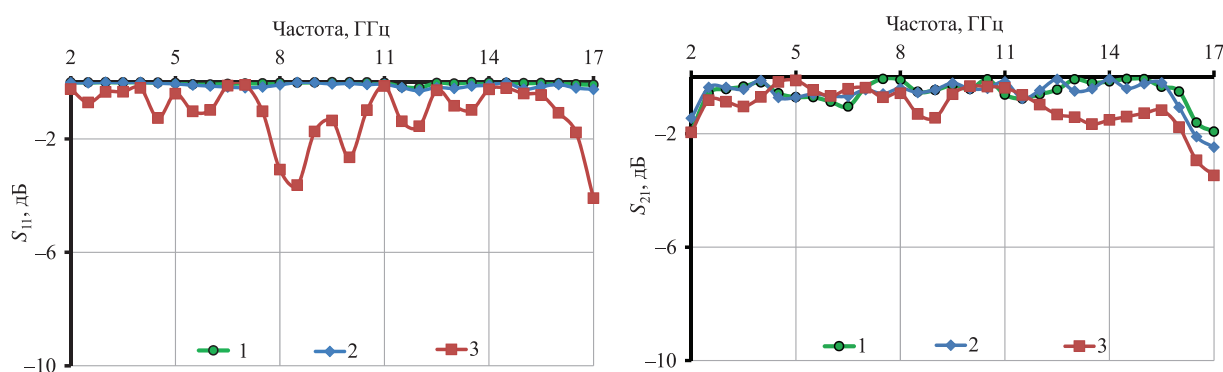


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициентов S_{11} и S_{21} образцов типов 1, 2, 3 (кривые 1, 2, 3 соответственно)

Fig. 1. Frequency dependences of the coefficients S_{11} and S_{21} of samples of types 1, 2, 3 (curves 1, 2, 3 respectively)

Как следует из рис. 1, наименьшими значениями S_{11} и S_{21} в диапазоне частот 2–17 ГГц характеризуется образец типа 3, изготовленный с использованием пастообразной смазки FAVORIT. Скорее всего, это связано с большим относительно других использованных смазок содержанием в ней углерода, что косвенно подтверждено результатами измерения электропроводности. Значения электропроводности графитовых смазок, использованных для изготовления экспериментальных образцов, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения электропроводности графитовых смазок
Table 2. Electrical conductivity values of graphite lubricants

Показатель	Тип смазки		
	СДМ	ВМПАВТО	FAVORIT
Электропроводность σ , См/м	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,54 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, по совокупности свойств, приведенных на рис. 1 и в табл. 2, наиболее перспективной оказалась графитовая смазка. Поэтому она была выбрана в качестве компонента для изготовления конструкций электромагнитных экранов СВЧ-диапазона.

На основе смазки FAVORIT предложены три конструкции гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, реализованные в виде многослойных композитных материалов, средний слой которых состоял из сетчатой ткани и синтепона, пропитанных графитовыми смазками типов 1 и 2 соответственно, а также из соединенных вместе ткани и синтепона, пропитанных графитовой смазкой типа 3. Наружный и внутренний слой указанных экранов представляли собой фрагменты синтепона, что улучшало условия работы с ними за счет изоляции смазки внутри образца. Для улучшения товарных и экранирующих характеристик электромагнитных экранов было проведено спекание описанных выше слоев в термопрессе при температуре 150 °С в течение 10 мин. Это позволило добиться равномерного распределения смазки по всем слоям.

Частотные зависимости коэффициента поглощения (A) ЭМИ изготовленных образцов гибких электромагнитных экранов СВЧ-диапазона различных типов представлены на рис. 2.

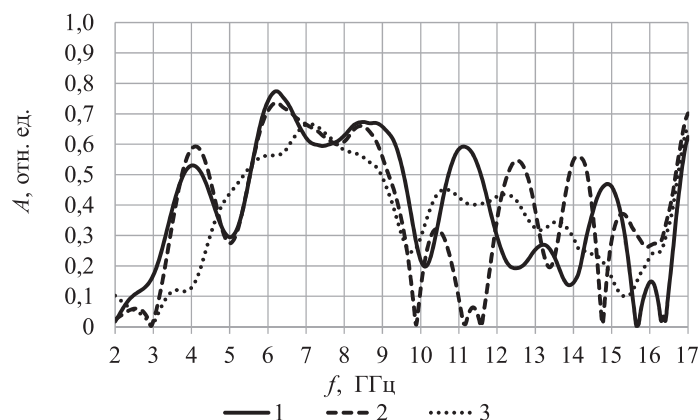


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения образцов гибких электромагнитных экранов типов 1, 2, 3 (кривые 1, 2, 3 соответственно)
Fig. 2. Frequency dependences of the absorption coefficient of electromagnetic radiation of flexible electromagnetic shields of types 1, 2, 3 (curves 1, 2, 3 respectively)

Как видно из рис. 2, максимальное значение коэффициента поглощения ЭМИ исследованных образцов гибких электромагнитных экранов в диапазоне 2–17 ГГц достигает величины 0,77. При этом образцы электромагнитных экранов различных типов заметно различаются характером и протяженностью эффективных полос поглощения, под которыми понимается диапазон частот со значением коэффициента поглощения более 0,5 [8]. Наиболее выраженные поглощающие свойства демонстрируют образцы гибких электромагнитных экранов типа 1. Их эффективные полосы состоят из большого количества отдельных участков, среди которых самыми протяженными и интенсивными являются пики на 5,588–9,529 и 10,765–11,529 ГГц. Образцы гибких электромагнитных экранов типа 2 в целом близки к образцам типа 1 по характеристикам, однако их эффективные полосы несколько менее выражены и сосредоточены преимущественно в диапазонах 3,765–4,412 и 5,588–9,118 ГГц. Образцы гибких электромагнитных экранов типа 3 разительно отличаются от образцов типов 1 и 2. Для них наблюдается только один участок эффективного поглощения в диапазоне 5,412–8,941 ГГц, а изменение коэффициента поглощения происходит более плавно, без резко выраженных скачков. Таким образом, по эффективности поглощения ЭМИ типы образцов гибких электромагнитных экранов можно расположить в ряд следующим образом: тип 1→тип 2→тип 3.

Средние значения коэффициента поглощения ЭМИ в пределах эффективной полосы поглощения для образцов электромагнитных экранов типов 1, 2 и 3 составляют 0,61, 0,60 и 0,59 соответственно, что подтверждает сделанные ранее выводы. Вероятно, несколько больший коэффициент поглощения образцов гибких электромагнитных экранов типа 1 обусловлен особенностями структуры ткани, которая благодаря своей ячеистой структуре формирует достаточно выраженную структурную неоднородность по сравнению с синтепоном, пропитанным смазкой. Чередование участков волокна, воздуха и смазки создает большое число локальных границ раздела, из-за чего электромагнитная волна сильнее рассеивается и претерпевает многократные внутренние отражения. Одновременно с этим вблизи тканой основы смазка распределяется достаточно равномерно, формируя непрерывную проводящую прослойку, что дополнительно увеличивает потери на поглощение излучения. В случае синтепона, несмотря на его рыхлую структуру, добиться столь же равномерного распределения смазки сложнее, а ее диффузия в объем материала не оказывает существенного положительного влияния на экранирующие свойства. Наконец, образцы электромагнитных экранов типа 3 продемонстрировали самую низкую эффективность из трех типов образцов, что связано, скорее всего, с избыточным содержанием смазки, при котором отражение электромагнитной волны становится интенсивнее, вследствие чего доля энергии, рассеиваемой и поглощаемой в объеме материала, снижается.

Заключение

1. В ходе исследований установлено, что наилучшими экранирующими свойствами обладает смазка в пастообразном состоянии, в то время как смазки в аэрозольной форме на большей части

исследуемого частотного диапазона практически не проявили экранирующих свойств. Исследования образцов гибких электромагнитных экранов в виде многослойных композитов в качестве наполнителя показали, что самым перспективным для практического применения из рассмотренных экранов является образец типа 1, пропитанный графитовой смазкой СДМ, поскольку он обладал самыми протяженными участками эффективной полосы поглощения и наибольшим средним значением коэффициента поглощения (0,61 отн. ед.). Для практического применения хорошо подходит образец электромагнитного экрана типа 3, так как у него более стабильные значения коэффициента поглощения в отличие от образцов электромагнитных экранов типов 1 и 2, у которых данный коэффициент изменяется скачкообразно.

2. Разработанные гибкие электромагнитные экраны перспективны для изготовления экранов защиты приборов электронной техники, чувствительных к воздействию электромагнитных помех СВЧ-диапазона, а также материалов для виброакустических систем защиты информации. Кроме того, они могут быть использованы для подавления электромагнитных каналов утечки информации и создания безэховых камер.

Список литературы

1. Afilipoaei, C. A Review over Electromagnetic Shielding Effectiveness of Composite Materials / C. Afilipoaei, H. Teodorescu-Draghiescu // 14th International Conference of Interdisciplinarity in Engineering – INTER-ENG 2020, Targu Mures, Romania, 8–9 Oct., 2020. Vol. 63, No 1. P. 1–9.
2. Взаимодействие электромагнитного излучения с полимерными материалами, содержащими углеродные нанотрубки / М. В. Гринченко [и др.] // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы четвертой Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 11–12 мая 2017 г. Минск, 2017. С. 46–48.
3. Савкин, Н. А. Взаимодействие электромагнитного излучения в диапазоне 8–12 ГГц с полимерными материалами, содержащими углеродные нанотрубки / Н. А. Савкин, И. Д. Парфимович // Материалы 75-й науч. конф. студ. и асп. Белор. гос. ун-та. В 3 ч. Минск, 14–23 мая 2018 г. Минск: Белор. гос. ун-т, 2018. Ч. 3. С. 564–568.
4. Thermoplastic Polyurethane-Graphene Nanoplatelets Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding / M. G. P. Carbone [et al.] // Graphene Technology. 2020. Vol. 5. P. 33–39. <https://doi.org/10.1007/s41127-020-00034-0>.
5. Композиционные углеродосодержащие экраны электромагнитного излучения / Т. А. Пулко [и др.] // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы 12-й Междунар. конф., г. Минск, 19–22 сент. 2017 г. Минск, 2017. С. 285–286.
6. Белоусова, Е. С. Экспериментальное обоснование способа получения гибких экранов электромагнитного излучения, основанного на инкорпорировании углерода аллотропных форм в волокнистые матрицы / Е. С. Белоусова, М. С. Х. Аль-Махдави, О. В. Бойправ // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Физика. 2019. № 12. С. 15–20.
7. Charcoal- and Foil-Containing Materials for Radio Electronic Control Systems Protection from Electromagnetic Interferences / O. Boiprav [et al.] // 2022 IEEE 21st International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Sousse, Tunisia, 19–21 Dec. 2022. P. 299–304.
8. Quantitative Interpretation of Electromagnetic Interference Shielding Efficiency: Is It Really a Wave Absorber or a Reflector? / U. Hwang [et al.] // ACS Omega. 2022. Vol. 7, No 5. P. 4135–4139.

Поступила 18.03.2026

Принята в печать 08.04.2026

References

1. Afilipoaei C., Teodorescu-Draghiescu H. (2020) A Review over Electromagnetic Shielding Effectiveness of Composite Materials. *The 14th International Conference of Interdisciplinarity in Engineering – INTER-ENG 2020, Targu Mures, Romania, Oct. 8–9.* 63 (1), 1–9.
2. Grinchenko M. V., Parfimovich I. D., Komarov F. F., Milchanin O. V., Grigorochuk E. S., Tkachev A. G. (2017) Interaction of Electromagnetic Radiation with Polymeric Materials Containing Carbon Nanotubes. *Applied Problems of Optics, Computer Science, Radiophysics and Condensed Matter Physics, Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 11–12.* Minsk, 2017. 46–48 (in Russian).
3. Savkin N. A., Parfimovich I. D. (2018) Interaction of Electromagnetic Radiation in the Range of 8–12 GHz with Polymeric Materials Containing Carbon Nanotubes. *Proceedings of the 75th Scientific Conference of Students and Postgraduates of the Belarusian State University, Minsk, May 14–23. In 3 Parts.* Minsk, Belarusian State University. 564–568 (in Russian).

4. Carbone M. G. P., Beaugendre M., Koral C., Manikas A. C., Koutroumanis N., Papari G. P., et al. (2020) Thermoplastic Polyurethane-Graphene Nanoplatelets Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding. *Graphene Technology*. 5, 33–39. <https://doi.org/10.1007/s41127-020-00034-0>.
5. Pulko T. A., Mohamed A. M. A., Prudnik A. M., Lynkou L. M. (2017) Composite Carbon-Containing Shields of Electromagnetic Radiation. *Interaction of Radiation with Solids, Proceedings of the 12th International Conference, Minsk, Sept. 19–22*. Minsk, 2017. 285–286 (in Russian).
6. Belousova E., Al-Mahdawi M. S. Kh., Boiprav O. (2019) Method for Incorporating in Fibrous Materials the Particles of Powder Containing Allotropic Forms Carbon for Obtaining Electromagnetic Radiation Shields. *Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences. Physics*. (12), 15–20 (in Russian).
7. Boiprav O., Ayad H., Abdaljlil S. A., Lynkou L., Abdulmawlay M. (2022) Charcoal- and Foil-Containing Materials for Radio Electronic Control Systems Protection from Electromagnetic Interferences. *2022 IEEE 21st International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Sousse, Tunisia, 19–21 Dec*. 299–304.
8. Hwang U., Kim J., Seol M., Lee B., Park I.-K., Suhr J., et al. (2022) Quantitative Interpretation of Electromagnetic Interference Shielding Efficiency: Is It Really a Wave Absorber or a Reflector? *ACS Omega*. 7 (5), 4135–4139.

Received: 18 March 2026

Accepted: 8 April 2026

Вклад авторов

Мироненко О. С. разработал методику изготовления образцов электромагнитных экранов, проанализировал результаты исследования.

Бойправ О. В. определила цели и задачи исследования, участвовала в обсуждении полученных результатов и подготовке рукописи статьи.

Мокеров В. С. изготовил и исследовал образцы электромагнитных экранов.

Лыньков Л. М. обосновал актуальность проведения исследования.

Authors' contribution

Mironenko O. developed a method for producing samples of electromagnetic shields and analyzed the research results.

Boiprav O. defined the goals and objectives of the study, participated in the discussion of the results obtained and the preparation of the manuscript.

Mokerov V. manufactured and studied samples of electromagnetic shields.

Lynkou L. substantiated the relevance of the study.

Сведения об авторах

Мироненко О. С., студент, Белорусский государственный университет

Бойправ О. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Мокеров В. С., стажер, мл. науч. сотр., ассист., магистрант каф. защиты информации, БГУИР

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

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-23-08
E-mail: smu@bsuir.by
Бойправ Ольга Владимировна

Information about the authors

Mironenko O., Student, Belarusian State University

Boiprav O., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Information Security, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Mokerov V., Intern, Junior Research, Assistant, Master's Student of the Department of Information Security, BSUIR

Lynkou L., Dr. Sci. (Tech.), Professor, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-23-08
E-mail: smu@bsuir.by
Boiprav Olga



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-69-76>

УДК 004.032.26

ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФфуЗИИ В ПРИРОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

Е. А. НИКОЛАЕНКО, П. К. ШАЛЬКЕВИЧ

*Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета (Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Рассмотрено применение физически информированных нейронных сетей для моделирования процессов миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах. В качестве базовой математической модели использовалось одномерное уравнение конвективной диффузии, описывающее перенос вещества под действием адвективных и диффузионных механизмов. Предложена архитектура нейронной сети на основе многослойного персептрона, позволяющая аппроксимировать решение в непрерывной пространственно-временной области без необходимости построения расчетной сетки. Обучение модели осуществлялось путем минимизации функции потерь, включающей невязку дифференциального уравнения, а также отклонения от начальных и граничных условий. Для обучения использовались коллокационные точки, генерируемые внутри расчетной области. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что разработанная модель корректно воспроизводит основные физические закономерности процесса переноса, включая смещение максимума концентрации вследствие адвекции и его сглаживание за счет диффузии. Показано, что применение физически информированных нейронных сетей обеспечивает получение гладкого, устойчивого и физически согласованного решения даже при ограниченном объеме исходной информации. Отмечены преимущества метода, связанные с отсутствием необходимости в обучающих данных и возможностью работы в областях сложной геометрии.

Ключевые слова: нейронные сети, физически информированные нейронные сети, конвективная диффузия, функция потерь, моделирование загрязняющих веществ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Николаенко, Е. А. Физически информированная нейронная сеть для решения уравнения конвективной диффузии в природных дисперсных средах / Е. А. Николаенко, П. К. Шалькевич // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 69–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-69-76>.

A PHYSICALLY INFORMED NEURAL NETWORK FOR SOLVING THE CONVECTIVE DIFFUSION EQUATION IN NATURAL DISPERSED MEDIA

EKATERINA NIKOLAENKO, PAVEL SHALKEVICH

International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This paper examines the application of physically informed neural networks to modeling pollutant migration processes in natural dispersed media. A one-dimensional convective diffusion equation describing substance transport under the influence of advective and diffusion mechanisms was used as the basic mathematical model. A neural network architecture based on a multilayer perceptron is proposed, enabling the approximation of the solution in a continuous spatiotemporal domain without the need to construct a computational grid. The model was trained by minimizing the loss function, which includes the residual of the differential equation, as well as deviations from the initial and boundary conditions. Collocation points generated within the computational domain were used for training. Computational experiments demonstrated that the developed model correctly reproduces the fundamental physical laws of the transport process, including the shift of the maximum concentration due to advection and its smoothing due to diffusion. It is demonstrated that the use of physically informed neural networks ensures a smooth, stable, and physically consistent solution even with a limited amount of initial information. The advantages of the method are noted, which include the absence of the need for training data and the ability to work in areas of complex geometry.

Keywords: neural networks, physics-informed neural networks, convection–diffusion, loss function, pollutant transport modeling.

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

For citation. Nikolaenko E., Shalkevich P. (2026) A Physically Informed Neural Network for Solving the Convective Diffusion Equation in Natural Dispersed Media. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 69–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-69-76> (in Russian).

Введение

Компьютерное моделирование сложных физических процессов позволяет проводить анализ и осуществлять прогнозирование переноса загрязняющих веществ в природных дисперсных средах при широком варьировании пространственно-временных параметров, климатических и гидрологических факторов [1]. В настоящее время разработано значительное число математических моделей, которые были реализованы в рамках программного обеспечения, позволяющего прогнозировать миграцию загрязняющих веществ в природных дисперсных средах, к которым относится почва. Однако применение существующих моделей сопряжено с рядом трудностей, обусловленных как физико-химическими особенностями почв, так и методологическими ограничениями численных методов [2].

Одна из ключевых проблем – гетерогенность почвенной среды. Почвы обладают сложной структурой, включающей пористость, гранулометрический состав и минералогию, которые могут значительно варьироваться даже на небольших участках. Существующие модели, как правило, упрощают эту структуру, что приводит к снижению точности прогнозов. Кроме того, на точность прогнозирования влияет неопределенность во входных наборах данных. Получение точных значений величин, таких как коэффициенты диффузии, параметры сорбции, влажность и температура, представляет собой сложную и трудоемкую задачу. В связи с этим часто используются усредненные или оценочные данные, что негативно сказывается на достоверности результатов моделирования. Кроме того, процессы миграции загрязняющих веществ зависят от химических реакций, биологических трансформаций, капиллярных и гравитационных потоков, а также от температурных градиентов. Одновременный учет всех этих факторов при моделировании требует значительных ресурсов даже при применении технологий параллельных вычислений в расчетах [3]. Решить данную проблему можно за счет моделей, построенных с использованием нейросетевых технологий. Значительные вычислительные ресурсы для нейросетевых моделей требуются, как правило, на стадии обучения, но прогнозирование при помощи уже обученных моделей особых вычислительных ресурсов не требуется и может быть выполнено быстро на обычном персональном компьютере [1].

К преимуществам нейросетевых моделей можно отнести их способность к учету множества факторов, таких как физико-химические свойства природной среды, рельеф и климатические условия. Однако существующие подходы моделирования распространения загрязняющих веществ [1–3] имеют ряд недостатков, связанных в первую очередь со сложностью процесса обучения сети при учете большого числа факторов. Развитие таких моделей в направлении учета трехмерного характера моделируемых процессов потребует не только использования больших вычислительных ресурсов, но и значительного перестроения самих моделей. Поэтому актуальной является задача разработки такой нейросетевой модели, которая при сравнительной простоте обучения будет учитывать достаточное для трехмерного прогнозирования загрязняющих веществ в природных дисперсных средах число входных параметров. Решать эту задачу предлагается за счет разработки физически информированной нейронной сети (ФИНС) [4].

Для подтверждения работоспособности предлагаемого подхода и оценки его применимости к задачам моделирования переноса загрязняющих веществ в настоящей статье будет рассмотрена задача моделирования одномерного диффузионного процесса. Выбор такой задачи обусловлен ее фундаментальным характером и наличием аналитических решений, что позволяет провести корректную валидацию разработанной модели и количественно оценить точность полученных в процессе исследований результатов. Эти результаты, в свою очередь, послужат основой для последующего расширения модели на более сложные многомерные задачи, учитывающие гетерогенность и нелинейные эффекты, характерные для природных дисперсных сред.

Применение нейронных сетей в задачах миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах

Использование нейросетевых технологий при моделировании миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах обусловлено их способностью эффективно аппроксимировать сложные нелинейные зависимости между параметрами среды и характеристиками распространения загрязнителей. В зависимости от структуры входных данных используются различные архитектуры нейронных сетей, включая многослойные перцептроны (МП), сверточные нейронные сети (СНС) и рекуррентные нейронные сети (РНС) [5]. Особое место в этой области занимают ФИНС. Особенностью их применения является то, что в качестве базовой модели может использоваться практически любая архитектура нейронной сети, включая МП, СНС и РНС. Это обеспечивает высокую гибкость при построении моделей и позволяет адаптировать ФИНС к различным типам входных данных и постановкам задач. При этом ключевое отличие ФИНС – возможность включения управляющих дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса загрязняющих веществ, непосредственно в функцию потерь. Такой подход позволяет учитывать физические закономерности наряду с эмпирическими данными, что особенно важно для природных дисперсных сред, характеризующихся высокой степенью неопределенности параметров [4].

Применение нейронных сетей, учитывающих физические принципы, в задачах моделирования миграции почвенных загрязнений отражает переход от эмпирических моделей типа «черный ящик» к моделям типа «серый ящик», в которых фундаментальные законы сохранения массы и импульса интегрируются непосредственно в процесс обучения. Одним из ключевых преимуществ данного подхода является возможность эффективного решения обратных задач, включая определение неизвестных коэффициентов фильтрации, параметров сорбции и скоростей химических реакций на основе разреженных и зашумленных данных, что затруднительно при использовании классических численных методов [6, 7]. В рамках решения прямых задач такие модели применяются для растолкования фильтрационных процессов на основе уравнения Ричардса, а также переноса растворенных веществ, описываемого уравнением адвекции–диффузии–реакции. При этом обеспечиваются высокая точность и физическая согласованность прогнозов даже при ограниченном объеме входной информации [6].

Практическая апробация физически информированных нейронных сетей на реальных объектах, включая промышленные площадки, показала их более высокую точность по сравнению с традиционными методами, такими как кригинг и линейная регрессия, при решении задач картирования загрязнений нефтепродуктами и тяжелыми металлами [8]. Аналогичные результаты получены при моделировании переноса микропластика в речных системах и миграции нитратов на сельскохозяйственных территориях. Дополнительным преимуществом ФИНС является их бессеточная природа, позволяющая избежать вычислительных сложностей, связанных с построением расчетных сеток для областей со сложной геометрией, что делает их применение эффективным при моделировании процессов в природных дисперсных средах, характеризующихся высокой пространственной неоднородностью.

Описание феноменологической модели на основе дифференциального уравнения

Уравнение конвективной диффузии является основой для большинства феноменологических моделей, описывающих распространение загрязняющих веществ в природных дисперсных средах [2]. В одномерном случае уравнение конвективной диффузии имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $C(x, t)$ – концентрация загрязняющего вещества; x – пространственная координата; t – время; v – постоянная скорость среды; D – коэффициент диффузии.

Тогда распространение концентрации загрязняющего вещества по одной оси будет ограничено условиями $x \in [0, L]$, $t \in [0, T]$, где L – длина слоя почвы; T – время моделирования. Начальная концентрация загрязняющего вещества задается локальным источником загрязнения

$$C(x, 0) = \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где x_0 – положение источника; σ – параметр, определяющий пространственную ширину источника.

Граничные условия примут следующий вид:

$$C(0, t) = 0, C(L, t) = 0. \quad (3)$$

Ключевая идея ФИНС заключается в том, что нейронная сеть не обучается на данных, а минимизирует невязку дифференциального уравнения в частных производных с условием полного соблюдения физических законов.

Архитектура физически информированных нейронных сетей

Поскольку дифференциальное уравнение (1) решается в непрерывном пространстве при отсутствии регулярной сетки, в качестве основной архитектуры ФИНС оптимально использовать полносвязную нейронную сеть – МП [5]. Такой выбор обусловлен тем, что полносвязные сети обладают свойством универсальной аппроксимации непрерывных функций; это позволяет эффективно приближать решение уравнения конвективной диффузии в пространственно-временной области. Кроме того, использование МП обеспечивает достаточную гибкость модели при относительно простой архитектуре, что особенно важно в задачах ФИНС.

Разработанная нейронная сеть включает три скрытых слоя по 64 нейрона в каждом, что обеспечивает баланс между точностью аппроксимации и вычислительной сложностью модели. Параметры сети $\theta(\mathbf{W}, \mathbf{b})$ задаются матрицами весовых коэффициентов \mathbf{W} и векторами смещений \mathbf{b} . В качестве функции активации используется гиперболический тангенс, обеспечивающий гладкость аппроксимируемой функции и ее производных, что является принципиально важным при вычислении дифференциальных операторов.

На вход сети подаются две величины – пространственная координата x и время t , на выходе получаем аппроксимированное значение концентрации $\tilde{C}(x, t)$. Данная аппроксимация используется для вычисления производных по пространству и времени с применением автоматического дифференцирования. На основе этих производных формируется невязка дифференциального уравнения (1), характеризующая степень отклонения предсказания сети от физической модели процесса переноса загрязняющего вещества.

В качестве языка программирования для создания ФИНС был выбран Python. Основная реализация сети выполнялась с использованием библиотеки PyTorch. Структура разработанной ФИНС представлена на рис. 1.

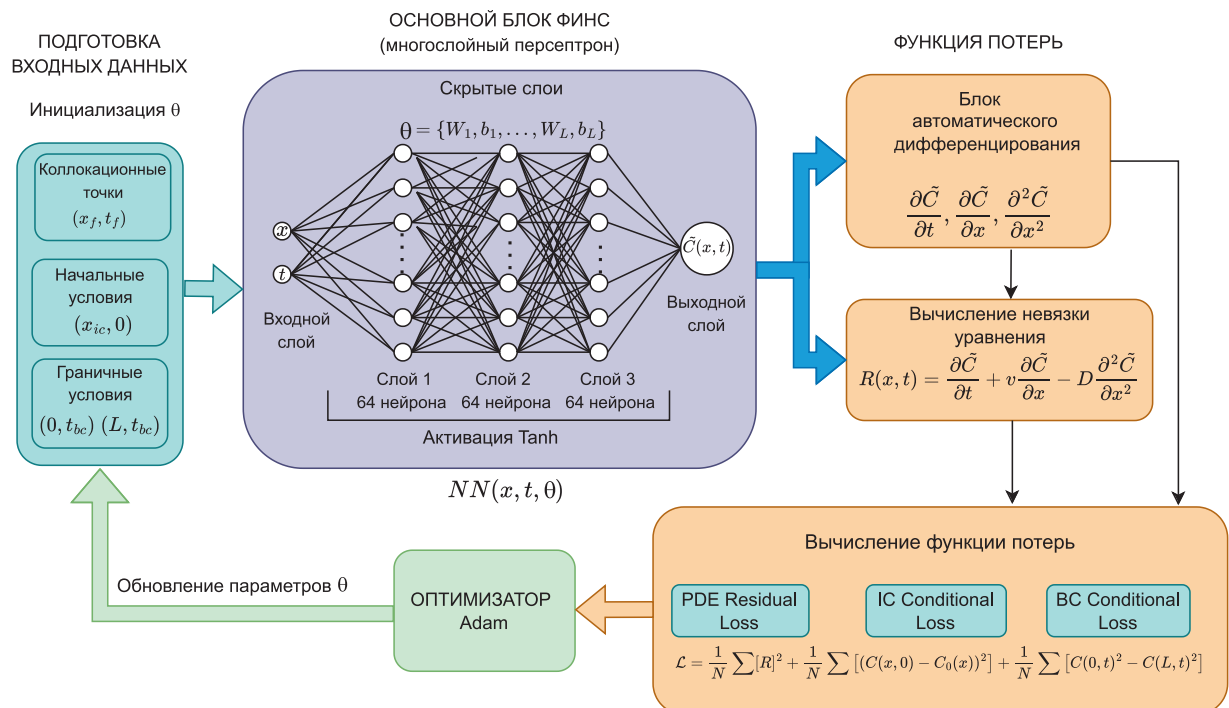


Рис. 1. Схема физически информированных нейронных сетей для решения уравнения конвективной диффузии

Fig. 1. A physically informed neural network scheme for solving the convective diffusion equation

Вычисление функции потерь

Ключевым элементом ФИНС является функция потерь, определяющая эффективность процесса обучения и качество получаемого решения. В отличие от классических нейросетевых моделей, где минимизируется ошибка на обучающей выборке, в разработанной нейронной сети минимизируются невязка дифференциального уравнения и отклонения от начальных и граничных условий. Таким образом, функция потерь формируется как сумма нескольких составляющих, каждая из которых отражает выполнение соответствующих физических требований:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{PDE} + \mathcal{L}_{IC} + \mathcal{L}_{BL}, \quad (4)$$

где \mathcal{L}_{PDE} – невязка дифференциального уравнения; \mathcal{L}_{IC} , \mathcal{L}_{BL} – ошибка выполнения начальных и граничных условий соответственно.

В разработанной ФИНС не осуществляется явное численное решение дифференциального уравнения. Вместо этого выполняется минимизация невязки уравнения в коллокационных точках N_f расчетной области. Также дополнительно минимизируются отклонения от начальных N_{IC} и граничных N_{BC} условий.

Нейронная сеть аппроксимирует значение концентрации, вычисляя значения производных через автоматическое дифференцирование, и формирует невязку $R(x, t)$, которая при идеальном решении равна нулю. Невязка рассчитывается по формуле

$$R(x, t) = \frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + v \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} - D \frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Таким образом, \mathcal{L}_{PDE} будет определяться из выражения

$$\mathcal{L}_{PDE} = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} R(x_i, t_i)^2. \quad (6)$$

Аналогичным образом рассчитываются значения функции потерь для начальных и граничных условий:

$$\mathcal{L}_{IC} = \frac{1}{N_{IC}} \sum_{i=1}^{N_{IC}} (\tilde{C}(x_i, 0) - C_0(x_i))^2; \quad (7)$$

$$\mathcal{L}_{BC} = \frac{1}{N_{BC}} \sum_{i=1}^{N_{BC}} [C(0, t_i)^2 - C(L, t_i)^2]. \quad (8)$$

Итоговая функция потерь в общем виде будет выглядеть следующим образом:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{N} \sum [R]^2 + \frac{1}{N} \sum [(C(x, 0) - C_0(x))^2] + \frac{1}{N} \sum [C(0, t)^2 - C(L, t)^2]. \quad (9)$$

Обучение физически информированных нейронных сетей для моделирования одномерного распространения загрязняющих веществ

На начальном этапе формируется набор точек трех типов, используемых в процессе обучения: коллокационные точки внутри области $N_f - (x_j, t_j)$; точки начальных условий $N_{IC} - (x_{ic}, 0)$; точки граничных условий $N_{BC} - (0, t_{bc})$ и (L, t_{bc}) . В обучении ФИНС не используются привычные обучающие наборы данных. Обучение строится па поиске такой функции $\tilde{C}(x, t)$, которая удовлетворяет дифференциальному уравнению во всей области и строго соблюдает начальные и граничные условия. Обучение проходит по случайным точкам внутри области. При этом коллокационные точки расположены внутри областей $x \in (0, L)$, $t \in (0, T)$, точки для начальных условий – на линии $t = 0$, а для граничных условий – на линиях $x = 0$, $x = L$. В каждой эпохе обучения точки генерируются заново.

Каждая эпоха (шаг) обучения состоит из шести этапов: генерация коллокационных точек; прямой проход сети, где вычисляется $\tilde{C}(x, t)$; вычисление производных $\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t}$, $\frac{\partial \tilde{C}}{\partial x}$, $\frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial x^2}$; вычисление функции потерь; обратное распространение, где вычисляется $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta}$; обновление параметров сети (оптимизация) по алгоритму Adam [9].

Результаты исследований и их обсуждение

Эффективность работы сети оценивалась по результатам прохождения 5000 эпох обучения. В каждой эпохе генерировались точки выборки: $N_f = 1000$, $N_{IC} = 2000$, $N_{BC} = 2000$. Источник загрязнения располагался в координате $x_0 = 0,3$ шириной $\sigma = 0,05$. Входные значения области моделирования определялись параметрами $L = 1$, $T = 1$, $\nu = 1$ и $D = 0,01$. Все параметры приведены в безразмерном виде, поскольку уравнение конвективной диффузии записано в безразмерной форме, полученной путем нормировки пространственной координаты, времени t и концентрации C относительно характерных масштабов задачи.

В процессе обучения сети общее значение функции потерь уменьшилось с $1,408e+00$ на первых этапах обучения до значения $9,745e-03$ на последних. Анализ полученных решений показал, что модель корректно воспроизводит основные физические закономерности процесса переноса.

В начальный момент времени концентрация имеет выраженный локальный максимум в области расположения источника загрязнения. С течением времени наблюдается смещение максимума концентрации в направлении фильтрационного потока, что соответствует адвективному переносу вещества в пористой среде. Одновременно с этим происходит постепенное расширение пространственного профиля концентрации. Данный эффект связан с диффузионным перераспределением вещества, описываемым вторым производным членом уравнения. В результате максимальное значение концентрации уменьшается, а профиль распределения становится более сглаженным.

Полученные временные срезы распределения концентрации демонстрируют постепенное распространение загрязнения вдоль рассматриваемой области. При этом соблюдение граничных условий приводит к снижению концентрации вблизи границ области, что отражает отсутствие поступления вещества извне.

Следует отметить, что применение метода ФИНС дает возможность получить гладкое решение во всей области моделирования без необходимости использования традиционных численных схем, основанных на пространственно-временной дискретизации. Нейронная сеть аппроксимирует решение как непрерывную функцию координаты и времени, что позволяет вычислять значения концентрации в произвольных точках области. Вместе с тем нужно учитывать особенности разработанной нейронной сети. В задачах с преобладанием конвективного переноса возможны трудности при аппроксимации резких фронтов концентрации, что может приводить к сглаживанию профиля решения. Тем не менее для рассматриваемого случая модель демонстрирует стабильное и физически согласованное поведение.

Таким образом, проведенные вычислительные эксперименты подтверждают возможность применения физически информированных нейронных сетей для моделирования процессов переноса загрязняющих веществ в пористых средах. Метод может быть расширен для более сложных задач, включающих реакционные процессы, сорбцию загрязнителей в почве, а также моделирование в двух- и трехмерных областях. На рис. 2 представлен график изменения концентрации загрязняющего вещества для разных временных срезов при начальном положении источника загрязнения $x_0 = 0,3$. Согласно рисунку, при увеличении времени t максимум функции смещается, кривая становится более полой, что соответствует физическим закономерностям конвективной диффузии.

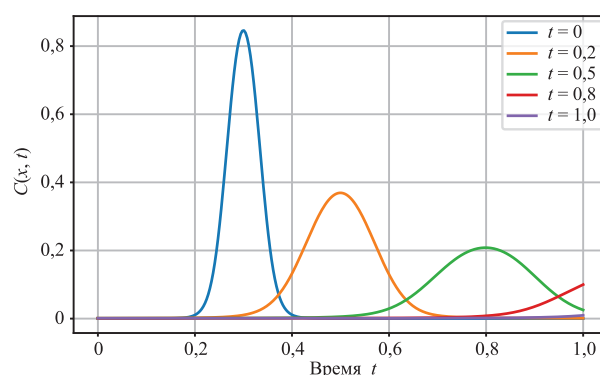


Рис. 2. Зависимость концентрации загрязняющего вещества от времени
Fig. 2. Dependence of pollutant concentration on time

Заключение

1. Разработана физически информированная нейронная сеть для решения одномерного уравнения конвективной диффузии при моделировании процесса миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах. Выбраны архитектура нейронной сети, функция активации и алгоритм оптимизации, обеспечивающие устойчивость процесса обучения и требуемую точность аппроксимации решения.

2. Показаны преимущества и возможности применения физически информированных нейронных сетей для моделирования загрязняющих веществ в природных дисперсных средах. Ключевой особенностью предложенного подхода является отсутствие традиционного обучающего набора данных. Обучение сети основано на поиске функции $C(x, t)$, удовлетворяющей уравнению конвективной диффузии при выполнении начальных и граничных условий.

3. Полученные результаты демонстрируют способность физически информированных нейронных сетей воспроизводить основные закономерности процессов конвективной диффузии и обеспечивать физически согласованные решения при ограниченном объеме исходной информации. Это подтверждает их применимость в задачах экологического моделирования, где доступ к точным данным часто ограничен.

4. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с расширением модели на двумерные и трехмерные задачи, а также с учетом нелинейных эффектов, включая реакционные процессы и сорбцию загрязняющих веществ. Кроме того, перспективным направлением является интеграция физически информированных нейронных сетей с экспериментальными и наблюдательными данными для повышения точности прогнозирования и решения прикладных задач мониторинга окружающей среды.

Список литературы

1. Кундас, С. П. Разработка нейронных сетей для прогнозирования миграции химических веществ в почве и алгоритмов их обучения / С. П. Кундас, В. И. Коваленко, О. С. Хилько // Вестник БНТУ. 2010. № 2. С. 32–38.
2. Компьютерное моделирование миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах / С. П. Кундас [и др.]. Минск: Междунар. гос. экологич. ин-т им. А. Д. Сахарова, 2011.
3. Шалькевич, П. К. Компьютерное прогнозирование пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве / П. К. Шалькевич // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2021. Т. 65, № 2. С. 139–145. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-139-145>.
4. Raissi, M. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations / M. Raissi, P. Perdikaris, G. E. Karniadakis // Journal of Computational Physics. 2019. Vol. 378. P. 686–707.
5. Physics-Informed Neural Networks for PDE Problems: A Comprehensive Review / K. Luo [et al.] // Artificial Intelligence Review. 2025. Vol. 58. Article 323. <http://dx.doi.org/10.1007/s10462-025-11322-7>.
6. Pre-Trained Physics-Informed Neural Networks for Analysis of Contaminant Transport in Soils / Z.-W. Ke [et al.] // Computers and Geotechnics. 2025. Vol. 180, No 11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107055>.
7. Berardi, M. Inverse Physics-Informed Neural Networks for Transport Models in Porous Materials / M. Berardi, F. V. Difonzo, M. Icardi // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2025. Vol. 435. Article 117628. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2024.117628>.
8. Yin, R. Prediction of Soil Pollution Spatial Distribution Using Physics-Informed Neural Network Based on Spatial Probability Distribution of Pollutants / R. Yin, L. Wang, T. Hu // SSRN Electronic Journal. 2024. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4918378>.
9. Урвачев, П. М. Передовые методы оптимизации работы с нейросетями на современных архитектурах / П. М. Урвачев, В. А. Ковтун // Современные инновации, системы и технологии. 2024. Т. 4, № 4. С. 199–212. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-4-0199-0212>.

Поступила 31.03.2026

Принята в печать 17.04.2026

References

1. Kundas S. P., Kovalenko V. I., Khilko O. S. (2010) Development of Neural Networks for Predicting Migration of Chemical Substances in Soil and Algorithms for Their Training. *Bulletin of BNTU*. (2), 32–38 (in Russian).
2. Kundas S. P., Gishkelyuk I. A., Kovalenko V. I., Khilko O. S. (2011) *Computer Simulation of the Migration of Pollutants in Natural Dispersed Media*. Minsk, International Sakharov Environmental University (in Russian).

3. Shalkevich P. K. (2021) Computer Prediction of the Spatial Distribution of the Cs-137 Concentration in Soil. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 65 (2), 139–145. <http://dx.doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-139-145> (in Russian).
4. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. (2019) Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations. *Journal of Computational Physics*. Elsevier. 378, 686–707.
5. Luo K., Zhao J., Wang Y., Li J., Wen J., Liang J., et al. (2025) Physics-Informed Neural Networks for PDE Problems: A Comprehensive Review. *Artificial Intelligence Review*. Springer. 58, Article 323. <http://dx.doi.org/10.1007/s10462-025-11322-7>.
6. Ke Z.-W., Wei S.-J., Yao S.-Y., Chen S., Chen Y.-M., Li Y.-C. (2025) Pre-Trained Physics-Informed Neural Networks for Analysis of Contaminant Transport in Soils. *Computers and Geotechnics*. Elsevier. 180 (11). <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107055>.
7. Berardi M., Difonzo F. V., Icardi M. (2025) Inverse Physics-Informed Neural Networks for Transport Models in Porous Materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Elsevier. 435, Article 117628. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2024.117628>.
8. Yin R., Wang L., Hu T. (2024) Prediction of Soil Pollution Spatial Distribution Using Physics-Informed Neural Network Based on Spatial Probability Distribution of Pollutants. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4918378>.
9. Urvachev P. M., Kovtun V. A. (2024) Advanced Methods for Optimizing Work with Neural Networks on Modern Architectures. *Modern Innovations, Systems and Technologies*. 4 (4), 199–212. <http://dx.doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-4-0199-0212> (in Russian).

Received: 31 March 2026

Accepted: 17 April 2026

Вклад авторов

Николаенко Е. А. разработала архитектуру нейронной сети, выполнила прогнозирование и обработку полученных результатов.

Шалькевич П. К. определил цель и задачи исследований, сформулировал введение и заключение, осуществил научное редактирование статьи.

Authors' contribution

Nikolaenko E. developed the neural network architecture, performed the forecasting, and processed the obtained results.

Shalkevich P. defined the purpose and objectives of the research, formulated the introduction and conclusion, and carried out scientific editing of the article.

Сведения об авторах

Николаенко Е. А., асп. каф. информационных технологий в экологии и медицине, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета

Шалькевич П. К., канд. тех. наук., доц. каф. информационных технологий в экологии и медицине, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета

Адрес для корреспонденции

220037, Республика Беларусь,
Минск, ул. Долгобродская, 23/1
Международный государственный экологический
институт имени А. Д. Сахарова БГУ
Тел.: +375 29 580-84-79
E-mail: nikolaenko@iseu.by
Николенко Екатерина Анатольевна

Information about the authors

Nikolaenko E., Postgraduate of Information Technologies in Ecology and Medicine Department, International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University

Shalkevich P., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Information Technologies in Ecology and Medicine, International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University

Address for correspondence

220037, Republic of Belarus,
Minsk, Dolgobrodskaya St., 23/1
International Sakharov
Environmental Institute of BSU
Tel.: +375 29 580-84-79
E-mail: nikolaenko@iseu.by
Nikolaenko Ekaterina



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-77-84>

UDC 004.032.26

INTELLIGENT CT IMAGE ANALYSIS ALGORITHM FOR 3D MODEL CONSTRUCTION

KANSTANTSIN KURACHKA, XUEMEI WANG, HUANHAI REN

Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. This paper presents an algorithm and associated software implementing a comprehensive computational pipeline based on the YOLOv8n-seg model (Ultralytics) for automated analysis of human lumbar spine CT images, including localization of anatomical regions, segmentation and quantitative measurements of vertebrae, and 3D visualization. Geometric parameters (total lumbar spine height and segmental angles) are calculated directly from segmentation masks and converted into physical units using the image resolution. This generates an STL file that can be exported to third-party software (e.g., 3D Slicer) for 3D surface reconstruction. A critical aspect of the developed approach is its emphasis on quantitative accuracy and reproducibility of results, rather than solely on visualization: measurements obtained from masks translate the model output into clinically interpretable metrics. This opens up opportunities for subsequent applications such as screening, patient stratification, and longitudinal studies.

Keywords: computed tomography, YOLOv8, lumbar spine, deep learning, segmentation, geometric analysis, 3D visualization.

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

For citation. Kurachka K., Wang Xuemei, Ren Huanhai (2026) Intelligent CT Image Analysis Algorithm for 3D Model Construction. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 77–84. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-77-84>.

АЛГОРИТМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА КТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ 3D-МОДЕЛИ

К. С. КУРОЧКА, СЮЭМЭЙ ВАНГ, ХУАНХАЙ РЕН

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
(Гомель, Республика Беларусь)*

Аннотация. В статье представлены алгоритм и соответствующие программные средства, реализующие комплексный вычислительный конвейер на основе модели YOLOv8n-seg (компания Ultralytics) для автоматизированного анализа КТ-изображений поясничного отдела позвоночника человека, включая локализацию анатомических областей, сегментацию и количественные измерения позвонков, а также трехмерную визуализацию. При этом геометрические параметры (общая высота поясничного отдела и сегментарные углы) вычисляются непосредственно на основе сегментационных масок и конвертируются в физические единицы измерения с использованием разрешения изображения. В результате генерируется STL-файл, который может быть экспортирован в стороннее программное обеспечение (например, 3D Slicer) для реконструкции трехмерной поверхности. Критически важным аспектом разработанного подхода является акцент на количественной точности и воспроизводимости результатов, а не исключительно на визуализации: измерения, получаемые на основе масок, транслируют выходные данные модели в клинически interpretable показатели. Это открывает возможности для последующих приложений, таких как скрининг, стратификация пациентов и лонгитюдное исследование.

Ключевые слова: компьютерная томография, YOLOv8, поясничный отдел позвоночника, глубокое обучение, сегментация, геометрический анализ, трехмерная визуализация.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Курочка, К. С. Алгоритм интеллектуального анализа КТ-изображений для построения 3D-модели / К. С. Курочка, Сюэмэй Ванг, Хуанхай Рен // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 77–84. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-77-84>.

Introduction

Degenerative conditions of the lumbar spine, such as herniated discs, lumbar spinal stenosis, and vertebral compression fractures (VCFs), are leading causes of lower back pain and functional impairment worldwide, placing a heavy clinical burden on healthcare systems [1, 2]. The diagnosis, treatment planning, and prognostic assessment of these conditions rely heavily on the accurate interpretation of medical images such as computed tomography (CT) or magnetic resonance imaging (MRI) [3].

In clinical practice, the geometrical parameters of the spine, particularly lumbar lordosis (LL), vertebral height, and segmental angles, are crucial for maintaining sagittal balance [4–6]. Studies have shown that loss of LL angle is significantly associated with functional impairment and increased pain, and is a key indicator for assessing spinal health and the effectiveness of surgical correction [7, 8]. Similarly, accurate measurement of vertebral body height is crucial for the diagnosis and classification of VCFs, especially in patients with spinal trauma [8, 9]. However, traditional imaging assessment methods rely on radiologists or orthopaedic surgeons manually measuring these parameters on two-dimensional slices. This process is not only labor-intensive and time-consuming, but also suffers from significant between- and within-observer variability due to differences in operator experience and subjective judgment, thus affecting diagnostic consistency and the accuracy of surgical planning [3]. Therefore, developing an automated, repeatable, and efficient quantitative analysis tool is of significant clinical value for improving the diagnosis and treatment of spinal diseases.

To overcome the limitations of manual measurements, initial research explored automated methods based on classical computer vision, including threshold-based segmentation, watershed algorithms, and active contour models. While these approaches achieved some success under constrained conditions, they are generally sensitive to image noise and lack the robustness to accommodate the spine's complex anatomy, significant inter-individual morphological variation, and prevalent artifacts in CT imaging. Consequently, their generalization capability remains limited.

In recent years, deep learning (DL), particularly convolutional neural networks (CNNs), has driven revolutionary progress in medical image analysis [10]. Unlike traditional methods that rely on hand-crafted features, DL models can autonomously learn hierarchical, task-relevant features directly from large-scale data. This has led to superior performance in key tasks such as image segmentation, classification, and object detection [11]. Within spinal image analysis, DL has been extensively applied across imaging modalities – including CT, MRI, and X-ray – achieving diagnostic accuracy that matches or even surpasses that of human experts in specific domains [1].

In medical image semantic segmentation, U-Net and its derivative networks (Attention U-Net, 3D U-Net, etc.) have long been considered benchmark methods, mainly due to their encoder-decoder structure and skip connections, which can simultaneously preserve high-resolution details and deep semantics, thus achieving stable and precise segmentation results on tasks with fine anatomical boundaries, such as the spine [1]. In contrast, instance segmentation models like Mask R-CNN are geared towards “multiple targets of the same type” scenarios, capable of distinguishing different vertebrae such as L1, L2, and L3 within the same image. They are more suitable for tasks requiring vertebral-by-vertebra measurement, ratio calculation, or lesion localization. In recent years, the two-stage strategy of “detection first, segmentation later” has been widely adopted in medical imaging. Its core idea is to first use an efficient detector to lock the region of interest (ROI), and then run a more computationally intensive segmentation network within a smaller area to simultaneously reduce background interference and computational overhead. Within this framework, YOLOv8, with its high speed, anchor-free architecture, and native support for segmentation branches, has become a suitable choice for building lightweight, locally reproducible automated spinal CT analysis workflows.

This study focuses on the design and validation of an ROI-guided lumbar CT analysis pipeline (LCAP) for lumbar spine CT analysis. The proposed LCAP integrates four linked stages: lumbar region localization, ROI-constrained vertebral segmentation, mask-derived geometric measurement, and 3D reconstruction. In contrast to studies that primarily emphasize algorithm benchmarking, the present work concentrates on process integration and practical translation, showing how routine CT data can be transformed into structured quantitative indicators and visually interpretable 3D outputs within a reproducible workflow. The main contribution of this study lies in the construction of a lightweight and transparent analytical pathway based on publicly available data and open-source tools. By combining YOLOv8-based localization, mask-based morphometric analysis, and 3D visualization in a single framework, the study provides a methodological template for lumbar CT quantification that is acces-

sible, modular, and extensible. This design is intended not only to support proof-of-concept validation, but also to facilitate future expansion toward larger cohorts, more advanced architectures, and clinically oriented validation studies.

Research methods

The data for this study came from the publicly available training dataset of the VerSe 2019 Challenge, a multi-center, multi-scanner benchmark dataset for vertebral segmentation and labelling. This dataset was established to provide a standardized platform for evaluating and comparing spinal image analysis algorithms. It contains multi-scanner CT (MDCT) scan images and segmentation masks for each vertebra accurate to the voxel level, generated by a “human–machine” hybrid algorithm, providing a high-quality gold standard for supervised learning. To validate this workflow, we randomly selected CT scan data from 30 patients from the VerSe 2019 training set as the research cohort. This sample size was considered sufficient for an exploratory study aiming to demonstrate the feasibility of the framework and conduct preliminary comparisons of models.

All raw data were in 3D DICOM or NIfTI format. In the preprocessing stage, we converted the 3D CT volume data of each patient into a series of 2D sagittal slices. To enhance the visibility of skeletal structures, intensity values of all images were normalized to the bone window through window width/window level adjustments (e. g., window width 1500 HU, window level 300 HU). The framework shown in Fig. 1 provides a schematic overview of the proposed ROI-guided LCAP. It summarizes the main stages of the workflow, including CT preprocessing, YOLOv8-based lumbar localization, vertebral segmentation within the detected ROI, and downstream quantitative and visualization tasks.

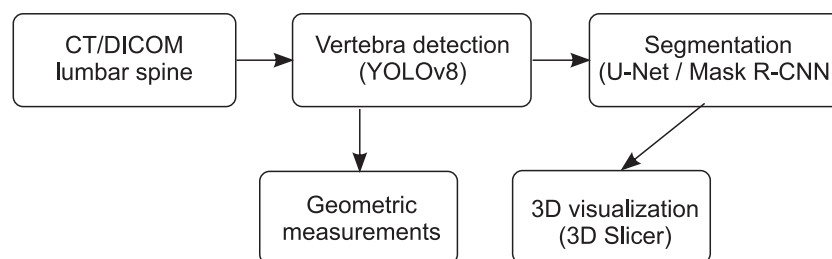


Fig. 1. Flow chart of lumbar spine through-the-body CT analysis

In the actual implementation, geometric measurements and 3D visualization are both derived from the segmentation masks obtained within the ROI. The role of YOLOv8 is therefore to provide robust anatomical localization and reduce irrelevant background before fine-grained analysis. This design improves processing efficiency and supports a practical 2D slice-based workflow that can be reproduced with open-source tools and extended in future studies.

In the first stage, the lumbar spine was examined using YOLOv8. Target detection is the initial step in this process, aiming to quickly locate the lumbar spine region on the entire CT slice. We used yolov8n-seg.pt provided by Ultralytics as the detection backbone. This model is small and fast, consistent with our research’s vision of building a lightweight framework that can run locally. We fine-tuned the model for approximately 100 epochs to output single-class detection results sufficient to cover L1–L5 on sagittal lumbar spine slices. Considering that the model may generate multiple adjacent small boxes on individual slices, we merged all detection boxes in the same slice, calculated their minimum bounding rectangle as the final lumbar spine ROI, and then passed this ROI to the subsequent segmentation stage for fine vertebral delineation. The visualization of the results of the YOLOv8 detection stage is presented in Fig. 2.

In the second stage, segmentation of the vertebrae within the lumbar ROI was performed. Within the lumbar ROI identified by YOLOv8, vertebral segmentation was performed to obtain masks suitable for subsequent quantitative analysis and visualization. At this stage, two representative segmentation paradigms were considered: semantic segmentation and instance segmentation. Representative results of vertebral segmentation within the detected ROI are shown in Fig. 3.

U-Net was adopted as a representative semantic segmentation architecture. Owing to its encoder-decoder design with skip connections, it effectively combines high-level semantic information with low-level spatial details, thereby producing continuous and well-defined foreground regions in medical images. In the present study, U-Net was trained as a binary segmentation model, in which all vertebral

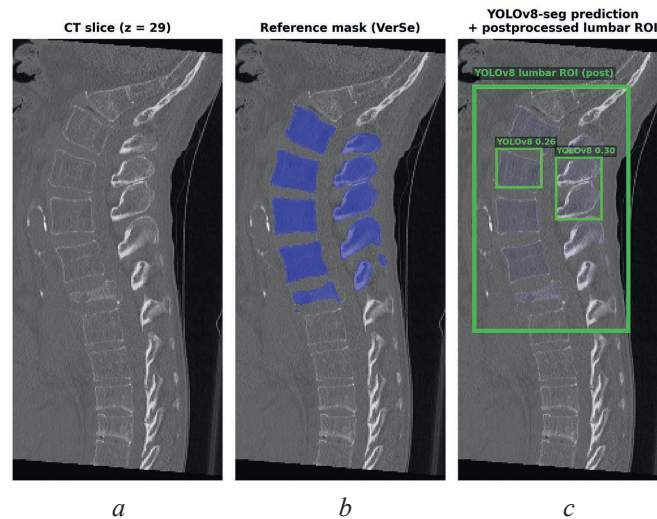


Fig. 2. Visualization of YOLOv8 detection phase results: *a* – original sagittal CT slice; *b* – reference segmentation mask provided by the VerSe dataset; *c* – initial detection bounding box (small green rectangle) predicted by the YOLOv8 model and the final lumbar ROI (large green rectangle) generated by post-processing

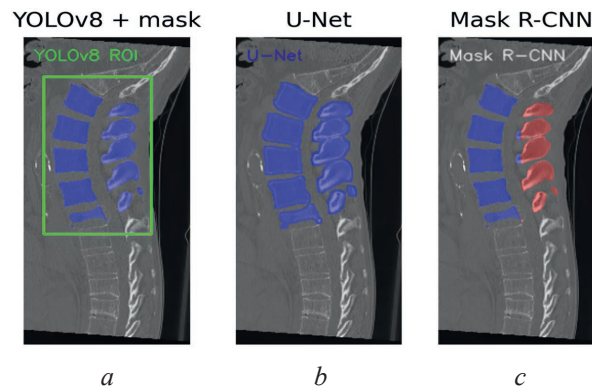


Fig. 3. Results of vertebral segmentation within the detected ROI: *a* – YOLOv8 detection bounding box superimposed on the reference mask; *b* – semantic segmentation creating a continuous mask of vertebrae; *c* – segmentation of individual vertebral instances

pixels within the ROI were labelled as foreground to generate coherent masks for subsequent geometric analysis. Mask R-CNN was employed as a representative instance segmentation architecture. By extending the Faster R-CNN framework with an additional mask prediction branch, it enables pixel-level delineation of individual vertebral targets within the ROI. In the present workflow, this model provided vertebra-specific masks that were used for qualitative illustration and segmentation evaluation (Fig. 3).

In the third stage, after obtaining a two-dimensional segmentation mask of the lumbar spine, the segmentation results were transformed into a set of clinically significant quantitative indicators for an objective description of the spine morphology and potential pathological changes. Previous studies have shown that geometric parameters extracted based on automated segmentation can effectively reduce inter-observer variability and provide stable quantitative evidence for issues such as spinal degeneration and sagittal imbalance. This study first extracted vertebral body height: the vertical distance between the upper edge pixels of the mask for the uppermost lumbar vertebra (usually L1) and the lower edge pixels of the mask for the lowermost lumbar vertebra (usually L5) was considered an approximation of the overall height of the lumbar spine on the sagittal slice [10]. Furthermore, the vertical distances to the anterior, mid-high, and posterior edges of each vertebra within the mask of a single vertebra were measured to obtain three indicators – anterior/mid/posterior edge height, – used to identify compressive or wedge-shaped deformities, consistent with clinical quantitative fracture assessment practices [9]. At the implementation level, we first identify the top and bottom lumbar spine masks within the same slice, calculate their respective centroids, and connect them to form a lumbar spine principal

axis. The length of this principal axis in the pixel coordinate system is denoted as H_{px} . Combined with the image's pixel spacing S (mm/px), it can be converted to the actual scale

$$H_{mm} = H_{px}S. \quad (1)$$

Furthermore, to characterize the posture of the lumbar vertebrae in the sagittal plane, we select a representative anatomical boundary (such as the posterior margin of the superior vertebral body) near the principal axis, construct its direction vector \mathbf{v}_2 , and calculate the angle between it and the lumbar vertebral principal axis direction \mathbf{v}_1 to obtain the approximate segmental lordosis angle of this section:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2}{\|\mathbf{v}_1\| \|\mathbf{v}_2\|}\right). \quad (2)$$

The above-mentioned automated extraction method can not only meet the clinical need for overall height and local edge height measurement, but also directly convert the segmentation results into structured features that can be used for subsequent classification or follow-up analysis. The total lumbar spine height H and the approximate LL angle were automatically calculated and marked on the segmentation mask. An example of automated extraction of geometric parameters is shown in Fig. 4.

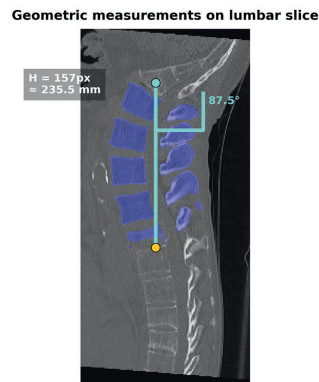


Fig. 4. Example of automated extraction of geometric parameters

In the fourth step, a 3D model of the lumbar spine surface was created by reconstructing the 2D segmented mask using 3D Slicer software, where different colors represent different vertebrae. To intuitively evaluate the segmentation quality and observe the overall 3D morphology of the lumbar spine, we reconstructed the 2D segmentation results into a 3D model. The process proceeds through the following steps: first, the 2D segmentation masks from all sagittal slices of a patient are sequentially stacked along the Z-axis to reconstruct a three-dimensional (3D) label volume. This volume is subsequently imported into 3D Slicer, an open-source and widely adopted platform for medical image computing. Leveraging the platform's dedicated "Segmentations" and "Model maker" modules, the 3D label data is converted into a surface mesh model (e. g., in STL format). The final output is an interactive, three-dimensional reconstruction of the lumbar spine, suitable for visualization and quantitative analysis (Fig. 5).

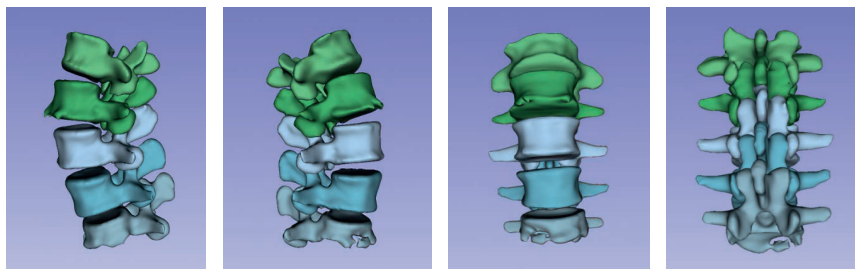


Fig. 5. 3D visualization results

This study primarily aimed at process validation; therefore, both qualitative visualization and typical segmentation metrics were employed in the evaluation phase. Qualitatively, by comparing the original CT slices, VerSe reference segmentation, and the lumbar spine ROI obtained through YOLOv8 post-

processing, the consistency of model localization and segmentation across different cases and vertebral levels could be visually assessed (Fig. 2–4).

Quantitatively, we used the intersection over union (IoU) and Dice similarity coefficient (DSC), commonly used in medical image segmentation, to measure the degree of overlap between the predicted mask and the reference mask. IoU, also known as the Jaccard index, is a metric that measures the degree of overlap between the predicted and ground truth regions and is widely used to evaluate the performance of object detection and image segmentation. Its calculation formula is as follows:

$$\text{IoU}(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{FN}}, \quad (3)$$

where A is the predicted region (boundary box or mask); B is the ground truth region; TP (true positives) is the number of correctly predicted pixels; FP (false positives) is the number of incorrectly predicted pixels; FN (false negatives) is the number of pixels that were not predicted.

DSC is the most commonly used evaluation metric in medical image segmentation. It also measures the overlap between the predicted and ground truth masks, but the weight for overlapping regions is twice that of IoU, making it more sensitive to the accuracy of segmentation boundaries. Its calculation formula is as follows:

$$\text{DSC}(A, B) = \frac{2 \cdot |A \cap B|}{|A| + |B|} = \frac{2\text{TP}}{2\text{TP} + \text{FP} + \text{FN}}. \quad (4)$$

This study primarily aims to validate the feasibility of the proposed LCAP rather than to establish state-of-the-art segmentation performance on a full 3D benchmark. Accordingly, IoU and DSC are reported here as reference indicators for process-level effectiveness within a lightweight exploratory setting based on sagittal lumbar slices from VerSe. In future work, when the framework is extended to larger datasets and more diverse imaging conditions, evaluation can be expanded to include finer-grained metrics such as mean surface distance, 95 % Hausdorff distance, and agreement analysis against expert manual measurements.

Research results and their discussion

The proposed ROI-guided LCAP demonstrated stable qualitative performance across the major stages of lumbar CT analysis. Accurate localization of the lumbar region of interest was achieved on sagittal CT slices (Fig. 2), followed by vertebral segmentation within the detected ROI (Fig. 3). On the basis of these segmentation results, the framework automatically extracted clinically relevant geometric parameters, including lumbar height and segmental angular information (Fig. 4), and further supported three-dimensional surface reconstruction in 3D Slicer for intuitive visualization of lumbar morphology (Fig. 5). Overall, the qualitative results confirm the technical feasibility of the integrated workflow summarized in Fig. 1. The main strength of the proposed LCAP lies not only in the performance of individual stages, but also in its ability to connect localization, segmentation, quantitative analysis, and visualization within one reproducible analytical process.

To objectively evaluate the performance of each stage of the system's operation, a quantitative analysis was conducted, the results of which are summarized in Tab. 1, which presents the results of YOLOv8's operation at the first stage of the lumbar spine ROI detection task.

Table 1. YOLOv8 detection efficiency

Index	Accuracy	Recall	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95
Values	0.975	0.982	0.981	0.886

The results in Tab. 1 show that the model performs excellently in locating the lumbar spine region, with both precision and recall exceeding 0.97, indicating that the model can accurately identify the target region with very few false negatives or missed detections. The mAP@0.5 (mean average precision at an IoU threshold of 0.5) reached 0.981, further confirming the model's high reliability in localization accuracy. These data strongly support the effectiveness of using YOLOv8 as a robust initial localization tool in this process.

Tab. 2 summarizes the segmentation performance obtained with two representative implementations used within the ROI segmentation stage (SD – standard deviation).

Table 2. Comparison of segmentation model performance

Model	DSC \pm SD	IoU \pm SD
U-Net	0.905 \pm 0.05	0.826 \pm 0.06
Mask R-CNN	0.923 \pm 0.04	0.857 \pm 0.05

Both approaches achieved high overlap with the reference masks. Mask R-CNN yielded slightly higher mean DSC and IoU values, whereas U-Net also demonstrated stable and satisfactory segmentation performance. In the context of the present study, these results are reported primarily to support the feasibility of the segmentation stage within the proposed LCAP rather than to establish an extensive benchmark comparison.

The present study demonstrates the feasibility of an ROI-guided LCAP for automated lumbar spine analysis based on open-source tools and public data. A key finding is that YOLOv8-based localization can reliably identify the lumbar region in sagittal CT slices, thereby restricting subsequent analysis to a focused anatomical area. This design reduces irrelevant background information and creates a more efficient basis for segmentation, quantitative measurement, and visualization. A second important result is that the proposed workflow does not stop at segmentation output. Instead, the segmentation masks are further converted into clinically meaningful geometric indicators, such as lumbar height and segmental angular measures, and then translated into 3D surface models. This step is methodologically important because it moves the analysis from image-level prediction toward structured quantitative description, which is more relevant to clinical interpretation and follow-up applications. Taken together, these findings suggest that the LCAP is not simply a visualization workflow, but a reproducible framework for lumbar CT quantification. Its value lies in connecting image processing, measurement, and 3D representation within one coherent analytical pathway, which may support future applications in screening, longitudinal monitoring, and computer-assisted diagnostic research.

The framework proposed in this study is consistent with current developments in DL-based spinal image analysis. Previous studies have demonstrated that modern segmentation methods can achieve high overlap with reference annotations, often with DSC values above 0.90. The results obtained in the present study fall within this range and therefore support the practical feasibility of the proposed workflow. Compared with studies based on fully three-dimensional CNN architectures, the present slice-wise 2D strategy combined with ROI-guided analysis offers a more lightweight and accessible implementation. Although full 3D models may better exploit inter-slice context, they usually require greater computational resources and more complex training procedures. In contrast, the present workflow emphasizes reproducibility, practical deployment, and the integration of localization, segmentation, quantitative analysis, and 3D visualization within one coherent process.

Several limitations of this study should be noted. First, the sample size remains relatively small and does not fully represent the anatomical variability, pathological complexity, and imaging heterogeneity encountered in routine clinical practice. Second, the present workflow is based on slice-wise 2D analysis and therefore does not explicitly exploit full 3D spatial continuity. As a result, segmentation consistency may still vary at superior and inferior vertebral margins or in anatomically complex regions. Third, although the extracted geometric parameters are clinically meaningful in principle, they have not yet been systematically validated against manual measurements performed by radiologists or spine surgeons.

Future work should therefore proceed in three directions. The first is data expansion, including validation on the full VerSe dataset and on additional multi-center CT cohorts. The second is methodological extension toward 2.5D or 3D architectures that can better capture inter-slice context while preserving the workflow logic of the current LCAP. The third is formal clinical validation, including agreement analysis between automated and expert-derived measurements and assessment of the framework in specific disease settings such as VCFs, lumbar spinal stenosis, or sagittal imbalance.

Conclusion

1. This study developed an ROI-guided lumbar computed tomography analysis pipeline for automated analysis of lumbar spine computed tomography images. Built on YOLOv8-based localization,

ROI-constrained segmentation, mask-derived geometric measurement, and 3D reconstruction, the proposed framework establishes a coherent workflow that transforms routine image data into structured quantitative and visual outputs.

2. The main significance of the study lies in workflow integration rather than in broad algorithm benchmarking. By linking localization, segmentation, morphometric extraction, and 3D visualization within a reproducible open-source framework, the lumbar computed tomography analysis pipeline demonstrates a practical route from pixel-level prediction to clinically interpretable information. This makes the framework suitable as a methodological basis for future expansion toward larger datasets, advanced architectures, and clinically validated decision-support applications.

References

1. Verheijen E. J. A., Chapman J. R., Lehr A. M., Schnake K. J., Vaccaro A. R., Oner F. C., et al. (2025) Artificial Intelligence for Segmentation and Classification in Lumbar Spinal Stenosis: An Overview of Current Methods. *European Spine Journal*. 34, 1146–1155. <https://doi.org/10.1007/s00586-025-08672-9>.
2. Masalitina N. N., Kurochka K. S., Tsitko E. L. (2019) The Mathematic Model of Lumbar Spine Osteochondrosis Treatment Decisions. *Informatics*. 16 (1), 24–35 (in Russian).
3. Constant C., Aubin C.-E., Kremers H. M., Garcia D. V. V., Wyles C. C., Rouzrokh P., et al. (2023) The Use of Deep Learning in Medical Imaging to Improve Spine Care: A Scoping Review of Current Literature and Clinical Applications. *North American Spine Society Journal*. 15. <https://doi.org/10.1016/j.xnsj.2023.100236>.
4. Been E., Kalichman L. (2014) Lumbar Lordosis. *The Spine Journal*. 14 (1), 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2013.07.464>.
5. Been E., Li L., Hunter D. J., Kalichman L. (2011) Geometry of the Vertebral Bodies and the Intervertebral Discs in Lumbar Segments Adjacent to Spondylolysis and Spondylolisthesis: Pilot Study. *European Spine Journal*. 20 (7), 1159–1165. <https://doi.org/10.1007/s00586-010-1660-y>.
6. Makirov S. K., Yuz A. A., Jahaf M. T., Nikulina A. A. (2015) Quantitative Evaluation of the Lumbosacral Sagittal Alignment in Degenerative Lumbar Spinal Stenosis. *International Journal of Spine Surgery*. 9. <https://doi.org/10.14444/2068>.
7. Boissière L., Bourghli A., Vital J.-M., Gille O., Obeid I. (2013) The Lumbar Lordosis Index: A New Ratio to Detect Spinal Malalignment with a Therapeutic Impact for Sagittal Balance Correction Decisions in Adult Scoliosis Surgery. *European Spine Journal*. 22 (6), 1339–1345. <https://doi.org/10.1007/s00586-013-2711-y>.
8. Sadiqi S., Verlaan J. J., Lehr A. M., Chapman J. R., Dvorak M. F., Kandziora F., et al. (2017) Measurement of Kyphosis and Vertebral Body Height Loss in Traumatic Spine Fractures: An International Study. *European Spine Journal*. 26 (5), 1483–1491. <https://doi.org/10.1007/s00586-016-4716-9>.
9. Kurochka K. S., Panarin K. A. (2018) Algorithm of Definition of Mutual Arrangement of L1–L5 Vertebrae on X-ray Images. *Optical Memory and Neural Networks*. 27 (3), 161–169.
10. Kurachka K., Wang X. (2025) Automation of Primary Diagnostics of Diseases of the Human Lumbar Spine Using Intelligent Analysis of CT Images. *2025 Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2025)*. 355–360.
11. Kurachka K. S., Tsalka I. M. (2017) Vertebrae Detection in X-Ray Images Based on Deep Convolutional Neural Networks. *2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics (IEEE)*. 194–196.

Received: 6 March 2026

Accepted: 22 April 2026

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Information about the authors

Kurachka K., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Information Technology, Sukhoi State Technical University of Gomel (SSTUG)

Wang Xuemei, Postgraduate of the Department of Information Technology, SSTUG

Ren Huanhai, Postgraduate of the Department of Information Technology, SSTUG

Address for correspondence

246029, Republic of Belarus,
Gomel, Octiabria Ave., 48
Sukhoi State Technical University of Gomel
Tel.: +375 23 232-95-65
E-mail: wxm_doc@qq.com
Wang Xuemei



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-85-91>

UDC 004.5, 159.9:62

AN APPROACH TO TRANSFER OF CONTROL BETWEEN AUTOMATED VEHICLE AND DRIVER

VLADIMIR DUBOVSKY, VLADIMIR SAVCHENKO

*The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. In vehicles with level 3 automation, the driver can transfer control of the vehicle to the automated driving system without monitoring its operation. However, in critical situations or if the automated vehicle exits the normal operating domain, the driver must take control. In these cases, the driver may be unable to safely operate the vehicle due to insufficient awareness of the road situation and unpreparedness for the driving task. This problem is currently being addressed by monitoring the driver's condition and prompting them to take manual control using a multimodal interface. However, due to its complex, interdisciplinary nature, this problem has not yet been fully resolved. The aim of this study was to propose a new approach to mitigating safety risks during the transition from automated to manual driving. Based on an analysis of existing methods for solving this problem, a new approach is considered that takes into account the individual psychophysiological characteristics of the driver before transferring control of the vehicle. This approach provides greater flexibility, validity, and reliability of decision making in critical driving situations when switching between driving modes.

Keywords: automated cars, control transfer, human factors, human-machine interface, information technology, road safety, driving mode.

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

For citation. Dubovsky V., Savchenko V. (2026) An Approach to Transfer of Control Between Automated Vehicle and Driver. *Doklady BGUIR*. 24 (3), 85–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-85-91>.

ПОДХОД К СМЕНЕ РЕЖИМА ВОЖДЕНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ТРАНСПОРТНОМ СРЕДСТВЕ

В. А. ДУБОВСКИЙ, В. В. САВЧЕНКО

*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В автомобилях с уровнем автоматизации 3 водитель может передать управление транспортным средством системе автоматизированного вождения и не контролировать ее работу, но в критических ситуациях или в случае выхода автоматизированного транспортного средства из домена штатной эксплуатации он должен взять управление в свои руки. В этих случаях водитель может оказаться не в состоянии безопасно управлять транспортным средством из-за недостаточной осведомленности о дорожной ситуации и неготовности к выполнению задачи вождения. В настоящее время эта проблема решается на основе мониторинга состояния водителя и выдачи ему соответствующего запроса на ручное вождение с использованием мультимодального интерфейса. Однако из-за сложного междисциплинарного характера эта проблема не решена окончательно. Цель исследования состояла в том, чтобы предложить новый подход к снижению рисков для безопасности при переходе от автоматизированного вождения к ручному. На основе анализа известных методов решения данной проблемы рассмотрен новый подход, который принимает во внимание индивидуальные психофизиологические качества водителя, прежде чем передать ему управление транспортным средством. Такой подход обеспечивает большую гибкость, обоснованность и надежность принятия решения в критических дорожных ситуациях при смене режима вождения.

Ключевые слова: автоматизированные автомобили, передача управления, взаимодействие водителя с автомобилем, человеко-машинный интерфейс, информационные технологии, безопасность дорожного движения, режим вождения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дубовский, В. А. Подход к смене режима вождения в автоматизированном транспортном средстве / В. А. Дубовский, В. В. Савченко // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 3. С. 85–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-3-85-91>.

Introduction

Currently, automotive vehicles evolve towards autonomous cars with fully automated driving systems (ADS) [1]. This process can be illustrated in a general way by the standard, SAE J 3016, developed by the Society of Automotive Engineers (SAE International) [2], which formally defines the levels of driving automation from 0 (no driving automation) to 5 (full driving automation). In accordance with this standard at level 1 the driver is in control of the vehicle and may be assisted in steering, accelerating or braking; at level 2 in specific driving conditions the longitudinal and lateral control of the vehicle is performed by the automation, but the driver must be engaged in the driving task at all times; at level 3 in specific driving conditions the vehicle is fully controlled by the ADS without any driver involvement, but the driver must be ready to take control of the vehicle at all times in case of the system failure; level 4 is similar to level 3, differing only in that the driver is not obliged to take control of the vehicle even in the case of a system failure, while the driver may have the option of controlling the vehicle.

Level 2 vehicles are already available on the market and level 3 vehicles are expected to be available shortly [3]. But in order for this to happen, the human factors issue of transfer of control between automated driving (AD) and manual driving (MD) must be solved in the most efficient and safe way. This issue is associated with driver complacency, lack of attention to the road, loss of situation awareness, sudden changes in workload, and degradation of driving skills and abilities due to the fact that the automated vehicles allow the drivers to be out of the control loop for extended periods but don't exclude resuming the manual control at any time [4]. The aforementioned factors can affect driver performance negatively since they could lead to a delayed and inadequate response of the driver during transitions between automated and manual vehicle control and therefore need to be carefully studied and properly taken into account in designing a control mode switching system for level 3 vehicles [1, 5].

Many research studies have been carried out on this topic to find the most efficient and safe methods for transferring vehicle control from AD to MD, however, due to the complex, interdisciplinary nature of this problem, it has not yet been finally solved [3]. In order to mitigate safety risks during driver take-over process, a good understanding of the current driver's state and the opportunities that exist for fast regaining of driver readiness to take back control is needed first of all [3].

An approach to a control transfer

A basic diagram of the transition of vehicle control between AD and MD is depicted in Fig. 1. This transition process includes four main stages: (1) driving conditions monitoring during AD for determining whether all necessary conditions for AD are satisfied or not; (2) take-over request (TOR) is issued by the ADS to the driver in emergency situations or when the conditions for AD are not met; (3) determining whether the driver is ready for MD based on a continuous monitoring of the driver state during AD; (4) control mode switching from AD to MD when the driver is ready for MD, otherwise, the ADS performs a minimum risk maneuver and stops the vehicle.

The level 3 automated vehicle should be able to detect its failures or when the specific conditions under which it is intended to drive in the automated mode are not met anymore. The necessary conditions for AD should be documented by the vehicle manufacturers in the operational design domain that should include the following information at a minimum: roadway types; geographic area; speed range; environmental conditions (weather as well as day/night time); and other domain constraints [6].

The TOR can be performed in the form of visual, auditory, or vibrotactile cues, or any combination thereof. The most common TOR design concepts are aimed at restoring the driver functional state and situational awareness as soon as possible in order to minimize the driver response time which depends on a number of factors such as traffic density, driver state, driving situation, road conditions, environmental conditions, TOR notification modalities and non-driving secondary task [3]. Therefore, TOR must be flexible and take the mentioned factors into account to be effective.

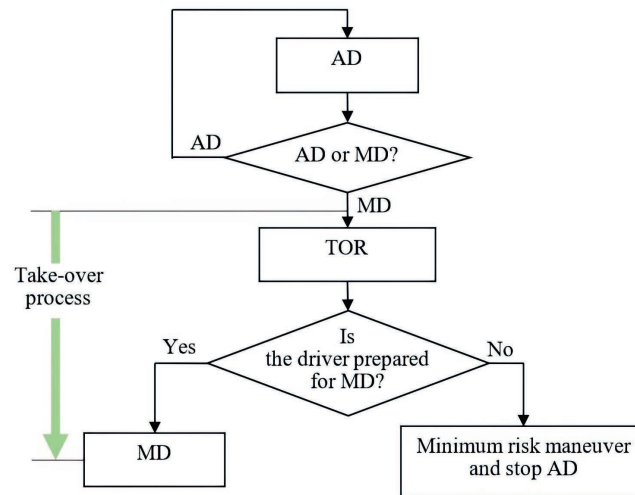


Fig. 1. A basic diagram of the transition of vehicle control between automated driving and manual driving

The driver readiness to take-over control of the vehicle is evaluated based on analysis of a driver's psychophysiological and behavioral data (eyes, head, and body movements, heart rate, electrodermal activity, and so on) combined with the data on the driving situation. In this regard, it is essential to recognize potentially dangerous driver states, such as distraction, fatigue, drowsiness, and other undesirable states that affect takeover performance negatively [3]. In accordance with the UNECE ALKS regulation [7], the driver readiness (availability) recognition system shall detect whether the driver is in an appropriate driving position and whether the driver's psychophysiological state (attention) is appropriate to the driving conditions. The driver's driving position is determined by monitoring the position of his/her trunk, head, hands/arms, and feet/legs based on video recording, pressure sensors embedded into driver's seat, steering touch and force sensors, seat position sensors, steering position sensors and the seatbelt buckle switch [4]. The driver's psychophysiological state is evaluated in terms of the presence and levels of abnormal states primarily such as drowsiness, distraction, and emotions (stress or anger) [8]. Various physiological and behavioral parameters are used as indicators of these abnormal states. In order to identify whether the driver is in a drowsy state and determine the level of drowsiness the indicators such as the brain activity (pattern of the electroencephalogram), heart activity (heart rate, and heart rate variability), breathing activity (breathing rate or inspiration-to-expiration ratio), electrodermal activity (skin conductance), pupil diameter instability (amplitude and frequency of the pupil diameter fluctuations), eye activity (eye movement analysis using electrooculography signals or video sequences of the eyes), and eye closure dynamics (percentage of closure, mean blink duration, mean blink frequency or interval, and eye closing and reopening speeds) can be used [8]. In order to identify whether the driver is in distraction and determine the level of distraction the indicators such as the driver's hands behavior (positions and movements), gaze activity (gaze direction, fixation duration, glance frequency, and gaze distribution), head behaviour (head pose and movements), brain activity (pattern of the electroencephalogram) are mostly used [8]. The main indicators used to detect the driver's negative emotions are the heart activity, electrodermal activity, breathing activity, brain activity, speech and facial expressions [8].

The control mode can be switched from AD to MD immediately and completely after the TOR is confirmed by the driver or gradually with increasing authority, depending on the driver state and the driving situation [7].

Thus, the primary task to be solved during the developing of methods for transferring control to the driver is to reduce the take-over time (the time between the TOR and the first measurable response to the situation [5], taking into account the requirements of safety, comfort, and quality of the take-over performance.

The immediate control transfers from automation to driver (Fig. 1) can be performed if the driver readiness (driver state and situation awareness) for MD at the moment of issuing the TOR is high enough for the required driving task. In this case the average take-over time may be around 3 seconds depending on the driver individual characteristics and driving circumstances [9].

If the driver readiness for MD does not meet the required level it is necessary to help the driver to increase his/her control capability to required level. For this purpose, the approach based on concept of driver-automation shared control (for instance through a haptic control interface) during take-over process is the most promising solution since it allows to allocate the execution of the driving task between automation and driver in accordance with the current driver state and driving situation until the driver state reaches the desired level and take-over is complete [4]. A basic diagram of the transition of vehicle control between AD and MD via shared authority mode, and conceptual diagram of the authority transfer method via shared authority mode are depicted in Fig. 2 and Fig. 3 respectively. In accordance with research literature the mean take-over time for shared control authority transition ranges from 0.69 to 19.79 s, depending on the different conditions [10].

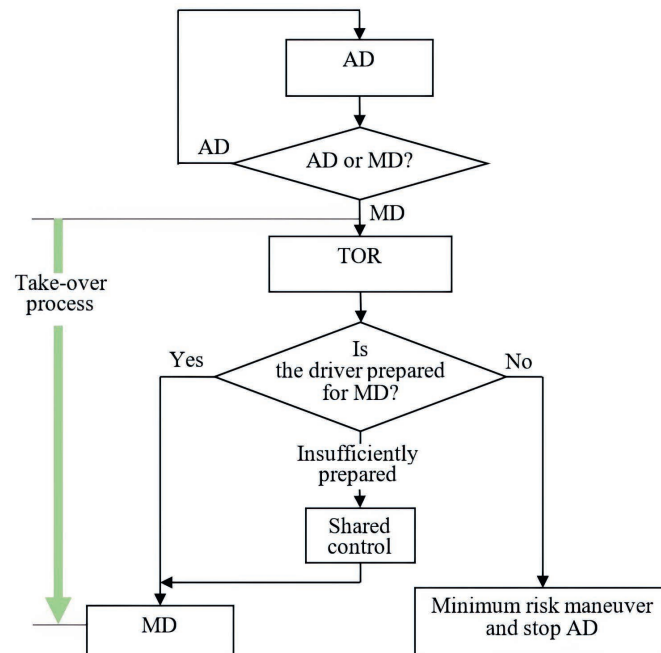


Fig. 2. A basic diagram of the transition of vehicle control between automated driving and manual driving via shared authority mode

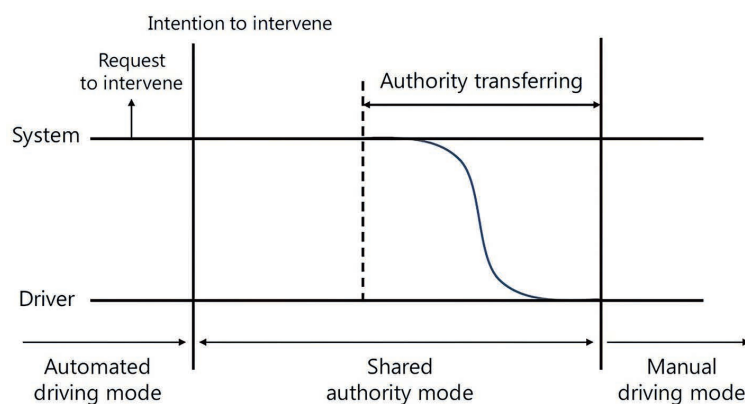


Fig. 3. A conceptual diagram of the authority transfer method via shared authority mode

Such an approach may help driver to take back control of a vehicle in a safe and smooth manner if the time budget (the time between the TOR and the moment when the vehicle would have reached the system boundary assuming no driver response [11]) allows to do it. But in critical situations when urgent take-over is required due to the ADS failure the shared control during authority transition can be risky. In such critical situations when the driver readiness for MD does not meet the required high level and is close to the minimum allowable value, the solutions that take into account the driver's ability to mobilize the required internal resources to meet the task demands are needed.

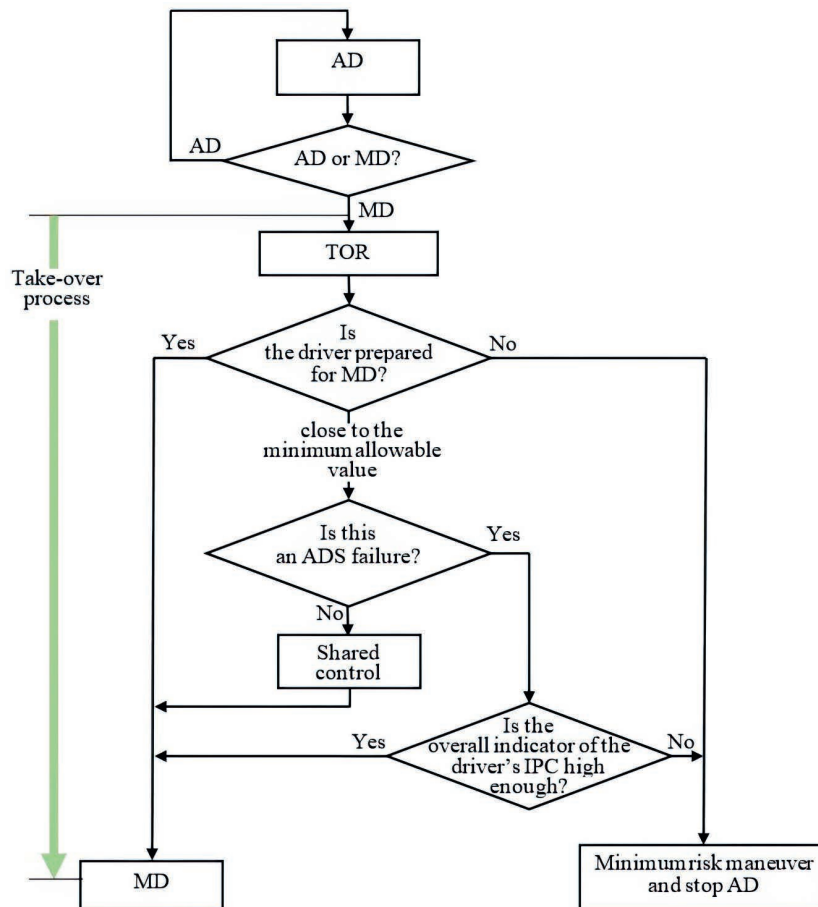


Fig. 5. A diagram of the transition of vehicle control between AD and MD using shared authority mode, or decision-making based on the current driver's IPC information

Conclusion

In this paper, we propose a new approach to transfer control from automated vehicle to a human driver based on the use of information about driver's individual psychophysiological characteristics during decision-making in critical situations to mitigate safety risks. The approach involves collecting data on the driver's individual psychophysiological characteristics such as motor reaction, ability to act urgently, concentration and distribution of attention, and so on, during periods of manual driving and using them in critical take-over situations during automated driving. This approach allows for more flexibility, validity, and reliability in the decision-making during critical take-over situations.

References

1. Tanelli M., Toledo-Moreo R., Stanley L. M. (2018) Multifaceted Driver-Vehicle Systems: Toward More Effective Driving Simulations, Reliable Driver Modeling, and Increased Trust and Safety. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 48 (1), 1–5. <https://doi.org/10.1109/thms.2017.2784018>.
2. J3016_201401. *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*. Washington, DC, SAE International.
3. Morales-Alvarez W., Sipele O., Léberon R., Tadjine H. H., Olaverri-Monreal C. (2020) Automated Driving: A Literature Review of the Take Over Request in Conditional Automation. *Electronics*. 9 (12). <https://dx.doi.org/10.3390/electronics9122087>.
4. Saito T., Wada T., Sonoda K. (2018) Control Authority Transfer Method for Automated-to-Manual Driving via a Shared Authority Mode. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 3 (2), 198–207.
5. Gold C., Körber M., Lechner D., Bengler K. (2016) Taking over Control from Highly Automated Vehicles in Complex Traffic Situations: The Role of Traffic Density. *Human Factors*. 58 (4), 642–652.
6. Framework Document on Automated/Autonomous Vehicles. *World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations*. 180th Session, Geneva. 2020, 10–12 March. <https://undocs.org/ECE/TRANS/WP.29/2019/34/Rev.2>.

7. Proposal for a New UN Regulation on Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regards to Automated Lane Keeping Systems. *Informal Document GRVA-06-02-Rev.3 6th GRVA, 3–4 March 2020*. Available: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2020/wp29grva/GRVA-06-02r4e.pdf> (Accessed 2 February 2023).
8. Halin A., Verly J. G., Droogenbroeck M. V. (2021) Survey and Synthesis of State of the Art in Driver Monitoring. *Sensors*. 21 (16). <https://doi.org/10.3390/s21165558>.
9. Eriksson A., Stanton N. A. (2017) Takeover Time in Highly Automated Vehicles: Noncritical Transitions to and from Manual Control. *Human Factors*. 59 (4), 689–705. <https://doi.org/10.1177/0018720816685832>.
10. Zhang B., de Winter J., Varotto S., Happee R., Martens M. (2019) Determinants of Take-Over Time from Automated Driving: A Meta-Analysis of 129 Studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 64, 285–307. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.04.020>.
11. Chen C., Lin Z., Zhang S., Chen F., Chen P., Zhang L. (2021) The Compatibility Between the Takeover Process in Conditional Automated Driving and the Current Geometric Design of the Deceleration Lane in Highway. *Sustainability*. 13 (23). <https://doi.org/10.3390/su132313403>.
12. Zhang S., Pang R., Zhao J. (2019) Reliability of Human-Machine Evaluation Method for Cabs. *International Journal of Performability Engineering*. 15 (5), 1389–1399. <https://doi.org/10.23940/ijpe.19.05.p15.13891399>.

Received: 19 February 2026

Accepted: 15 April 2026

Authors' contribution

Dubovsky V. developed algorithms, prepared the manuscript of the article.
Savchenko V. formulated the research task, performed analysis of results.

Information about the authors

Dubovsky V., Cand. Sci. (Tech.), Leading Researcher, The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus

Savchenko V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Research Center “On-Board Control Systems for Mobile Vehicles”, The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Akademicheskaya St., 12
The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 17 370-07-49
E-mail: vdubovsky.email@gmail.com
Dubovsky Vladimir

