

ДОКЛАДЫ БГУИР

Том 23, № 2, 2025

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

Лазарук С. К., Лешок А. А., Долбик А. В., Томашевич Л. П., Ключкий А. Ю., Дудич В. В., Лабунов В. А., Ефименко С. А., Ковальчук Н. С., Кицюк Е. П., Рязанов Р. М., Басаев А. С., Светухин В. В. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для СВЧ-диапазона частот.....	5
Golosov D. A., Zhang J., Zavadski S. M., Melnikov S. N., Doan H. T., Alexandrovitch P. A. Influence of Zirconium Doping on the Dielectric Properties of Hafnium Oxide Films (Голосов Д. А., Джанг Дж., Завадский С. М., Мельников С. Н., Доан Х. Т., Александрович П. А. Влияние легирования цирконием на диэлектрические свойства пленок оксида гафния).....	12
Гревцов Н. Л. Синтез пленочных сплавов кремний-германий на основе химически формируемых слоев пористого кремния.....	20
Mishchanka V. N. First-Principles Modeling of Electron-Phonon Scattering Rates in Hydrogenated Graphene (Мищенко В. Н. Мищенко, В. Н. Моделирование из первых принципов интенсивностей электронно-фононного рассеивания в гидрированном графене).....	28
Кийко В. Н., Наумович Н. М., Давыдов М. В., Журавлёв В. И. Уменьшение фазовых шумов высокостабильных кварцевых генераторов при воздействии вибрации посредством тросовых виброизоляторов.....	35
Осипов А. Н., Ма Т., Рокач В. А. Анализ электрических сигналов, возбуждающих низкотемпературную атмосферную плазму диэлектрического барьерного разряда.....	44
Синькевич Е. В., Мордачев В. И., Фаю Ван, Ционенко Д. А., Шакинко И. В. Экспериментальные исследования и разработка моделей нелинейности смесителей диапазона FR1 для анализа электромагнитной совместимости.....	53
Дик С. К., Гасенкова И. В. Характеристики устойчивости солнечных батарей в условиях эксплуатации.....	61
Fiadosenka U. S., Linxi Dong, Chenxi Yue, Gorokh G. G. Proactive Multisensory Solution for Mitigating Thermal Runaway Risks in Li-Ion Batteries (Федосенко В. С., Линкси Донг, Ценкси Юэ, Горох Г. Г. Проактивное мультисенсорное решение для снижения риска перегрева литий-ионных аккумуляторов).....	70
Шершнев Е. Б. Особенности изготовления элементной базы высокотемпературной электроники лазерным излучением.....	77
Чебаков С. В., Серебряная Л. В. Построение порождающих допустимых подмножеств в задаче о ранце.....	84
Ярмолик В. Н., Петровская В. В., Шевченко Н. А. Построение управляемых вероятностных тестов с малым числом тестовых наборов.....	92
Кривальцевич Е. А., Вашкевич М. И. Исследование аппаратной реализации нейронной сети прямого распространения для распознавания рукописных цифр на базе FPGA.....	101
Герасимов В. А., Герасимова М. А., Кузнецов А. П. Методика реализации системы электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры в информационных системах учреждений общего среднего образования.....	109

**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 Т. В. Мироненко

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

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

Подписано в печать 10.04.2025. Формат бумаги 60×84¼. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 13.72. Уч.-изд. л. 11,5. Тираж 75 экз. Заказ 47.

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

Индекс для индивидуальной подписки 00787. Индекс для ведомственной подписки 007872

DOKLADY BGUIR

V. 23, No 2, 2025

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

Lazarouk S. K., Leshok A. A., Dolbik A. V., Tamashevich L. P., Klutsky A. Y., Dudich V. V., Labunov V. A., Efimenko S. A., Kovalchuk N. S., Kitsyuk E. P., Ryazanov R. M., Basaev A. S., Svetukhin V. V. Avalanche LEDs Based on Nanostructured Silicon for Microwave Frequency Range.....	5
Golosov D. A., Zhang J., Zavadski S. M., Melnikov S. N., Doan H. T., Alexandrovitch P. A. Influence of Zirconium Doping on the Dielectric Properties of Hafnium Oxide Films	12
Grevtsov N. L. Synthesis of Silicon-Germanium Film Alloys Based on Chemically Formed Porous Silicon Layers.	20
Mishchanka V. N. First-Principles Modeling of Electron-Phonon Scattering Rates in Hydrogenated Graphene	28
Kiyko V. N., Naumovich N. M., Davydov M. V., Zhuravliov V. I. Reduction of Phase Noise of Highly Stable Quartz Oscillators Under Vibration by Means of Cable Vibration Isolators	35
Osipov A. N., Ma T., Rokach V. A. Analysis of Electrical Signals Exciting Low-Temperature Atmospheric Plasma of Dielectric Barrier Discharge	44
Sinkevich E. V., Mordachev V. I., Fayu Wan, Tsyenenka D. A., Shakinka I. V. Experimental Research and Development of Nonlinearity Models for FR1 Range Mixers for Electromagnetic Compatibility Analysis.....	53
Dzik K. S., Gasenkova I. V. Characteristics of Solar Panel Stability Under Operating Conditions.....	61
Fiadosenka U. S., Linxi Dong, Chenxi Yue, Gorokh G. G. Proactive Multisensory Solution for Mitigating Thermal Runaway Risks in Li-Ion Batteries	70
Shershnev E. B. Features of Manufacturing the Element Base of High-Temperature Electronics Using Laser Radiation	77
Chebakov S. V., Serebryanaya L. V. Construction of Generating Feasible Subsets in the Knapsack Problem	84
Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Shauchenka M. A. Constructing Controlled Random Tests with a Small Number of Test Patterns	92
Krivalcevich E. A., Vashkevich M. I. Investigation of Hardware Implementation of a Feedforward Neural Network for Handwritten Digit Recognition Based on FPGA	101
Gerasimov V. A., Gerasimova M. A., Kuznezov A. P. The Methodology of Implementing an Electronic Digital Signature System Based on a Virtual Infrastructure in the Information Systems of General Secondary Education Institutions.....	109

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 T. Mironenka

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.

Signed for printing 10.04.2025. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.

Ed.-pr. l. 13,72. Ed.-ed. l. 11,5. Edition 75 copies. Order 47.

Editorial address

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

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

Index for individual subscription 00787. Index for departmental subscription 007872



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-5-11>

УДК 621.315.592

ЛАВИННЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

С. К. ЛАЗАРУК¹, А. А. ЛЕШОК¹, А. В. ДОЛБИК¹, Л. П. ТОМАШЕВИЧ¹,
А. Ю. КЛЮЦКИЙ¹, В. В. ДУДИЧ¹, В. А. ЛАБУНОВ¹, С. А. ЕФИМЕНКО²,
Н. С. КОВАЛЬЧУК², Е. П. КИЦЮК³, Р. М. РЯЗАНОВ³, А. С. БАСАЕВ³, В. В. СВЕТУХИН³

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

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Минск, Республика Беларусь)

³Научно-производственный комплекс «Технологический центр» (Москва, Российская Федерация)

Аннотация. Для развития кремниевой фотоники необходима разработка эффективного источника светового сигнала. В качестве такого источника могут использоваться лавинные кремниевые светодиоды. В статье рассмотрены лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния. Измерение емкости светодиодных структур показало, что при уменьшении площади светодиодов до 100 мкм² суммарная емкость светодиода и металлической разводки уменьшается до сотен фемтофарад, что обеспечивает лавинным светодиодам функционирование в СВЧ-диапазоне. Показано, что увеличение быстродействия лавинных светодиодов ограничено резистивно-емкостными задержками, зависящими от барьерной емкости диодных структур. Рассмотрены способы увеличения быстродействия лавинных светодиодов как в сверхвысоком частотном диапазоне, так и в гипервысоком диапазоне частот. В частности, при уменьшении рабочей площади светодиодов до 1 мкм² прогнозируется их функционирование во всем гигагерцовом диапазоне частот.

Ключевые слова: светодиоды, лавинный эффект, нанокремний, интегральная фотоника.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для СВЧ-диапазона частот / С. К. Лазарук [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-5-11>.

AVALANCHE LEDS BASED ON NANOSTRUCTURED SILICON FOR MICROWAVE FREQUENCY RANGE

SERGUEI K. LAZAROUK¹, ANDREI A. LESHOK¹, ALEXANDER V. DOLBIK¹,
LEANID P. TAMASHEVICH¹, ALEKSEY Y. KLUTSKY¹, VLADISLAV V. DUDICH¹,
VLADIMIR A. LABUNOV¹, SERGEY A. EFIMENKO², NATALLIA S. KOVALCHUK²,
EVGENY P. KITSYUK³, ROMAN M. RYAZANOV³, ALEXANDER S. BASAEV³,
VYACHESLAV V. SVETUKHIN³

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

²JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (Minsk, Republic of Belarus)

³Scientific-Manufacturing Complex “Technological Center” (Moscow, Russian Federation)

Abstract. Development of an efficient light signal source is a basic necessity for the development of silicon photonics. Avalanche silicon light emitting diodes (LEDs) can serve as such a source. The article discusses avalanche LEDs based on nanostructured silicon. Measurement of the capacitance of LED structures has shown that when the LED area is reduced to 100 μm², the total capacitance of the LED and metal wiring is reduced to hundreds of femtofarads, which ensures the functioning of avalanche LEDs in the microwave range. It is shown that the increase in the speed of avalanche LEDs is limited by resistive-capacitive delays, depending on the barrier capacitance of the diode structures. Methods for increasing the speed of avalanche LEDs in both the ultra-high

frequency range and the hyper-high frequency range are considered. In particular, by reducing the working area of LEDs to $1 \mu\text{m}^2$, they are predicted to function over the entire gigahertz frequency range.

Keywords: LEDs, avalanche effect, nanosilicon, integrated photonics.

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

For citation. Lazarouk S. K., Leshok A. A., Dolbik A. V., Tamashevich L. P., Klutsky A. Y., Dudich V. V., Labunov V. A., Efimenko S. A., Kovalchuk N. S., Kitsyuk E. P., Ryazanov R. M., Basaev A. S., Svetukhin V. V. (2025) Avalanche LEDs Based on Nanostructured Silicon for Microwave Frequency Range. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-5-11> (in Russian).

Введение

Главные проблемы развития кремниевой фотоники связаны с интеграцией фотонных компонентов с элементной базой современных интегральных микросхем (ИМС). Поэтому особое внимание уделяется такому направлению развития кремниевой фотоники, где фотонные компоненты могут быть изготовлены одновременно с электронными компонентами в едином технологическом процессе существующей технологии комплементарных МОП-транзисторов (КМОП) ИМС. В этом случае появляется возможность замены медленных электрических межсоединений быстрыми оптическими межсоединениями [1–7].

При разработке устройств кремниевой фотоники особое внимание уделяется источникам светового сигнала, так как сам кремний, будучи непрямозонным материалом, не способен эффективно излучать свет. Решением данной проблемы может быть использование в качестве источника светового сигнала наноструктурированного кремния, в котором за счет эффекта квантового ограничения происходит трансформация зонной структуры и увеличивается эффективность светоизлучения, по сравнению с обычным кремнием, до нескольких десятков процентов [8].

Лавинные светодиоды на базе наноструктурированного кремния позволили увеличить эффективность и быстродействие светоизлучения по сравнению с аналогами на основе объемно-гомогенного кремния [9–18]. Однако быстродействие лавинных светодиодов ограничивается емкостными задержками, определяемыми барьерной емкостью области пространственного заряда обратносмещенного перехода. В статье показаны конструкции лавинных светодиодов со сниженными значениями барьерной емкости, что обеспечивает функционирование светодиодов в гигагерцовом (СВЧ) диапазоне частот.

Проведение эксперимента

Исследуемые структуры лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния разрабатывались с размерами светоизлучающих пикселей в диапазоне от единиц до сотен микрометров. Матрицы светоизлучающих диодов формировались по ранее разработанной технологии, совмещенной с кремниевой технологией КМОП ИМС. В частности, исходные кремниевые подложки проводили по маршруту изготовления КМОП ИМС до операции создания n -карманов в подложках p -типа [19]. Внутри n -карманов формировали диоды Шоттки между кремниевой подложкой и алюминий-кремниевыми электродами (75 ат.% алюминия и 25 ат.% кремния). Рисунок электродов создавали при помощи операций фотолитографии и локального сквозного анодирования алюминий-кремниевой нанокompозитной пленки. При этом алюминий прокислялся полностью, а кремниевые нанокристаллы окислялись частично, образуя кремниевую наноструктуру, встроенную в оксидную матрицу. После этого на кремниевых пластинах формировали двухуровневую алюминий-кремниевую металлизацию с межуровневым диэлектриком из оксида кремния [19]. Сформированные кремниевые чипы помещали в керамические корпуса с разваркой контактных площадок к корпусным выводам при помощи алюминиевой проволоки.

Характеристики светодиодов измерялись на установке LCR-метр (SCX-4725A, HP, США). Интенсивность светового сигнала регистрировалась арсенид-галлиевым фотодетектором с временной задержкой менее 0,1 пс. В процессе регистрации светового сигнала определялась частота, при которой интенсивность сигнала уменьшалась в два раза относительно аналогичной величины, характерной для низких частот. Это свидетельствовало о задержках, препятствующих внешней модуляции светового отклика.

Результаты исследований и их обсуждение

Фотографии кремниевых чипов с матрицами лавинных светоизлучающих диодов, сформированных с использованием наноструктурированного кремния, представлены рис. 1. Как видно из рисунка, минимальные размеры светоизлучающих пикселей составляют единицы микрон (квадраты с размерами сторон 9 мкм). Матрицы светодиодов состояли из рядов пикселей 5×7 , расположенных в форме прямоугольника. Диапазон рабочих площадей светоизлучающих пикселей – от 100 до $3 \cdot 10^5$ мкм².

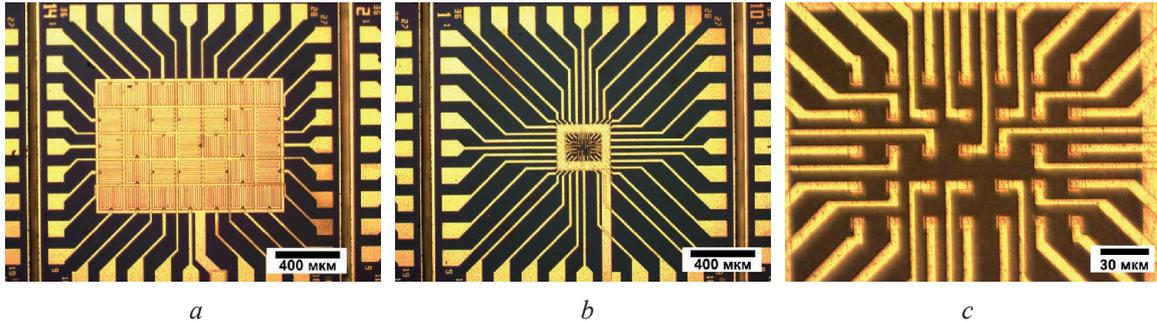


Рис. 1. Фотографии матриц светодиодов на основе наноструктурированного кремния:

a, c – светодиоды площадью 10^4 и 100 мкм² соответственно;

b – светодиоды площадью 100 мкм² при увеличении 500 крат

Fig. 1. Photographs of LED matrices based on nanostructured silicon:

a, c – LEDs with an area of 10^4 and 100 μm², respectively;

b – LEDs with an area of 100 μm² at 500× magnification

На рис. 2 представлены зависимости суммарной емкости светодиодов C от напряжения отрицательного смещения U (до -10 В) для светодиодных структур различной площади. Как видно из рисунка, емкость светодиодов снижается при уменьшении их рабочей площади и увеличении напряжения смещения. Это свидетельствует о том, что основной вклад в емкостные характеристики светодиодов вносит барьерная емкость обедненного слоя контакта Шоттки. Именно при увеличении смещающего напряжения происходит увеличение глубины области пространственного заряда и, следовательно, емкость светодиодов уменьшается.

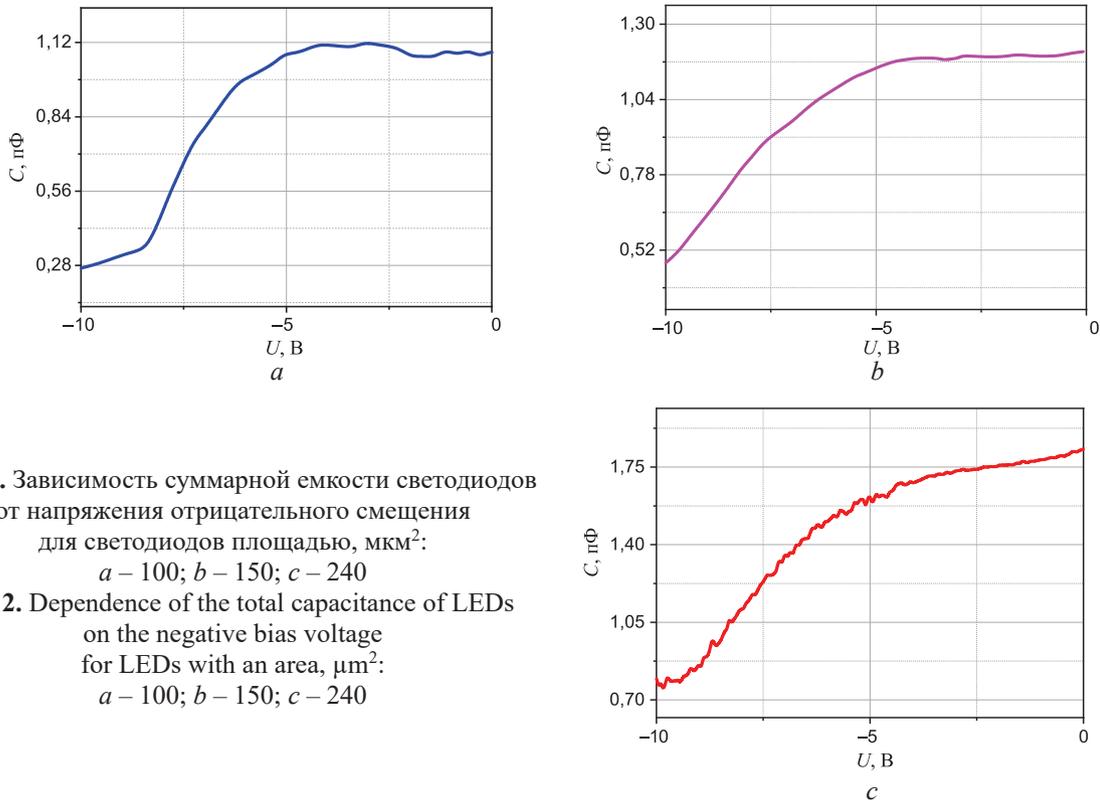


Рис. 2. Зависимость суммарной емкости светодиодов от напряжения отрицательного смещения

для светодиодов площадью, мкм²:

a – 100; *b* – 150; *c* – 240

Fig. 2. Dependence of the total capacitance of LEDs

on the negative bias voltage

for LEDs with an area, μm²:

a – 100; *b* – 150; *c* – 240

На рис. 3 представлен временной отклик фотодетектора на сигнал светодиода, который запитан импульсным электрическим сигналом прямоугольной формы. Следует отметить, что для светодиодов площадью более 10^5 $\mu\text{м}^2$ функционирование наблюдается только в мегагерцовом диапазоне частот, так как временные задержки при генерации световых сигналов превышают 1 нс [5]. Из рис. 3 видно, что время нарастания светового сигнала составляет 4,5 нс, тогда как спад светового сигнала происходит за 3,4 нс. Более быстрое функционирование светодиодов при выключении объясняется тем, что определяющим быстродействием параметром является барьерная емкость области пространственного заряда диодов Шоттки, которая уменьшается при увеличении смещающего напряжения, что уже отмечалось выше.

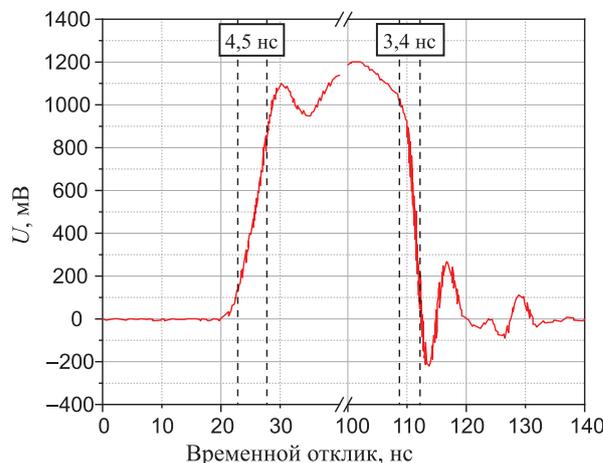


Рис. 3. Временной отклик фотодетектора на сигнал светодиода рабочей площадью $3 \cdot 10^5$ $\mu\text{м}^2$ при пропускании импульсного электрического сигнала прямоугольной формы

Fig. 3. Time response of a photodetector to a signal from a light-emitting diode with a working area of $3 \cdot 10^5$ $\mu\text{м}^2$ when passing a pulsed electrical signal of rectangular shape

На рис. 4 представлены результаты измерения суммарной емкости C сформированных светодиодов всех исследуемых образцов при обратном напряжении 10 В. Выбор данного значения обусловлен тем, что при смещении 10 В и более исследуемые светодиоды излучали свет видимого диапазона, причем световой сигнал регистрировался также невооруженным глазом. Как видно из рис. 4, емкость исследуемых светодиодов практически линейно зависит от их площади для всего диапазона исследуемых размеров экспериментальных образцов. Незначительное отклонение от линейной зависимости при уменьшении рабочих площадей можно объяснить влиянием дополнительной емкости разделительного диэлектрика анодного оксида алюминия, расположенного между алюминиевой разводкой. Но и в этих структурах барьерная емкость контакта Шоттки является доминирующей в измеряемой суммарной емкости. На рис. 4 также приведены значения максимальной частоты функционирования светодиодов.

Экспериментальные измерения проводились для светодиодов с уменьшением рабочей площади от $3 \cdot 10^5$ до 10^4 $\mu\text{м}^2$. Значение предельной частоты при этом увеличивалось от 300 МГц до 6 ГГц. При этом технические возможности применяемого оборудования не позволили проводить измерения при более высоких частотах модуляции. Используя в качестве основы экспериментально установленную линейную зависимость предельной частоты модуляции от рабочей площади светодиодов, на рис. 4 представлены экстраполированные данные для предельных частот модуляции светодиодов площадью менее 10^4 $\mu\text{м}^2$ (рис. 4, прерывистая линия).

На основе анализа приведенных экстраполированных данных можно сделать вывод о том, что в результате уменьшения рабочей емкости светодиодов до значений менее 1 пФ предельная частота модуляции лавинных светодиодов будет соответствовать величинам 100 ГГц и более. Такой вывод подтверждается результатами исследований других авторов [20–24], наблюдавших работу лавинных светодиодов в частотном диапазоне 10–100 ГГц. В развитие представленного вывода можно предположить, что уменьшение размера рабочей площади лавинных светодиодов до 1 $\mu\text{м}^2$ позволит им функционировать во всем СВЧ-диапазоне частот. Это согласуется с известным свойством лавинного пробоя в кремнии, для которого характерна временная задержка менее 0,1 пс [25], что позволит осуществлять модуляцию светового сигнала на частотах вплоть до терагерцового диапазона.

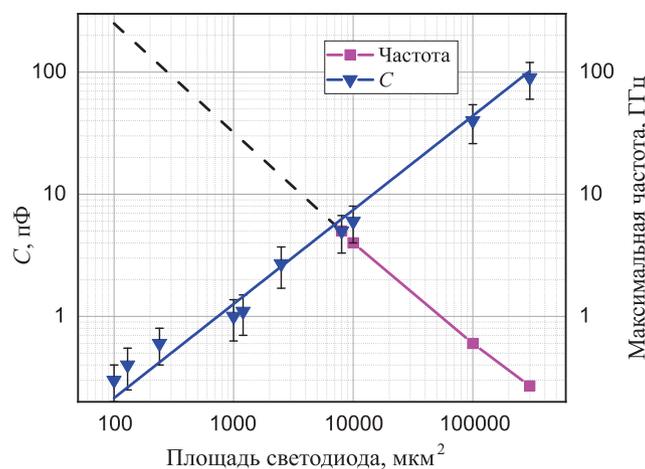


Рис. 4. Зависимость суммарной емкости лавинных светодиодов и их частоты модуляции от площади светодиодов

Fig. 4. Dependence of the total capacitance of avalanche LEDs and their modulation frequency on the area of the LEDs

Заключение

1. Анализируя результаты исследований, можно отметить, что прогресс в создании лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния открывает новые перспективы для развития кремниевой фотоники [1, 26–31]. Представляется возможным создание быстродействующих оптических межсоединений интегральных схем, способных функционировать не только в СВЧ-диапазоне частот, но и при последовательном уменьшении размеров лавинных светодиодов – в терагерцовом диапазоне, соответствующем гипервысокому диапазону частот.

2. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты № Т23МЭ-018 и № Т24В-009.

Список литературы / References

- Lazarouk S. K., Leshok A. A., Kozlova T. A., Dolbik A. V., Vi L. D., Ilkov V. K. (2019) 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 18 (3–4).
- Jaguero P., Katsuba P., Lazarouk S., Moore S., Smirnov A. (2009) Si-Based Optoelectronic Couple. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 41 (6), 1094–1096.
- Lazarouk S., Leshok A., Borisenko V., Mazzoleni C., Pavesi L. (2000) On the Route Towards Si-Based Optical Interconnects. *Microelectronic Engineering*. 50 (1–4), 81–86.
- Lazarouk S., Jaguiro P., Borisenko V. (1998) Integrated Optoelectronic Unit Based on Porous Silicon. *Physica of Status Solidi (a)*. 165 (1), 87–90.
- Lazarouk S. K., Jaguiro P. V., Leshok A. A., Borisenko V. E. (2003) Reverse Biased Porous Silicon Light-Emitting Diodes for Optical Intra-Chip Interconnects. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 16 (3–4), 495–498.
- La Monica S., Maiello G., Ferrari A., Masini G., Lazarouk S., Jaguiro P., et al. (1997) Progress in the Field of Integrated Optoelectronics Based on Porous Silicon. *Thin Solid Films*. 297 (1–2), 265–267.
- Balucani M., La Monica S., Lazarouk S., Maiello G., Masini G., Ferrari A. (1997) Silicon Emitting Device Will Knock Down Communication Bottleneck? *Solid State Phenomena*. 54, 8–12.
- Yizhou H., Qianxi H., Xue Y., Jiamin Y., Chi Z., Ruoyu L., et al. (2025) Triethoxysilane-Derived Silicon Quantum Dots: A Novel Pathway to Small Size and High Crystallinity. *Journal of Materials Science & Technology*. 219, 59–74.
- Katsuba P., Jaguiro P., Lazarouk S., Smirnov A. (2009) Stable Electroluminescence of Nanostructured Silicon Embedded into Anodic Alumina. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 41, 931–934.
- Lazarouk S. K., Leshok A. A., Labunov V. A., Borisenko V. E. (2005) Efficiency of Avalanche Light-Emitting Diodes Based on Porous Silicon. *Semiconductors*. 39 (1), 136–138.
- Lazarouk S., Bondarenko V., La Monica S., Maello G., Masini G., Pershukevich P., et al. (1996) Electroluminescence from Aluminum-Porous Silicon Reverse Bias Schottky Diodes Formed on the Base of Highly Doped *n*-Type Polysilicon. *Thin Solid Films*. 276, 296–298.

12. Lazarouk S., Bondarenko V., Pershukevich P., La Monica S., Maiello G. (1994) Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate *n*-Type Silicon. *MRS Online Proceedings Library Archive*. 358, 659–664.
13. Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., Smirnov A. (2007) Porous Silicon Avalanche LEDs and Their Applications in Optoelectronics and Information Displays. *Acta Physica Polonica A*. 112 (5), 1031–1036.
14. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Katsuba P. S., Labunov V. A., Leshok A. A., Borisenko V. E. (2007) Electroluminescence from Nanostructured Silicon Embedded in Anodic Alumina. *Semiconductors*. 41 (9), 1109–1112.
15. Lazarouk S., Katsouba S., Tomlinson A., Benedetti S. (2000) Optical Characterization of Reverse Biased Porous Silicon Light Emitting Diode. *Materials Science and Engineering*. 69–70, 114–117.
16. Buzaneva E., Gorchinsky A., Popova G., Veblaya T., Zankovych S., Boiko Yu., et al. (2000) Photophysical Properties of Nano Si/SiO_x Composites in Al/Composite Mono Si Structures for Green Light Emitting and Photodetector-Schottky Diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 3, 529–537.
17. Lazarouk S., Bondarenko V., Jaguiro P., Lacquaniti N., La Monica S., Maiello G., et al. (1996) Electrical Characterization of Visible Emitting Electroluminescent Schottky Diodes Based on *n*-Type Porous Silicon and on Highly Doped *n*-Type Porous Polysilicon. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 198–200, 973–976.
18. La Monica S., Balucani M., Lazarouk S., Maiello G., Masini G., Jaguiro P., et al. (1997) Characterization of Porous Silicon Light Emitting Diodes in High Current Density Conditions. *Solid State Phenomena*. 54, 21–26.
19. Le Dinh Vi, Klutsky A. Yu., Dolbik A. A., Leshok A. A., Lazarouk S. K. (2019) Influence of Anodic Alumina Used as Separating Dielectric of Silicon Avalanche LEDs on Diode Characteristics. *Doklady BGUIR*. (7–8), 165–172 (in Russian).
20. Chatterjee A., Bhuvu B., Schrimpf R. (2024) High-Speed Light Modulation in Avalanche Breakdown Mode for Si Diodes. *IEEE Electron Device Letters*. 25 (9), 628–630. DOI: 10.1109/LED.2004.834247.
21. Xu K. (2014) Electro-Optical Modulation Processes in Si-PMOSFET LEDs Operating in the Avalanche Light Emission Mode. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 61 (6): 2085–2092. DOI: 10.1109/TED.2014.2318277.
22. Xu K. (2019) Silicon MOS Optoelectronic Micro-Nano Structure Based on Reverse-Biased PN Junction. *Physica Status Solidi*. 216 (7).
23. Ogudo K. A., Snyman L. W., Polleux J.-L., Viana C., Tegegne Z., Schmieder D. (2014) Towards 10–40 GHz on-Chip Micro-Optical Links with all Integrated Si Av LED Optical Sources, Si N Based Waveguides and Si-Ge Detector Technology. *Proc. SPIE 8991, Optical Interconnects XIV*. 8991, 1–16.
24. Le Dinh Vi, Leshok A. A., Dolbik A. V., Perko S. L., Lazarouk S. K. (2020) Avalanche Leds Based on Nanostructured Silicon for Optical Interconnections. *Doklady BGUIR*. 18 (3), 63–71.
25. Sze S. M., Pub K. K. Ng. (2006) *Physics of Semiconductor Devices*. Print ISBN: 9780471143239.
26. Lazarouk S., Xie Z., Chigrinov V., Kwok H. S. (2007) Anodic Nanoporous Titania for Electro-Optical Devices. *Japanese Journal of Applied Physics*. 46 (7R).
27. Lazarouk S., Leshok A., Dolbik A., Tomashevich L., Klyutsky A., Dudich V., et al. (2024) Development of Avalanche LEDs Based on Nanostructured Silicon for the Gigahertz Frequency Range. *Electronic Design Automation Conference 2024 Proceedings*. 79–82.
28. Lazarouk S., Dudzich U., Klyutsky A., Dolbik A., Labunov V. (2021) Photosensitive Properties of Avalanche LEDs Based on Nanostructured Silicon. *XIX International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations – NDTCS-2021*. 79–80.
29. Belous A. I., Kazak N. S. (2022) Strategy for the Development of Belarusian Microelectronics for the Period 2022–2025. *Russian Electronics*. 16–20.
30. Borisenko V. E. (2014) Nanodimensional Semiconductors and Dielectrics: Achievements of Nanoelectronics and Novel Materials Center of BSUIR. *Doklady BGUIR*. (2), 5–13 (in Russian).
31. Lazarouk S., Bondarenko V., Borisenko V., Gaponenko N., Gorokh G., Leshok A., et al. (2024) Perspective Optical and Electronic Interconnects of Integrated Circuit Elements. *Doklady BGUIR*. (2), 7–19.

Поступила 29.01.2025
Received: 29 January 2025

Принята в печать 17.02.2025
Accepted: 17 February 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Лазарук С. К., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и наноэлектроники, зав. науч.-исслед. лаб. «Интегрированные микро- и наносистемы» (НИЛ 4.6), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Лешок А. А., канд. физ.-мат. наук, доц., нач. науч.-исслед. Центра наноэлектроники и новых материалов, БГУИР

Долбик А. В., науч. сотр. НИЛ 4.6, БГУИР

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

Клюцкий А. Ю., ст. преп. каф. электроники, БГУИР

Дудич В. В., науч. сотр. НИЛ 4.6, БГУИР

Лабунув В. А., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., науч. рук. НИЛ 4.6, БГУИР

Ефименко С. А., канд. техн. наук, гл. констр., зав. лаб., ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

Ковальчук Н. С., канд. техн. наук, доц., зам. ген. дир. – гл. инж., ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Кицюк Е. П., канд. техн. наук, нач. науч.-исслед. лаб. перспективных процессов, НПК «Технологический центр» (НПК «ТЦ»)

Рязанов Р. М., инж., НПК «ТЦ»

Басаев А. С., зам. дир., НПК «ТЦ»

Светухин В. В., д-р физ.-мат. наук, проф., дир., НПК «ТЦ»

Адрес для корреспонденции

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

Information about the authors

Lazarouk S. K., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the R&D Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems” (Lab 4.6), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Leshok A. A., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Scientific Research Center of Nanoelectronics and Novel Materials, BSUIR

Dolbik A. V., Researcher at the Lab 4.6, BSUIR

Tomashevich L. P., Electronics Engineer at the Lab. 4.6, BSUIR

Klutsky A. Y., Senior Lecturer at the Electronics Department, BSUIR

Dudich V. V., Researcher at the Lab 4.6, BSUIR

Labunov V. A., Academician at the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Scientific Director of the Lab 4.6, BSUIR

Efimenko S. A., Cand. Sci. (Tech.), Chief Designer, Head of the Laboratory, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

Kovalchuk N. S., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Deputy General Director – Chief Engineer, JSC “INTEGRAL”

Kitsyuk E. P., Cand. Sci. (Tech.), Head of the R&D Laboratory of Advanced Processes, SMC “Technological Center” (SMC “TC”)

Ryazanov R. M., Engineer, SMC “TC”

Basaev A. S., Deputy Director, SMC “TC”

Svetukhin V. V., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Director, SMC “TC”

Address for correspondence

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



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-12-19>

UDC 621.793; 621.3.049.77

INFLUENCE OF ZIRCONIUM DOPING ON THE DIELECTRIC PROPERTIES OF HAFNIUM OXIDE FILMS

DMITRIY A. GOLOSOV¹, JIN ZHANG², SERGEY M. ZAVADSKI¹,
SERGEY N. MELNIKOV¹, HOANG T. DOAN³, PAVEL A. ALEXANDROVITCH¹

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

²Xi'an Technological University (Xi'an, People's Republic of China)

³Vietnam People's Naval Academy (Nha Trang, Socialist Republic of Vietnam)

Abstract. A comparison of the dielectric characteristics (relative permittivity, dielectric loss tangent, band gap, leakage current and breakdown voltage) of hafnium and hafnium-zirconium oxide films was carried out. It is shown that pulsed reactive magnetron sputtering of a Hf target in an Ar/O₂ working gas environment can be used to obtain HfO_x films with a relative permittivity of $\epsilon = 12.5\text{--}16.0$ and $\epsilon = 12.0\text{--}14.0$ at frequencies of $F = 1$ kHz and $F = 1$ MHz, respectively, with a dielectric loss tangent of $\text{tg}\alpha = 0.012\text{--}0.022$ ($F = 1$ kHz) and $\text{tg}\alpha = 0.053\text{--}0.062$ ($F = 1$ MHz), a leakage current density of $J_L = (1.0\text{--}3.0) \cdot 10^{-3}$ A/m² at an electric field strength of $E = 5 \cdot 10^7$ V/m, with a band gap of $E_g = 5.85\text{--}5.87$ eV and a breakdown field strength of $E_{br} = (2.1\text{--}2.4) \cdot 10^8$ V/m. Doping of hafnium oxide with zirconium (40 at.%) made it possible to reduce the dielectric loss tangent to 0.008–0.012 ($F = 1$ kHz) and to 0.04–0.05 ($F = 1$ MHz), the leakage current density to $(3\text{--}5) \cdot 10^{-5}$ A/m², and increase the breakdown voltage to $(2.5\text{--}3.0) \cdot 10^8$ V/m. At the same time, a slight increase in the relative permittivity of the films to 14–16 was observed at frequencies of 1 kHz and 1 MHz due to a decrease in frequency dispersion from 1.15 to values less than 1.10 and an increase in E_g to 5.86–5.89 eV.

Keywords: thin film, hafnium oxide, hafnium zirconium oxide, reactive magnetron sputtering, composite target, dielectric properties.

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

For citation. Golosov D. A., Zhang J., Zavadski S. M., Melnikov S. N., Doan H. T., Alexandrovitch P. A. (2025) Influence of Zirconium Doping on the Dielectric Properties of Hafnium Oxide Films. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 12–19. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-12-19>.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ЦИРКОНИЕМ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ОКСИДА ГАФНИЯ

Д. А. ГОЛОСОВ¹, ДЖ. ДЖАНГ², С. М. ЗАВАДСКИЙ¹, С. Н. МЕЛЬНИКОВ¹, Х. Т. ДОАН³,
П. А. АЛЕКСАНДРОВИЧ¹

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

²Сианьский политехнический университет (г. Сиань, Китайская Народная Республика)

³Вьетнамская народная военно-морская академия (г. Нячанг, Социалистическая Республика Вьетнам)

Аннотация. Проведено сравнение диэлектрических характеристик (относительной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, ширины запрещенной зоны, тока утечки и пробивного напряжения) пленок оксидов гафния и гафния-циркония. Показано, что импульсным реактивным магнетронным распылением Hf-мишени в среде рабочих газов Ar/O₂ могут быть получены пленки HfO_x с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 12,5\text{--}16,0$ и $\epsilon = 12,0\text{--}14,0$ на частотах $F = 1$ кГц и $F = 1$ МГц соответственно, с тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\varphi = 0,012\text{--}0,022$ ($F = 1$ кГц) и $\text{tg}\varphi = 0,053\text{--}0,062$ ($F = 1$ МГц), плотностью тока утечки $J_L = (1,0\text{--}3,0) \cdot 10^{-3}$ А/м² при напряженности электрического поля $E = 5 \cdot 10^7$ В/м, с шириной запрещенной зоны $E_g = 5,85\text{--}5,87$ эВ и напряженностью поля пробоя $E_{пр} = (2,1\text{--}2,4) \cdot 10^8$ В/м. Легирование оксида гафния цирконием (40 ат.%) позволило уменьшить тангенс угла диэлектрических потерь до 0,008–0,012 ($F = 1$ кГц) и до 0,04–0,05 ($F = 1$ МГц), плотность тока утечки – до $(3\text{--}5) \cdot 10^{-5}$ А/м², увеличить пробивное напряжение до $(2,5\text{--}3,0) \cdot 10^8$ В/м. При этом наб-

людалось незначительное повышение относительной диэлектрической проницаемости пленок до 14–16 на частотах 1 кГц и 1 МГц за счет уменьшения частотной дисперсии от 1,15 до значений менее 1,10 и увеличения E_g до 5,86–5,89 эВ.

Ключевые слова: тонкая пленка, оксид гафния, оксид гафния-циркония, реактивное магнетронное распыление, составная мишень, диэлектрические свойства.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Влияние легирования цирконием на диэлектрические свойства пленок оксида гафния / Д. А. Голосов [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 12–19. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-12-19>.

Introduction

In recent years, there has been an increase in research aimed at studying the properties and developing technologies for depositing thin films of dielectrics with high permittivity (*high-k* dielectrics), and, in particular, hafnium oxide (HfO_2) [1]. Hafnium oxide has high permittivity ($\epsilon \approx 16\text{--}25$), a large band gap ($E_g = 5.6\text{--}5.8$ eV), high thermodynamic stability at the interface with silicon, and high energy barriers for electrons and holes relative to silicon (2.0 and 2.5 eV, respectively) [1–3]. The combination of these properties creates great prospects for the use of amorphous HfO_2 films in silicon microelectronics as an alternative to silicon dioxide in metal-oxide-semiconductor (MOS) structures. As a result, the electrical properties of HfO_2 thin films have been extensively studied, and it has been shown that amorphous hafnium oxide has improved dielectric properties compared to the strong crystalline phase [4]. However, amorphous hafnium oxide does not have sufficient thermal stability and tends to crystallize at temperatures of 400–450 °C [5, 6]. Crystalline HfO_2 is polymorphic and can have three modifications of the crystal lattice in the bulk state: monoclinic, tetragonal and cubic [7]. In this case, the dielectric characteristics depend on the forming structure of the deposited films. In addition, during crystallization, a number of defects in the structure of polycrystalline films are formed, which lead to an increase in leakage currents along grain boundaries [1]. This significantly limits the applicability of hafnium oxide in MOS structures. One of the methods for improving the properties and obtaining heat resistant amorphous HfO_2 films is based on doping hafnium oxide with impurities (e. g. Si, Al, Y, Gd, La, etc.) [8–12]. One of such materials is zirconium, since zirconium oxide ZrO_2 has great similarity to hafnium oxide in structural modification, chemical and physical properties and allows improving the heat resistance of HfO_2 . Films of solid solutions of hafnium-zirconium oxide ($\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$) have been widely studied and were initially considered exclusively as linear dielectrics [13]. Interest in them was due to the search for materials with high permittivity. In 2011, ferroelectric layers were obtained for the first time by doping HfO_2 with zirconium oxide ZrO_2 , and it was found that the highest polarization was obtained for film composition $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ [14]. This further increased interest in $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ films.

One of the promising methods for forming multicomponent oxide films is the method of reactive magnetron sputtering of composite targets, i.e. targets consisting of a matrix of one metal with inserts of other metals [15]. This method allows obtaining multicomponent films with an arbitrary number and content of elements using one magnetron. However, to date, there are practically no publications that would analyze the features of the sputtering processes of composite targets during reactive sputtering. Thus, the aim of the work was to study the effect of zirconium doping on the dielectric properties of hafnium oxide films when using reactive magnetron sputtering of a composite target.

Experiment

The deposition of hafnium and hafnium-zirconium oxide films was performed by pulsed reactive magnetron sputtering of Hf and Hf-Zr targets in an Ar/O_2 working gas mixture. To deposit hafnium oxide films, a Hf target (99.9 % purity) $\varnothing 80$ mm and 2 mm thick was used. To deposit hafnium-zirconium oxide films, a Hf-Zr composite target $\varnothing 80$ mm and 2 mm thick was used, which consisted of two sectors of Hf (99.9 % purity) and Zr (99.9 % purity) in an area ratio of 10:12 (Fig. 1). The ratio of the target sector areas was selected based on the condition of depositing films with an atomic ratio of Zr and Hf in the film of 1:1, which corresponds to the region of formation of a solid solution $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ with stable ferroelectric properties.

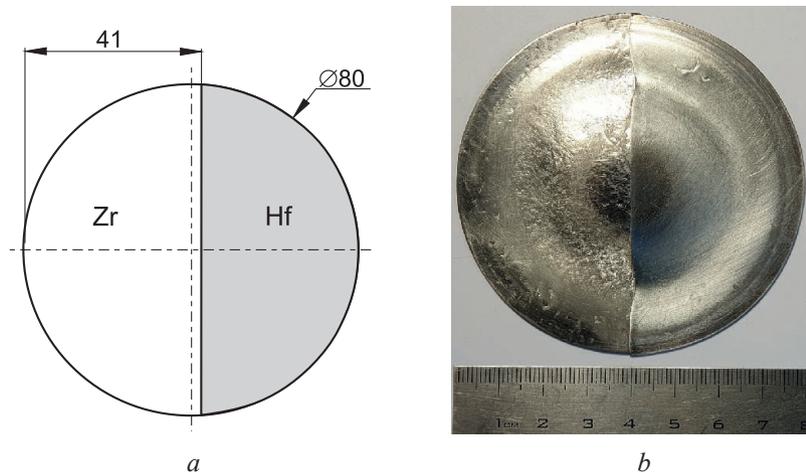


Fig. 1. Scheme (a) and appearance (b) of Hf-Zr composite target

During the experiments, substrates made of highly doped n-type monocrystalline silicon Si(100) and polished optical quartz JGS-1 were mounted on a substrate holder at a distance of 120 mm from the magnetron target surface. The offset of the substrate holder axis relative to the magnetron axis was 100 mm. The substrate rotation rate was 24.5 rpm. The vacuum setup chamber was evacuated to a pressure of 10^{-3} Pa and the substrates were ion-cleaned. For this purpose, Ar was supplied to the ion source. The argon flow was 20 sccm. The cleaning time, voltage and discharge current were constant in all experiments and were $t = 2$ min, $U_d = 90$ V, $I_d = 6.0$ A, respectively. Then the films were deposited. For this purpose, a gas mixture (Ar/O₂) was supplied to the magnetron gas distribution system. The oxygen content in the chamber (G_{O_2}) varied from 0 to 100 % with a total gas flow rate of 60 sccm. The pressure in the chamber was 0.08 Pa. The flow rate of the working gases was controlled using mass flow controller RRG-1. The magnetron was powered by a unipolar pulse current (pulse frequency $F_p = 10$ kHz, duty cycle $D = 80$ %). The magnetron discharge current was maintained constant in all experiments and was $I_t = 1.5$ A. The thickness of the deposited films was about 100 nm and was regulated by the deposition time. The thickness of the deposited films was determined using a POI-08 optical interferometric profilometer. The elemental composition of the deposited films was analyzed by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) using a Bruker QUANTAX 200 Energy Dispersive X-ray spectrometer attachment to a Hitachi S-4800 high-resolution field emission scanning electron microscope.

The dielectric characteristics of the deposited layers were measured on test MOS structures. For this purpose, the upper Ni electrode was deposited on the oxide film through a mask using the ion-beam sputtering method. The area of the upper capacitor electrode was 0.096 mm². The capacitance and dielectric loss tangent in the frequency range from 25 Hz to 1.0 MHz were obtained using an E7-20 immittance meter. The permittivity values were calculated based on the dielectric layer thickness and the capacitance of the capacitor structure. The frequency dispersion of the relative permittivity was calculated as the ratio of the ε values at a frequency of 25 Hz and 1.0 MHz

$$D_F = \frac{\varepsilon(25 \text{ Hz})}{\varepsilon(1.0 \text{ MHz})}.$$

To measure the current-voltage characteristics of the structures, a constant voltage was applied to the capacitor, changing from (–20) to 20 V, and the current flowing through the capacitor was recorded. The breakdown voltage of the MOS structures was recorded using a TR-4805 transistor characteristic tracer. During the measurements, a direct positive voltage was applied to the upper plate of the capacitor and increased from 0 to 50 V at a rate of 0.2 V/s. The breakdown voltage U_b was recorded by a sharp increase in the current through the capacitor with a current limit of 10 mA. During the research, all electrical measurements were made on 10 capacitors from the array and the obtained data were averaged. Optical transmission spectra in the range of 190–900 nm were obtained using a Proscan MS-121 spectrophotometer. The width of the band gap of the films was determined by the edge of their intrinsic optical absorption.

Results and discussion

Fig. 2 shows the dependences of the permittivity and the dielectric loss tangent of the HfO_x films on the oxygen concentration in the Ar/O_2 gas mixture. The studies have shown that the formation of insulating films was observed at an oxygen concentration in the Ar/O_2 gas mixture of more than 12.5 %. At a lower oxygen concentration, the films were electrically conductive and had high values of the dielectric loss tangent ($\text{tg}\varphi > 0.5$).

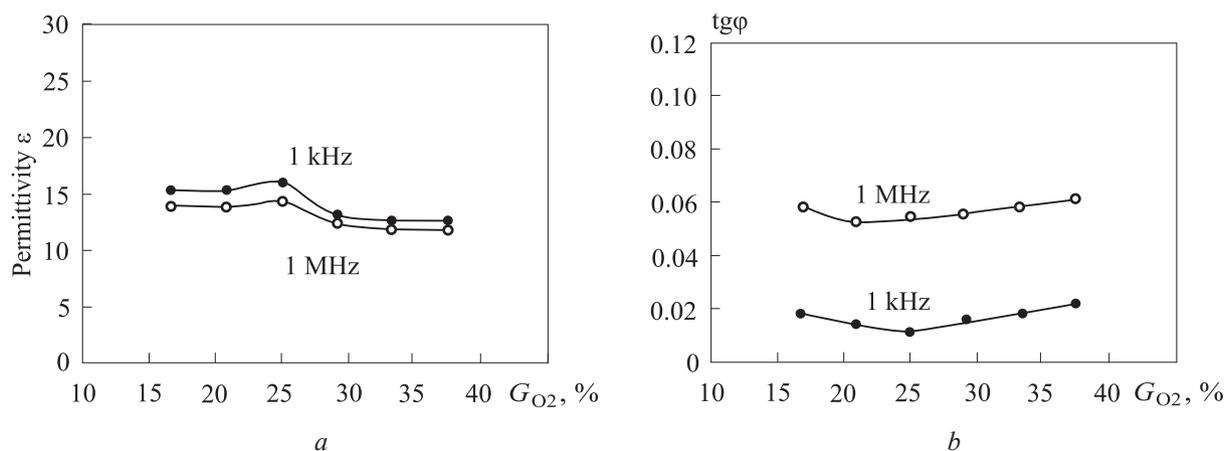


Fig. 2. Permittivity (a) and the dielectric loss tangent (b) of hafnium oxide films as a function of the oxygen concentration in the Ar/O_2 gas mixture

At G_{O_2} more than 16.7 %, films with a permittivity from 12.5 to 16 were deposited (Fig. 2, a). In this case, $\text{tg}\varphi$ was less than 0.02 at a frequency of 1 kHz and less than 0.06 at a frequency of 1 MHz (Fig. 2, b). It should be noted that when G_{O_2} changed in the range from 16.7 to 37.5 %, the values of ϵ and $\text{tg}\varphi$ were practically independent of the oxygen concentration. Analysis of the frequency dependences of the capacitance and dielectric loss tangent showed that the films deposited at an O_2 concentration of 16.7 to 37.5 % had low values of frequency dispersion ($D_F = 1.15$) and dielectric loss tangent over the entire frequency range (from 25 to 10^6 Hz) (Fig. 3). The leakage current density J_L of hafnium oxide films at zero bias was less than 10^{-5} A/m² (Fig. 4). In the films deposited at a low oxygen concentration (less than 12 % O_2), dielectric breakdown occurred at an electric field strength of $E = (3.0\text{--}5.0) \cdot 10^7$ V/m. For the films obtained at an oxygen concentration of 12.5–16.7 %, the leakage current smoothly increased with an increase in the bias voltage and reached a limit of 0.1 A/m² at $E = 5 \cdot 10^7$ V/m. At higher oxygen concentrations (over 20 %), the leakage currents decreased to $(1.0\text{--}3.0) \cdot 10^{-3}$ A/m² at $E = 5 \cdot 10^7$ V/m. The band gap of hafnium oxide films in the O_2 concentration range from 16.7 to 41.6 % remained practically the same and was 5.85–5.87 eV (Fig. 5, a). At lower oxygen contents, E_g decreased to 5.5 eV. The breakdown field strength for films deposited at an oxygen concentration of over 25 % was within the range of $(2.1\text{--}2.4) \cdot 10^8$ V/m (Fig. 5, b).

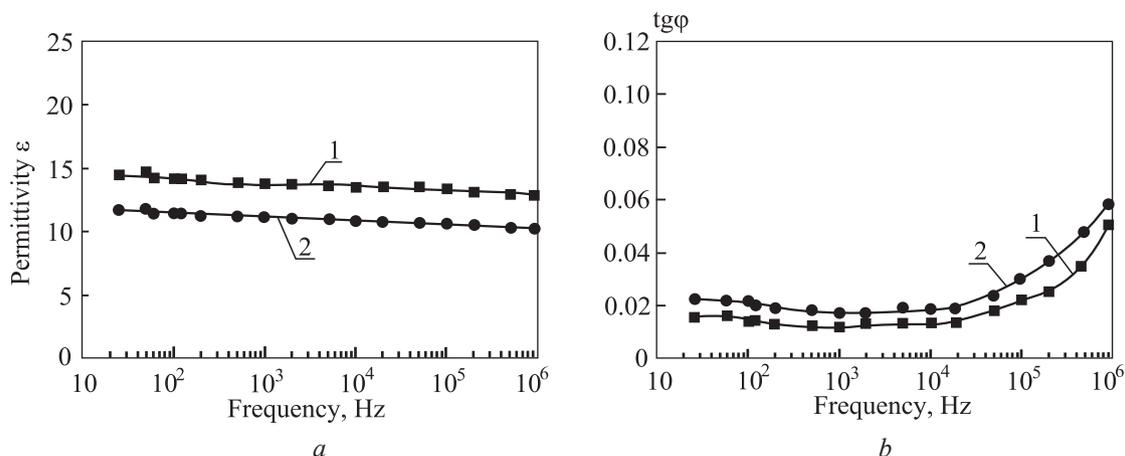


Fig. 3. Frequency dependences of the permittivity (a) and the dielectric loss tangent (b) of HfO_x films deposited at different oxygen concentrations in an Ar/O_2 gas mixture: 1 – 20.8 %; 2 – 37.5 %

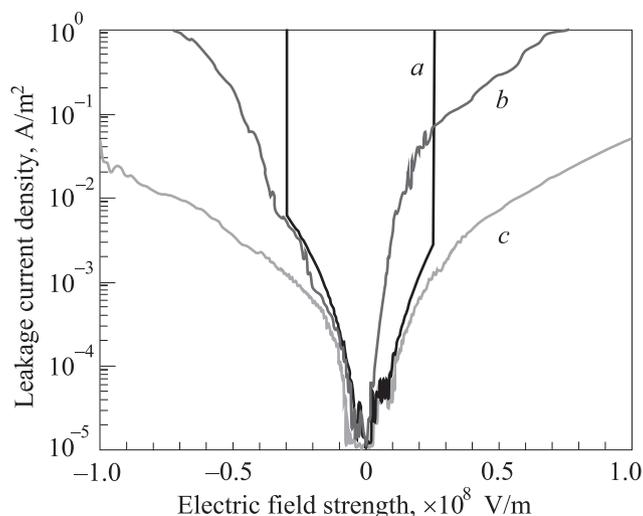


Fig. 4. Dependence of leakage current density on electric field strength for hafnium oxide films deposited at different oxygen concentrations in Ar/O₂ gas mixture: *a* – 9.0 %; *b* – 16.7 %; *c* – 26.0 %

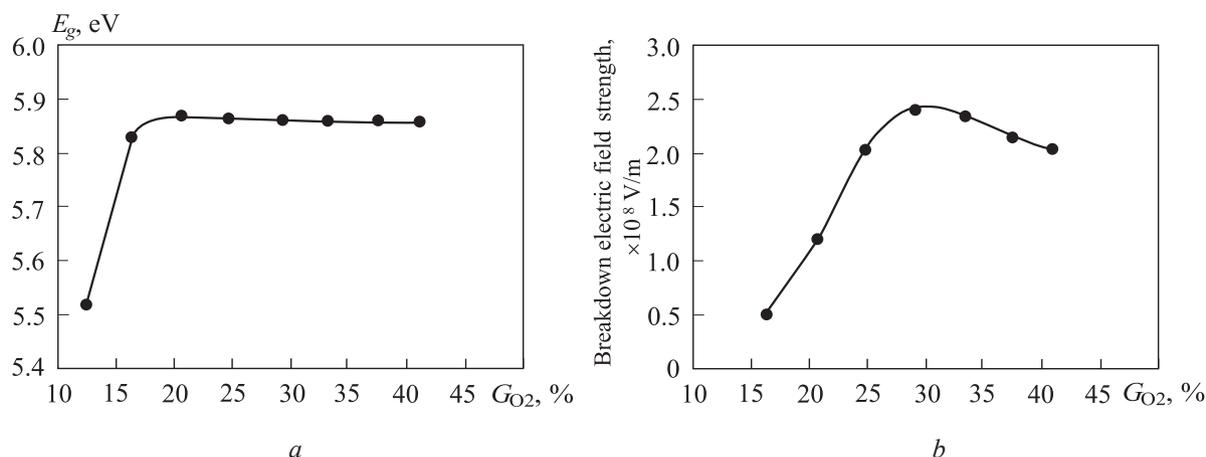


Fig. 5. Dependences of the band gap (*a*) and the breakdown electric field strength (*b*) of hafnium oxide films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture

The effect of zirconium doping on the dielectric characteristics of hafnium oxide films was also studied. To establish a correspondence between the sputtering process parameters, the elemental content in the films and their properties, the elemental composition of the films deposited by sputtering the Hf-Zr composite target was studied. The elemental content analysis by the EDX method showed that when sputtering the Hf-Zr composite target, the metal content in the films was $C_{Zr} = 40.02$ at.% and $C_{Hf} = 59.98$ at.%, respectively. Fig. 6 shows the frequency dependences of the permittivity and the dielectric loss tangent of the hafnium-zirconium oxide films deposited at different oxygen concentrations in the Ar/O₂ gas mixture. The insulating Hf_{0.6}Zr_{0.4}O_y films were formed at G_{O_2} greater than 12.5 %. With an increase in the oxygen concentration, a decrease in ϵ and dielectric losses was noted, especially at high frequencies. It should be noted that the films deposited at G_{O_2} above 20 % were characterized by an extremely low frequency dispersion value (D_F less than 1.1).

Fig. 7 shows the dependences of the relative permittivity and the dielectric loss tangent of the Hf_{0.6}Zr_{0.4}O_y films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture. When doped with zirconium, the permittivity of the hafnium oxide films remained practically the same. However, due to the decrease in frequency dispersion, a slight increase in ϵ was observed at high frequencies (Fig. 7, *a*). Dielectric losses at a frequency of 1 kHz were less than 0.01, and at a frequency of 1 MHz they decreased to 0.05–0.06. It should also be noted that ϵ and $\text{tg}\varphi$ of the hafnium-zirconium oxide films remained practically the same when G_{O_2} varied from 25 to 50 %.

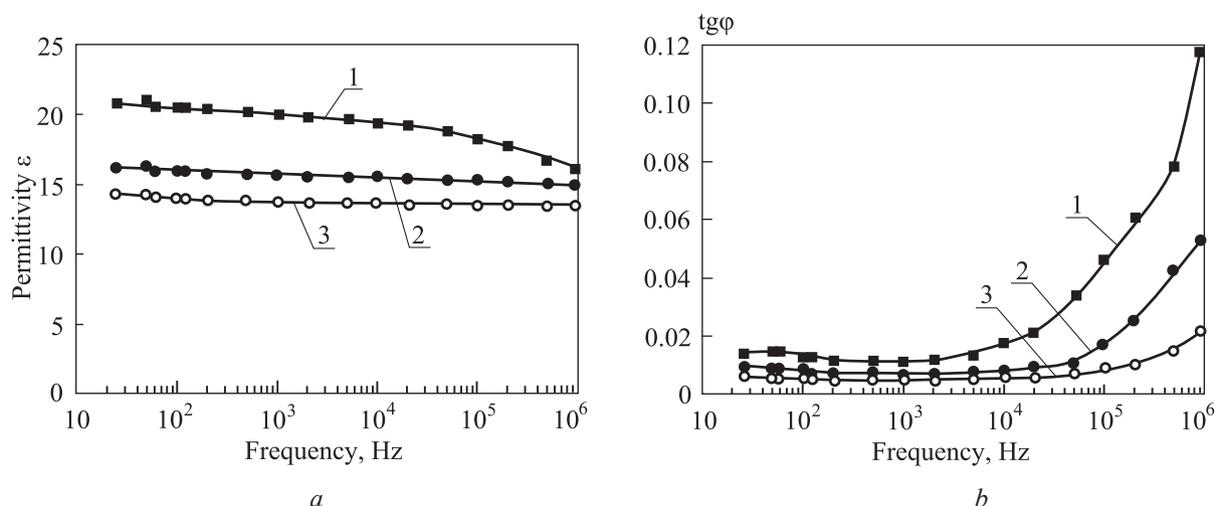


Fig. 6. Frequency dependences of the permittivity (a) and the dielectric loss tangent (b) of $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ films deposited at different oxygen concentrations in the Ar/O_2 gas mixture: 1 – 12.5%; 2 – 16.7%; 3 – 29.2–41.7 %

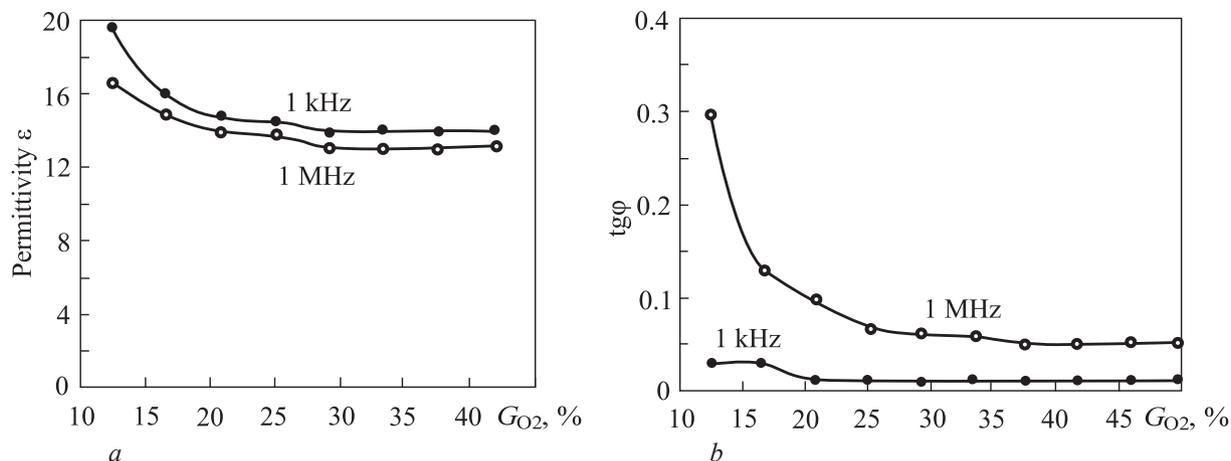


Fig. 7. Dependences of the permittivity (a) and the dielectric loss tangent (b) of hafnium-zirconium oxide films on the oxygen concentration in the Ar/O_2 gas mixture

Fig. 8 shows the dependences of the leakage current density on the electric field strength for hafnium-zirconium oxide films deposited at different oxygen concentrations in the Ar/O_2 gas mixture. The leakage current density of the $\text{Hf}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{O}_y$ films at zero bias for all samples deposited at G_{O_2} above 12.5 % was less than 10^{-5} A/m^2 . When a constant bias voltage was applied, the leakage current increased, and for the sample deposited at $G_{\text{O}_2} = 12.5 \%$, it was $2.0 \cdot 10^{-3} \text{ A/m}^2$ (Fig. 8, a). With an increase in the oxygen concentration in the Ar/O_2 gas mixture, the leakage current density at a constant bias voltage decreased, and at G_{O_2} above 30 % (Fig. 8, c), films with $J_L = (3.0\text{--}5.0) \cdot 10^{-5} \text{ A/m}^2$ at $E = 5 \cdot 10^{-7} \text{ V/m}$ were obtained.

Fig. 9 shows the dependences of the band gap and the breakdown field strength of $\text{Hf}_{0.6}\text{Zr}_{0.4}\text{O}_y$ films on the oxygen concentration in the Ar/O_2 gas mixture during film deposition. The band gap of the films (Fig. 9, a) at G_{O_2} over 20 % was 5.87–5.89 eV and exceeded the E_g values of hafnium oxide. To compare, the band gap of hafnium oxides was 5.85–5.87 eV. The breakdown field strength of the films did not depend on the oxygen concentration and at G_{O_2} over 16.7 % was $(2.5\text{--}3.0) \cdot 10^8 \text{ V/m}$ (Fig. 9, b).

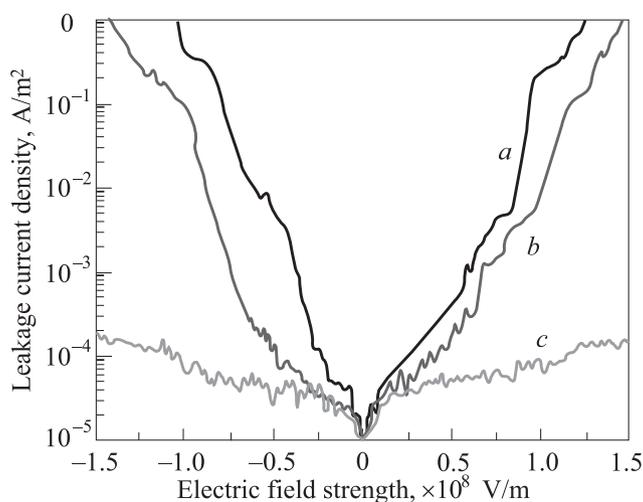


Fig. 8. Dependence of leakage current density on electric field strength for hafnium-zirconium oxide films deposited at different oxygen concentrations in Ar/O₂ gas mixture: *a* – 16.7 %; *b* – 25.0 %; *c* – 29.2–41.7 %

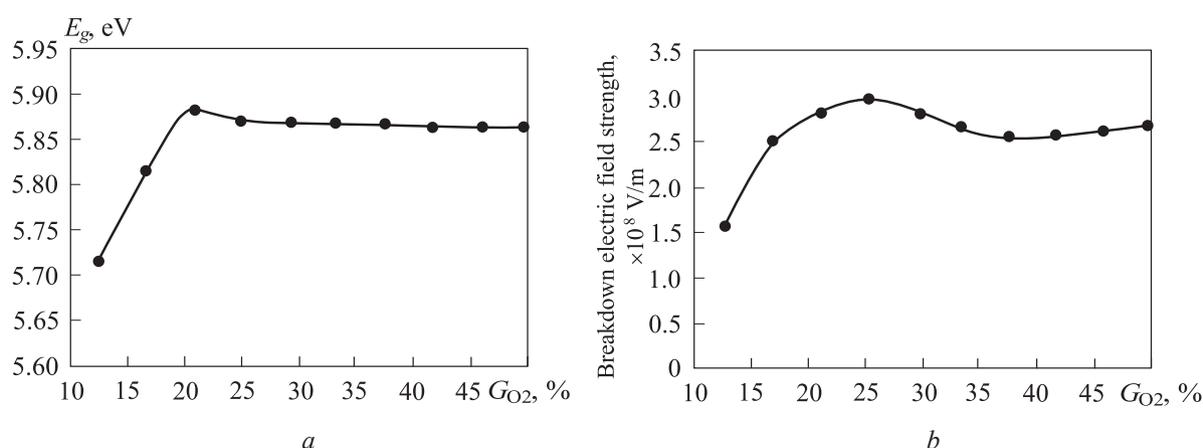


Fig. 9. Dependences of the band gap (*a*) and breakdown field strength (*b*) of hafnium-zirconium oxide films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture

Conclusion

1. The analysis of the obtained results shows that the method of pulsed reactive magnetron sputtering of a Hf target in an Ar/O₂ working gas mixture can be used to depositing hafnium oxide films with $\varepsilon = 12.5\text{--}16.0$ ($F = 1$ kHz), $\varepsilon = 12\text{--}14$ ($F = 1$ MHz), $\text{tg}\varphi = 0.012\text{--}0.022$ ($F = 1$ kHz) and $\text{tg}\varphi = 0.05\text{--}0.06$ ($F = 1$ MHz), $E_g = 5.85\text{--}5.87$ eV, $E_b = (2.1\text{--}2.4) \cdot 10^8$ V/m and relatively low leakage currents $J_L \approx (1.0\text{--}3.0) \cdot 10^{-3}$ A/m² at $E = 5 \cdot 10^7$ V/m. It should be noted that hafnium oxide films with good dielectric characteristics were formed in a relatively wide range of oxygen concentrations in the Ar/O₂ gas mixture (from 20.0 to 37.5 %) and the characteristics of the films were practically independent of G_{O_2} . Doping of hafnium oxide with zirconium (40 at.%) allows to increase the permittivity from 12.5–16 to 14–16 at a frequency of 1 kHz and from 12–14 to 14–16 at a frequency of 1 MHz due to the reduction of frequency dispersion from $D_F = 1.15$ to values less than 1.1, to decrease the dielectric loss tangent to 0.008–0.012 at a frequency of 1 kHz and to 0.04–0.05 at a frequency of 1 MHz, to decrease the leakage current from $(1.0\text{--}3.0) \cdot 10^{-3}$ A/m² to $(3\text{--}5) \cdot 10^{-5}$ A/m² at $E = 5 \cdot 10^7$ V/m and to increase the breakdown voltage from $(2.1\text{--}2.4) \cdot 10^8$ V/m to $(2.5\text{--}3.0) \cdot 10^8$ V/m. At the same time, the band gap of the films remained practically the same and amounted to 5.87–5.89 eV. The obtained characteristics of the Hf_{0.6}Zr_{0.4}O_y films are also observed in a relatively wide range of oxygen concentrations, which should ensure high reproducibility of the properties.

2. The research was carried out within the framework of scientific project No T23ME-013 with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research.

References

1. Zagni N., Puglisi F. M., Pavan P., Alam M. A. (2023) Reliability of HfO₂-Based Ferroelectric FETs: A Critical Review of Current and Future Challenges. *Proceedings of the IEEE*. 111 (2), 158–184.
2. Jones M. N., Kwon Y. W., Norton D. P. (2005) Dielectric Constant and Current Transport for HfO₂ Thin Films on ITO. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 81 (2), 285–288.
3. Zhang H. H., Ma C. Y., Zhang Q. Y. (2009) Scaling Behavior and Structure Transition of ZrO₂ Films Deposited by RF Magnetron Sputtering. *Vacuum*. 83 (11), 1311–1316.
4. Choi W. J., Lee E. J., Yoon K. S., Yang J. Y., Lee J. H., Kim C. O., et al. (2004) Annealing Effects of HfO₂ Gate Thin Films Formed by Inductively Coupled Sputtering Technique at Room Temperature. *Journal of the Korean Physical Society*. 45, S716–S719.
5. Mikhelashvili V., Brener R., Kreinin O., Meyler B., Shneider J., Eisenstein G. (2004) Characteristics of Metal-Insulator-Semiconductor Capacitors Based on High-k HfAlO Dielectric Films Obtained by Low-Temperature Electron-Beam Gun Evaporation. *Applied Physics Letters*. 85, 5950–5952.
6. Li F. M., Bayer B. C., Hofmann S., Dutton J. D., Wakeham S. J., Thwaites M. J., et al. (2011) High-k (k = 30) Amorphous Hafnium Oxide Films from High Rate Room Temperature Deposition. *Applied Physics Letters*. 98.
7. Zhao X., Vanderbilt D. (2002) First-Principles Study of Structural, Vibrational, and Lattice Dielectric Properties of Hafnium Oxide. *Physical Review*. 65.
8. Kim S. J., Mohan J., Summerfelt S. R., Kim J. (2019) Ferroelectric thin Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ films: A review of Recent Advances. *JOM*. 71, 246–255.
9. Schroeder U., Materano M., Mittmann T., Lomenzo P. D., Mikolajick T., Toriumi A. (2019) Recent Progress for Obtaining the Ferroelectric Phase in Hafnium Oxide Based Films Impact of Oxygen and Zirconium. *Japanese Journal of Applied Physics*. 58.
10. Kumar J., Birla S., Agarwal G. (2023) A Review on Effect of Various High-K Dielectric Materials on the Performance of FinFET Device. *Materials Today Proceedings*. 79 (2), 297–302.
11. Kim S. E., Sung J. Y., Yun Y., Jeon B., Moon S. M., Lee H. B., et al. (2024) Atomic Layer Deposition of High-K and Metal Thin Films for High-Performance DRAM Capacitors: A Brief Review. *Current Applied Physics*. 64, 8–15.
12. Jeon S., Yang H., Park D.-G., Hwang H. (2002) Electrical and Structural Properties of Nanolaminate (Al₂O₃/ZrO₂/Al₂O₃) for Metal Oxide Semiconductor Gate Dielectric Applications. *Japanese Journal of Applied Physics*. 41 (4S), 2390–2393.
13. Wong H., Iwai H. (2006) On the Scaling Issues and High-κ Replacement of Ultrathin Gate Dielectrics for Nanoscale MOS Transistors. *Microelectronic Engineering*. 83 (10), 1867–1904.
14. Börske T. S., Müller J., Bräuhäus D., Schröder U., Böttger U. (2011) Ferroelectricity in Hafnium Oxide Thin Films. *Applied Physics Letters*. 99, 102903-1–102903-3.
15. Nakano J., Miyazaki H., Kimura T., Goto T., Zhang S. (2004) Thermal Conductivity of Yttria-Stabilized Zirconia Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 112, S908–S911.

Received: 12 February 2025

Accepted: 10 March 2025

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Information about the authors

Golosov D. A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Leading Researcher at the Center “Ion Plasma Systems and Technologies” (Center 2.1), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Zhang J., Cand. Sci. (Tech.), Researcher at the Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test, Xi'an Polytechnic University

Zavadski S. M., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Center 2.1, BSUIR

Melnikov S. N., Cand. Sci. (Tech.), Leading Researcher at the Center 2.1, BSUIR

Doan H. T., Cand. Sci. (Tech.), Head of the Department of Information Technology, Vietnam People's Naval Academy

Alexandrovitch P. A., Student, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-80-79
E-mail: golosov@bsuir.by
Golosov Dmitriy Anatol'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-20-27>

УДК 544.653

СИНТЕЗ ПЛЕНОЧНЫХ СПЛАВОВ КРЕМНИЙ-ГЕРМАНИЙ НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКИ ФОРМИРУЕМЫХ СЛОЕВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Н. Л. ГРЕВЦОВ

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

Аннотация. Исследован процесс формирования пленок сплавов кремний-германий путем электрохимического заполнения пористой кремниевой матрицы германием с последующим быстрым термическим отжигом при температуре 950 °С в потоке аргона. Слои пористого кремния низкой пористости получены металл-стимулированным химическим травлением слаболегированных кремниевых пластин. Показано, что сформированная в данном температурном режиме пленка сплава всегда расположена на остаточном пористом подслое. При этом различие в толщине исходного слоя пористого кремния определяет не только толщину данного подслоя, но и толщину самой пленки сплава, а также ее состав. Такое поведение объясняется различиями в распределении градиента температуры: в случае более толстых пористых слоев отвод тепла от приповерхностной области слоя осложняется в связи с низкой теплопроводностью пористого кремния, и она подвергается нагреву в большей мере, приводя к росту более толстого слоя сплава с повышенным содержанием кремния. Предполагается, что наличие пористого подслоя способно обеспечить тепло- и электроизоляцию сформированной пленки сплава, что исключит необходимость ее переноса на диэлектрическую подложку для последующего использования в составе термоэлектрических преобразователей и иных устройств.

Ключевые слова: полупроводники, тонкие пленки, пористый кремний, сплав кремний-германий, химическое травление, металл-стимулированное травление, электрохимическое осаждение, легкоплавкие металлы, термоэлектрические материалы, Рамановская спектроскопия.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Автор выражает благодарность И. М. Гаврилину и В. П. Бондаренко за помощь в обсуждении материала, а также Д. В. Жигулину за проведение РЭМ- и EDX-анализа экспериментальных образцов.

Для цитирования. Гревцов, Н. Л. Синтез пленочных сплавов кремний-германий на основе химически формируемых слоев пористого кремния / Н. Л. Гревцов // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 20–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-20-27>.

SYNTHESIS OF SILICON-GERMANIUM FILM ALLOYS BASED ON CHEMICALLY FORMED POROUS SILICON LAYERS

N. L. GREVTSOV

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

Abstract. Formation of silicon-germanium alloy films by electrochemically filling a porous silicon matrix with germanium and subjecting it to rapid thermal processing at 950 °C in argon flow is investigated. Low-porosity porous silicon layers are obtained using metal-assisted chemical etching of lightly-doped silicon wafers. It is shown that the alloy film formed in the employed temperature regime is always located on a residual porous underlayer. The difference in the thickness of the initial porous silicon layer determines not only the thickness of this underlayer, but also that of the alloy film itself, as well as its elemental composition. This behavior is attributed to the difference in the distribution of the temperature gradient, as heat transfer from the subsurface region is great-

ly complicated due to reduced thermal conductivity of thicker porous layers, causing it to be subjected to higher temperatures and leading to the growth of a thicker alloy layer with increased silicon contents. Assumably, the presence of a porous underlayer can thermally and electrically insulate the alloy film from the monocrystalline wafer, eliminating the need to transfer the film to a dielectric substrate for subsequent use in thermoelectric converters and other electronic devices.

Keywords: semiconductors, thin films, porous silicon, silicon-germanium alloy, chemical etching, metal-assisted etching, electrochemical deposition, fusible metals, thermoelectric materials, Raman spectroscopy.

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

Gratitude. The author would like to thank I. M. Gavrilin and V. P. Bondarenko for their assistance in discussing the necessary materials, as well as D. V. Zhigulin for performing SEM and EDX analyses of the experimental samples.

For citation. Grevtsov N. L. (2025) Synthesis of Silicon-Germanium Film Alloys Based on Chemically Formed Porous Silicon Layers. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 20–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-20-27> (in Russian).

Введение

Сплавы кремний-германий ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) длительное время используются в высокотемпературных термоэлектрических преобразователях с высокими стабильностью и термоэлектрической эффективностью [1]. Выдающиеся термоэлектрические свойства при температурах 800–1100 °С обеспечивают широкий спектр областей их применения, начиная от утилизации тепла и заканчивая использованием в составе термоэлектрических генераторов для космических миссий [2]. Тем не менее в связи с высокой стоимостью кристаллического Ge и его газообразных прекурсоров для получения сплавов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ обычно используются составы с низкой концентрацией Ge (например, $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$), не обладающие требуемыми электрофизическими параметрами для эффективного термоэлектрического преобразования [3]. Таким образом, в настоящее время разработка нового недорогого подхода к получению слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, позволяющего в широких пределах управлять количественным соотношением компонентов без существенного влияния на стоимость, остается актуальной задачей.

Контролируемая морфология пористого кремния (ПК) открывает заманчивые перспективы для его использования в качестве структурной матрицы с целью создания нанокompозитов и сплавов [4]. В некоторых исследованиях отмечается, что сильнолегированный мезопористый ПК может применяться для изготовления слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ путем заполнения пор германием и последующей термообработки [5]. Тем не менее подход, подразумевающий электрохимическое осаждение из раствора на базе GeO_2 , не позволяет заполнить германием поры в слаболегированном ПК. Проблемой остается также негативный вклад в электрофизические параметры сплавов нижележащей монокристаллической подложки.

Для осаждения германия на слаболегированные подложки может быть использован электрохимический рост по механизму жидкость-жидкость-твердое тело (ес-LLS). Данный процесс осуществляется с помощью частиц легкоплавкого металла – например, индия. В механизме ес-LLS каждая частица легкоплавкого металла одновременно выступает в роли:

– микроскопического катода (источника электронов), где окисленный полупроводниковый прекурсор (в случае германия – GeO_2) электрохимически восстанавливается до нуль-валентного состояния;

– точки зарождения полупроводниковых кристаллов;

– реагента (для многокомпонентных полупроводников, таких как GaAs) [6].

Рост полупроводниковых кристаллов происходит под каждой металлической частицей с формированием микроразмерной нити непосредственно под ней. Частицы легкоплавкого металла могут быть нанесены на подложку предварительно либо одновременно с осаждаемым полупроводником.

Популярным методом получения слоев ПК на слаболегированных подложках является металл-стимулированное химическое травление (МСХТ), в ходе которого поверхность монокристаллического кремния предварительно покрывается маской из частиц благородного металла требуемой формы, после чего подвергается химической обработке в растворе, содержащем фто-

ристоводородную кислоту и окислитель [7]. За счет каталитических свойств частиц металла реакции окисления и травления кремния непосредственно под ними значительно ускоряются, приводя к формированию задаваемой маской пористой структуры [8].

Целью исследований являлась оценка возможности синтеза и контроля морфологии слоев сплавов кремний-германий с применением в качестве структурной матрицы толстых слоев ПК низкой пористости, получаемых методом МСХТ слаболегированных кремниевых подложек. Предполагается, что такой подход позволит обеспечить формирование слоя сплава, размещенного на поверхности остаточного слоя ПК, обеспечивающего тепло- и электроизоляцию сплава от нижележащей кремниевой подложки.

Методика проведения эксперимента

В качестве подложек для формирования ПК использовались легированные бором монокристаллические кремниевые пластины марки КДБ-12 с кристаллографической ориентацией (100) и удельным сопротивлением 12 Ом·см. Пластины очищались от органических загрязнений путем выдержки в хромовой смеси с последующим удалением оксида кремния в 4,5%-ном водном растворе HF. Химические и электрохимические процессы проводились с применением потенциостата Metrohm Autolab PGSTAT302N в электрохимической ячейке из фторопласта с горизонтально ориентированным рабочим электродом (фрагментом кремниевой пластины), расположенным на дне ячейки и прислоненным обратной стороной к графитовой контактной пластине. В качестве контрэлектрода использовалась спираль из платиновой проволоки, расположенная параллельно поверхности пластины.

Для формирования ПК реализовывалась двухстадийная методика МСХТ, подразумевающая последовательную обработку образца в двух растворах. На первой стадии на поверхность образца химически осаждались частицы серебра путем выдержки в течение 60 с в 3 мМ водном растворе AgNO_3 с добавлением 3 М HF и 1,17 М $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. На второй стадии образцы в течение 8–24 мин подвергались воздействию водного раствора, содержащего 4,37 М HF и 0,28 М H_2O_2 (травитель и окислитель соответственно). Для осаждения германия применялся раствор, содержащий 0,05 М GeO_2 , 0,01 М InCl_3 , 0,5 М K_2SO_4 и 0,1 М $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$. Электролиз проводился в течение 30 мин при плотности тока 2 мА/см² в условиях перемешивания при температуре 85 °С. Благодаря присутствию индия, рост германия протекал на одновременно формируемых частицах легкоплавкого металла в соответствии с механизмом ес-LLS.

Термообработка полученных композитов для формирования слоя сплава осуществлялась при 950 °С в течение 30 с в потоке аргона (800 см³/мин) с использованием системы быстрого термического отжига Annealsys As-One 100. Для исследования структуры и состава образцов применялся растровый электронный микроскоп (РЭМ) Hitachi S-4800, оснащенный спектрометром Bruker QUANTAX 200 для проведения энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Данный метод анализа обеспечивает возможность получения рентгеновского спектра из области поверхности или скола образца объемом порядка 0,5 мкм³. Поскольку изучаемые структуры имеют размеры элементов меньше данного порога, получаемые данные (профили и карты распределения элементов) могут рассматриваться как средние по указанному объему и выражаться в относительных единицах. Такой подход считается обоснованным, поскольку условия проведения анализа оставались неизменными для всех изучаемых объектов, а полученные значения концентрации использовались исключительно для сравнения образцов между собой.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1, 2 представлены РЭМ-изображения боковых сколов и поверхностей образцов на различных стадиях их обработки.

Исходная пористая структура после МСХТ представляет собой слой с круглыми порами, соответствующими по диаметру частицам серебра в исходной маске (20–40 нм). Поскольку частицы серебра удалены друг от друга и не взаимосвязаны, полученные поры вертикальны, однако не строго перпендикулярны поверхности и подвержены небольшому боковому отклонению. Травление в течение 8, 16 и 24 мин приводит к формированию слоев толщиной 2,5, 4,6 и 7,6 мкм соответственно.

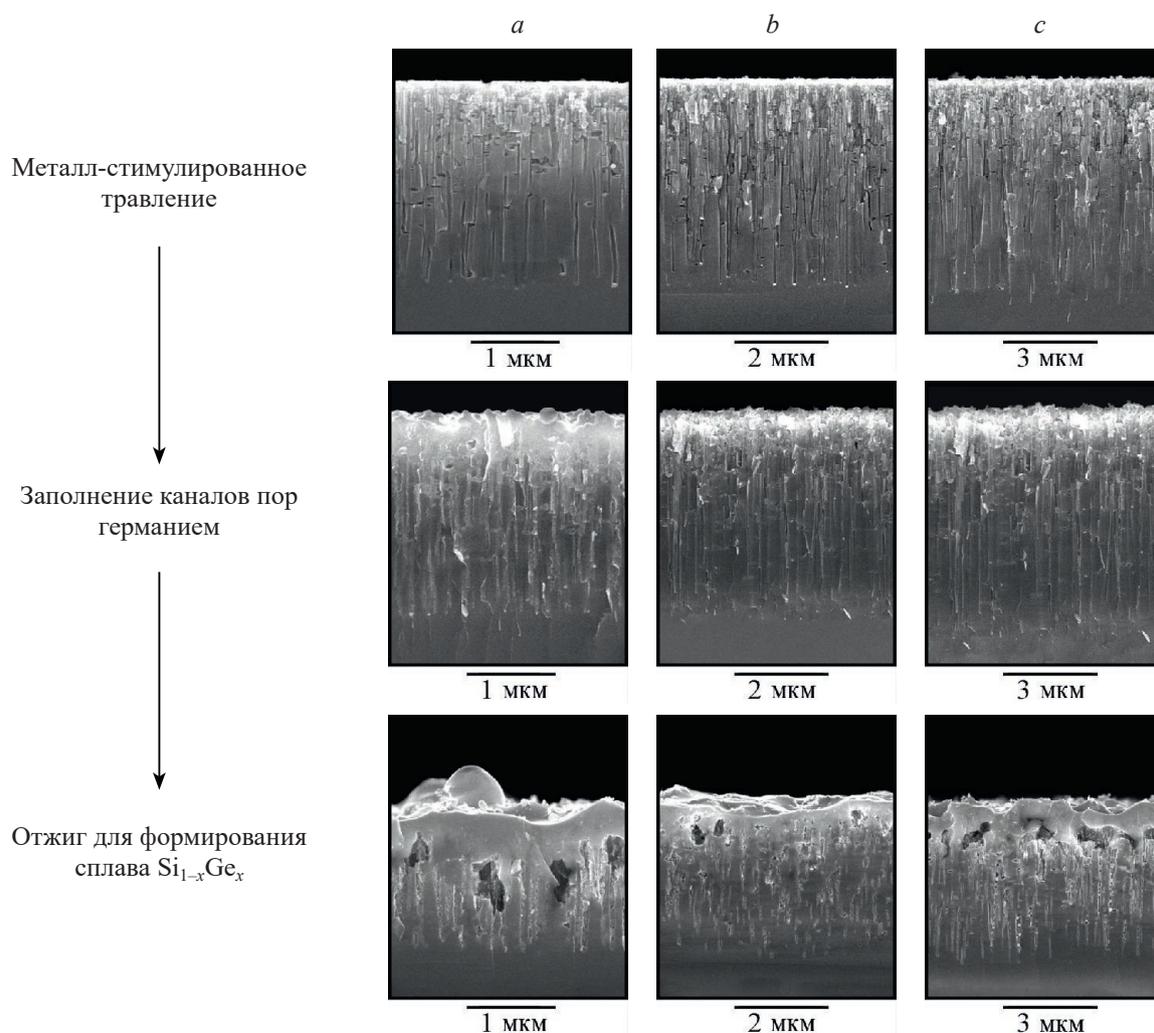


Рис. 1. РЭМ-изображения боковых сколов образцов на различных стадиях обработки, полученных на базе пористого кремния различной толщины, мкм: *a* – 2,5; *b* – 4,6; *c* – 7,6
Fig. 1. Cross-section SEM images obtained at different processing stages for porous silicon layers of varying thicknesses, μm : *a* – 2.5; *b* – 4.6; *c* – 7.6

Согласно анализу изображений поверхности, величина пористости указанных слоев составляет 15, 19 и 25 %. Стоит отметить, что полученные поры обладают повышенным диаметром в приповерхностной области – это связано с постепенным растворением и уменьшением частиц серебра в размере по мере движения в объем подложки в процессе МСХТ, а также с одновременным хаотичным нестимулированным химическим травлением, особенно выраженным на поверхности, где доступ раствора не затруднен вследствие диффузионных ограничений. Данный фактор в том числе обуславливает незначительный рост диаметров пор и повышение неравномерности поверхности, наблюдаемые по мере увеличения толщины слоя.

Как видно из электронных изображений образцов после осаждения германия, рост полупроводника на поверхности осуществляется в виде кристаллитов размерами от 50 до 100 нм, увеличивающимися до 120–200 нм по мере применения слоев большей толщины. Редкие нитевидные образования диаметрами 15–35 нм, особенно ярко выраженные на глубине слоя, обусловлены ростом германия на индиевых частицах по механизму ес-LLS.

Одновременно с этим происходит и более медленный рост на примесных атомах, дефектах и других точках зарождения в соответствии со стандартной электрохимической кинетикой. В связи с высокой температурой раствора, а также с применением перемешивания морфология полученной структуры имеет неравномерный вид: полученный осадок в основном представляет собой конгломераты кристаллитов германия сложной формы и может незначительно отличаться по толщине в разных точках скола образца.

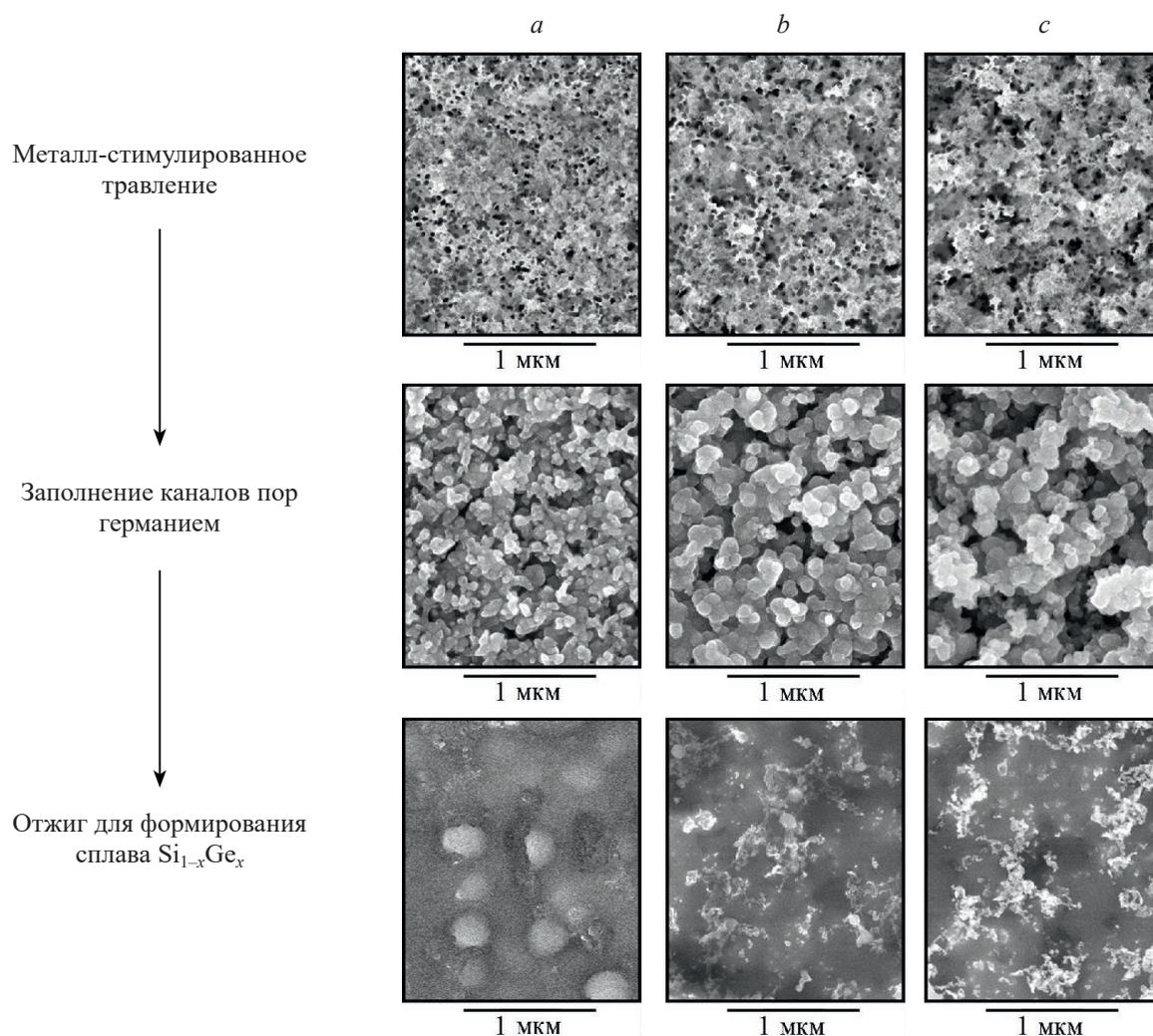


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности образцов на различных стадиях обработки, полученных на базе пористого кремния различной толщины, мкм: *a* – 2,5; *b* – 4,6; *c* – 7,6
Fig. 2. Surface SEM images obtained at different processing stages for porous silicon layers of varying thicknesses, μm : *a* – 2.5; *b* – 4.6; *c* – 7.6

Стоит также отметить существенное превалирование германиевого осадка в приповерхностной области слоя – данная особенность обусловлена уже описанным сужением каналов пор по мере повышения их глубины.

На рис. 3 изображены результаты EDX-картирования готовых образцов сплава после термообработки. Приведенные EDX-профили сняты при сканировании скола образца по диагонали сверху вниз под углом 45° .

Термообработка заполненной германием структуры при температуре 950°C , находящейся выше температуры плавления германия (и достаточно близкой к температуре плавления кремния), приводит к успешному сплавлению двух материалов и формированию равномерного слоя сплава. Во всех случаях полученный слой характеризуется толщиной, составляющей примерно 15 % от толщины исходного слоя, и расположен на остаточном, не подверженном плавлению, пористом подслое, имеющем толщину около 55 % от толщины исходного слоя. Для самой тонкой пленки сплава характерно наличие на поверхности крупных каплевидных образований диаметром до 250 нм, преимущественно состоящих из германия.

Для более толстых слоев крупные капли отсутствуют, однако наблюдаются светлые нитевидные наноразмерные образования кристаллического германия сложной формы. Более точные данные о толщине слоев на образцах приведены в табл. 1.

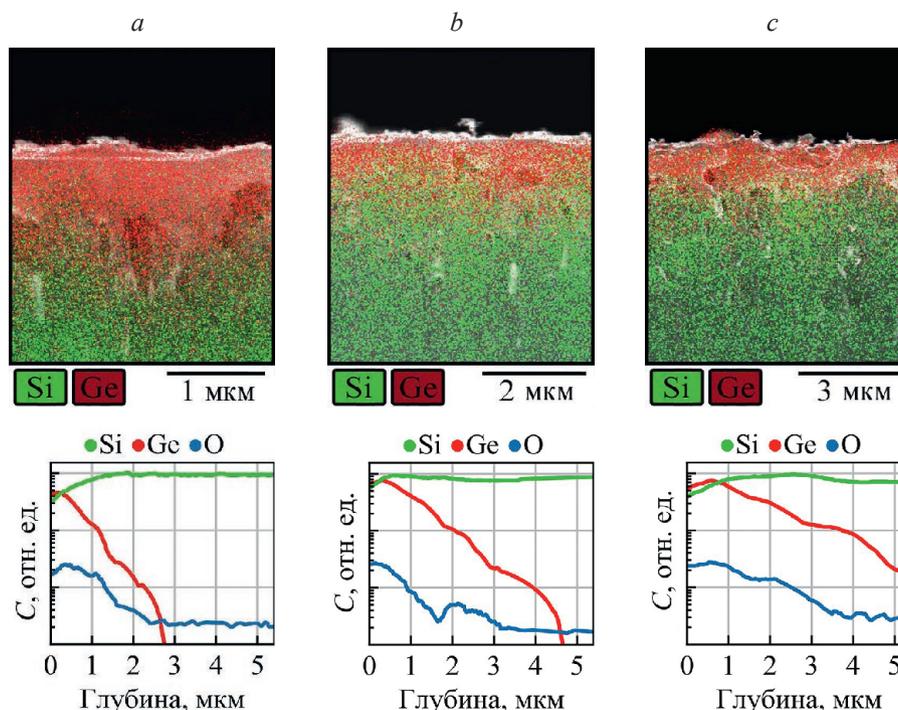


Рис. 3. Результаты EDX-картирования и соответствующие профили распределения концентрации элементов C по глубине сколов образцов сплавов кремний-германий, полученных на базе пористого кремния различной толщины, мкм: $a - 2,5$; $b - 4,6$; $c - 7,6$

Fig. 3. EDX mapping results and accompanying element concentration profiles C over the cross-section depth of silicon-germanium alloy samples based on porous silicon layers of varying thicknesses, μm : $a - 2.5$; $b - 4.6$; $c - 7.6$

Таблица 1. Параметры полученных пористых слоев и сплавов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на их основе
Table 1. Parameters of the obtained porous layers and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloys based thereon

исходного пористого слоя	Толщина, мкм		Состав полученного сплава
	полученного слоя сплава	остаточного пористого подслоя под слоем сплава	
2,5	0,324	1,256	$\text{Si}_{0,46}\text{Ge}_{0,54}$
4,6	0,486	2,714	$\text{Si}_{0,51}\text{Ge}_{0,49}$
7,6	0,778	4,610	$\text{Si}_{0,54}\text{Ge}_{0,46}$

Следует отметить, что существенная реструктуризация ПК наблюдается значительно ниже температуры плавления объемного кремния, составляющей 1414°C . Так, согласно предварительным результатам, отжиг ПК без германиевого осадка в аналогичном режиме приводит к частичному оплавлению стенок пор в приповерхностном слое толщиной около $2-3$ мкм. Данный спеченный слой также демонстрирует несколько увеличенный диаметр пор, позволяющий расплавленному германию легче проникать и закрепляться в них. Нижележащие области остаются практически неизменными – это объясняется тем, что они подвергаются воздействию меньших температур из-за градиентной теплопередачи в объем пластины. Учитывая вышесказанное, можно заключить, что используемое значение температуры было достаточно высоким, чтобы расплавить германиевый осадок и обеспечить его сплавление с элементами кремниевого скелета ПК, сформировав сплав кремний-германий в приповерхностной области каждого образца. При этом более глубокие области остаются не сплавленными из-за недостаточной температуры и наличия препятствий на пути потока жидкого германия, что приводит к формированию пленки сплава, размещенной на остаточном пористом подслое. Предположительно, частичная термическая и электрическая изоляция, предоставляемая таким подслоем, позволит повысить термоэлектрические характеристики получаемых пленок сплава, а также отказаться от переноса готовых пленок на диэлектрическую подложку.

Спектры комбинационного рассеяния, зарегистрированные с поверхности образцов после осаждения германия и последующей термообработки, приведены на рис. 4.

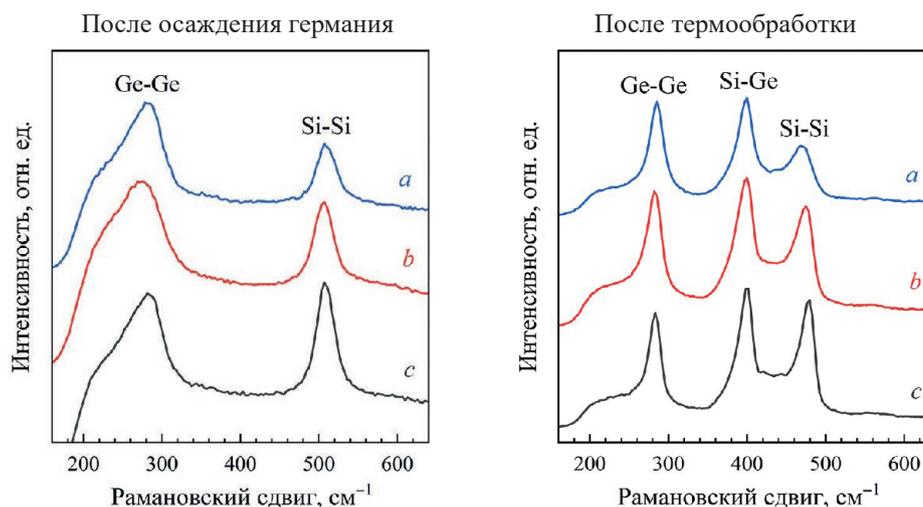


Рис. 4. Рамановские спектры образцов, основанных на пористом кремнии различной толщины, мкм: $a - 2,5$; $b - 4,6$; $c - 7,6$

Fig. 4. Raman spectra of samples based on porous silicon of different thickness, μm : $a - 2.5$; $b - 4.6$; $c - 7.6$

Пористый кремний характеризуется наличием одной полосы с Рамановским сдвигом порядка 521 см^{-1} , соответствующей трижды вырожденной оптической колебательной моде монокристаллического кремния Si(LO). После осаждения германия в спектре также появляется максимум с волновым числом порядка 300 см^{-1} , описывающий аналогичную колебательную моду кристаллического германия Ge(LO). Наконец, в спектрах образцов после термообработки начинает наблюдаться третья полоса, расположенная на 400 см^{-1} и соответствующая связям Si-Ge. Остальные полосы также становятся более узкими и теряют симметричность, что указывает на проявление низкоразмерных эффектов, поверхностных состояний, дефектов или нестехиометрического состава материала.

Известно, что положение полос комбинационного рассеяния и интенсивность их максимумов коррелируют с конкретным составом сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Для оценки состава полученных пленок сплава могут быть использованы следующие известные соотношения [9]:

$$\frac{I_{\text{Si-Si}}}{I_{\text{Si-Ge}}} = \frac{A(1-x)}{2x}, \quad (1)$$

$$\frac{I_{\text{Ge-Ge}}}{I_{\text{Si-Ge}}} = \frac{Bx}{2(1-x)}, \quad (2)$$

где I – интенсивность соответствующих полос на спектрах комбинационного рассеяния; A, B – эмпирические коэффициенты, служащие для компенсации резонансных эффектов, приводящих к зависимости интенсивности полосы от длины волны возбуждения.

В рассматриваемом случае использовались значения $A = 1,5$ и $B = 1,8$, которые учитывают максимально возможный диапазон концентраций германия в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ [9]. Рассчитанные с помощью (1) и (2) элементные составы сплава для образцов, полученных на базе слоев ПК различной толщины, приведены в табл. 1.

Полученные результаты показывают, что пленка сплава, сформированная в данном температурном режиме на основе толстого слоя ПК низкой пористости, всегда расположена на остаточном пористом подслое. При этом различие в толщине исходного слоя ПК определяет толщину не только данного подслоя, но и самой пленки сплава, а также влияет на ее состав. Данное поведение с наибольшей вероятностью объясняется различиями в распределении градиента температуры: в случае более толстых пористых слоев отвод тепла от приповерхностной области слоя осложняется в связи с низкой теплопроводностью ПК, и она подвергается нагреву в большей мере, приводя к росту более толстого слоя сплава с повышенным содержанием кремния.

Заклучение

1. Продемонстрировано, что пленки сплавов кремний-германий могут быть сформированы на основе слоев пористого кремния низкой пористости, получаемых металл-стимулированным химическим травлением. Осаждаемый германий преимущественно занимает приповерхностную область пористого слоя, что в результате термообработки приводит к формированию пленки сплава толщиной 0,3–0,8 мкм, лежащей на остаточном пористом слое. Предположительно, наличие пористого подслоя способно обеспечить тепло- и электроизоляцию сформированной пленки, что исключит необходимость переноса готовой пленки сплава на диэлектрическую подложку для последующего использования в составе термоэлектрических преобразователей и иных устройств.

2. Исследование проведено в рамках научно-исследовательской работы «Формирование сплавов кремний-германий термообработкой композитов наноструктурированного кремния и германия для термоэлектрических преобразователей», выполняемой по гранту Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № T23M-040).

References

1. Schwinge C., Hoffmann R., Biedermann K., Czernohorsky M., Kannan J., Rudolph M., et al. (2024) Embedded Silicon-Germanium-Based Thermoelectric Devices on 300-mm Wafer. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 71 (12), 7794–7801. DOI: 10.1109/TED.2024.3482259.
2. Cook B. (2022) Silicon–Germanium: The Legacy Lives On. *Energies*. 15 (8). DOI: 10.3390/en15082957.
3. Rao S., Sahu S., Bano N., Shukla D., Dayal V. (2024) Investigation of Low-Temperature Thermoelectric Properties of $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ Alloy Irradiated by High Energy Electron Beam. *Current Applied Physics*. 57, 33–41. DOI: 10.1016/j.cap.2023.10.012.
4. Chubenko E., Redko S., Dolgiy A., Bandarenka H., Prischepa S., Bondarenko V. (2016) Porous Silicon as Host and Template Material for Fabricating Composites and Hybrid Materials. *Porous Silicon: From Formation to Applications: Optoelectronics, Microelectronics, and Energy Technology Applications, Volume Three*. 183–207.
5. Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S., et al. (2025) Thermoelectric Materials Based on Cobalt-Containing Sintered Silicon-Germanium Alloys. *Materials Research Bulletin*. 184. DOI: 10.1016/j.materresbull.2024.113258.
6. Cheek Q. (2021) *Understanding Nucleation and Growth of Crystalline Germanium Through in-Situ Studies of the ec-LLS Technique*. Available: <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/169893> (Accessed 31 October 2024).
7. Alhmoud H., Brodoceanu D., Elnathan R., Kraus T., Voelcker N. (2021) A MACEing Silicon: Towards Single-Step Etching of Defined Porous Nanostructures for Biomedicine. *Progress in Materials Science*. 116. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100636.
8. Nur'aini A., Oh I. (2022) Deep Etching of Silicon Based on Metal-Assisted Chemical Etching. *ACS Omega*. 7 (19), 16665–16669. DOI: 10.1021/acsomega.2c01113.
9. Volodin V. A., Efremov M. D., Deryabin A. S., Sokolov L. V. (2006) Determination of the Composition and Stresses in $\text{Ge}_x\text{Si}_{(1-x)}$ Heterostructures from Raman Spectroscopy Data: Refinement of Model Parameters. *Semiconductors*. 40 (11), 1314–1320. DOI: 10.1134/S106378260611011X.

Поступила 08.01.2025
Received: 8 January 2025

Принята в печать 04.02.2025
Accepted: 4 February 2025

Сведения об авторе

Гревцов Н. Л., науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Материалы и структуры наноэлектроники», 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 17 293-88-54
E-mail: hrautsou@gmail.com
Гревцов Никита Леонидович

Information about the author

Grevtsov N. L., Researcher at the Research Laboratory “Materials and Structures of Nanoelectronics”, 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 17 293-88-54
E-mail: hrautsou@gmail.com
Grevtsov Nikita Leonidovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-28-34>

UDC 621.794.61

FIRST-PRINCIPLES MODELING OF ELECTRON-PHONON SCATTERING RATES IN HYDROGENATED GRAPHENE

V. N. MISHCHANKA

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

Abstract. Graphene, a representative of a new generation of 2D materials, remains in the center of scientific research as a reflection of its unique electrical and mechanical properties. The article presents the results of a study of electron scattering procedures of optical and acoustic phonons in graphene modified with hydrogen atoms, a C_2H_2 structure known as graphane. The obtained dependences of the scattering rates take into account the combined processes of phonon emission and absorption by electrons, but the interaction of phonons with the substrate material is not considered. The scattering rates play an important role in a detailed study of the dynamics of charge carrier transport in semiconductor structures containing heterogeneous layers. Their use makes it possible to implement the well-known many-particle Monte Carlo method, widely used in modeling complex semiconductor devices. The obtained results will allow us to study new heterostructured devices based on graphene and its modifications with improved output characteristics in high-frequency operating ranges.

Keywords: graphene, phonon, modelling, semiconductor structure.

For citation. Mishchanka V. N. (2025) First-Principles Modeling of Electron-Phonon Scattering Rates in Hydrogenated Graphene. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 28–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-28-34>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ФОНОННОГО РАССЕЙВАНИЯ В ГИДРИРОВАННОМ ГРАФЕНЕ

В. Н. МИЩЕНКО

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

Аннотация. Графен, представитель нового поколения 2D-материалов, остается в центре внимания научных исследований как отражение его уникальных электрических и механических характеристик. В статье излагаются результаты исследования процедур электронного рассеяния оптических и акустических фононов в графене, модифицированном атомами водорода, – структуре C_2H_2 , известной как графан. В полученных зависимостях скоростей рассеяния учтены совместные процессы испускания и поглощения фононов электронами, а взаимодействие фононов с материалом подложки не рассматривалось. Интенсивности рассеяния играют важную роль для детального изучения динамики транспорта носителей заряда в полупроводниковых структурах, содержащих гетерогенные слои. Их использование позволяет реализовать известный многочастичный метод Монте-Карло, широко применяемый при моделировании сложных полупроводниковых приборов. Полученные результаты позволят исследовать новые гетероструктурные приборы на основе графена и его модификаций с улучшенными выходными характеристиками в высокочастотных диапазонах работы.

Ключевые слова: графен, фонон, моделирование, полупроводниковая структура.

Для цитирования. Мищенко, В. Н. Моделирование из первых принципов интенсивностей электронно-фононного рассеивания в гидрированном графене / В. Н. Мищенко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 28–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-28-34>.

Introduction

The study of new two-dimensional materials, among which we should particularly mention graphene and its modifications [1, 2], attracts increased attention of researchers. The charge carrier transport characteristics is constantly in the center attention, due to the fact that such phenomena determine the output performance characteristics of semiconductor devices. In the initial stages of the research, the predominant approach was to develop empirical analytical expressions for scattering rates associated with their various mechanisms, including scattering on optical and acoustic phonons [3–7]. However, the use of a number of simplifying assumptions, and in particular, the assumption of parabolic nature of the energy dependence on the magnitude of the wave vector, without taking into account anisotropy, as well as the need for empirical selection of a number of parameters limits the wide application of this direction in modelling.

New, progressive possibilities for the study of electron transport processes have opened up using a fully *ab initio* approach, which is based on the DFPT (density functional perturbation theory) and the application of Wannier functions to interpolate the obtained results. This approach allows to obtain more accurate values of phonon scattering rates in comparison with experimental measurements of electron and hole mobility and conductivity [8, 9].

In this work, first-principles modeling of electron-phonon scattering rates in hydrogenated graphene has been presented. The use of the obtained modelling results will make it possible to investigate in detail the contribution of various phonon scattering mechanisms in charge carrier transport processes for the complex semiconductor structures.

Method of modeling of electron-phonon scattering rates in hydrogenated graphene

Quantum Espresso [10] and EPW [11, 12] programs were used for the first-principles simulations of hydrogenated graphene (graphane) C_2H_2 type. Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) parametrization within the local density approximation (LDA) and norm-conserving type of the pseudopotentials [13] were used. Next parameters were applied [14]: the cutoff energy of the wave function was 60 Ry (1 Ry \approx 13.605 eV), the cutoff energy of the charge density and potentials was 240 Ry. The Brillouin zone (BZ) was represented using a $12 \times 12 \times 1$ Monkhorst-Pack grid. A vacuum layer of 20 Å thickness (1 Å = $1 \cdot 10^{-10}$ m) was added to the considered structure to avoid unphysical situation during the simulation [14].

The EPW program [11, 12] was used to calculate the scattering rates. At first, the imaginary part of the eigen energy was calculated by

$$\text{Im}\left(\sum_{n,\mathbf{k}} e^{-ph}\right) = \pi \sum_{mv} \int_{\Omega_{\text{BZ}}} \frac{d\mathbf{q}'}{\Omega_{\text{BZ}}} |g_{m\nu}(\mathbf{k}, \mathbf{q})|^2 \times \\ \times \left\{ \left(n_{\mathbf{q}\nu} + f_{m\mathbf{k}+\mathbf{q}} \right) \delta\left((\varepsilon_{n\mathbf{k}} - \varepsilon_{m\mathbf{k}+\mathbf{q}}) + \omega_{\mathbf{q}\nu} \hbar \right) + \left(1 + n_{\mathbf{q}\nu} - f_{m\mathbf{k}+\mathbf{q}} \right) \delta\left((\varepsilon_{n\mathbf{k}} - \varepsilon_{m\mathbf{k}+\mathbf{q}}) - \omega_{\mathbf{q}\nu} \hbar \right) \right\}, \quad (1)$$

where \hbar is the modified Plank constant; $\varepsilon_{n\mathbf{k}}$, $\varepsilon_{m\mathbf{k}+\mathbf{q}}$ are the energies for the bands with number n and wavevector \mathbf{k} and number m and wavevector $\mathbf{k}+\mathbf{q}$ in the Brillouin zone (Ω_{BZ}); $\omega_{\mathbf{q}\nu}$ is the phonon frequency with mode ν and wave vector \mathbf{q} in the BZ over which the integration is performed; $f_{m\mathbf{k}+\mathbf{q}}$, $n_{\mathbf{q}\nu}$ are the Fermi and Bose distributions, respectively, which are estimated at a given temperature; $g_{m\nu}(\mathbf{k}, \mathbf{q})$ is the electron-phonon interaction matrix; δ is the necessity of performing Gaussian smoothing operations during integration [14].

The scattering rates with phonon absorption and emission were calculated from formula [12, 15]

$$\tau^{-1} = 2/\hbar \cdot \text{Im}\left(\sum_{n,\mathbf{k}} e^{-ph}\right). \quad (2)$$

The following values of the modeling parameters were selected in the EPW program [14]: the size of grid $N \times N \times 1$ was $264 \times 264 \times 1$; Gaussian smoothing coefficient (parameter “dg”) – equal to 0.001 eV; the parameter “fsthick”, which determines the value of the range of energies during modeling relative to the Fermi energy level, – equal to 4 eV; the number of Wannier functions – equal to 12. Parameters “auto_projection” and “scdm_proj” were set to “true”. Concentration of electrons and holes for all calculations is set to $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ [14].

Results from first principles calculation of the scattering rates in hydrogenated graphene

It is known that ZA, TA, LA, LB, TB, LB*, TB*, ZO, TO, LO, ZS, ZS* phonon modes are formed in hydrogenated graphene of the C₂H₂ type [16]. Modes, denoted as LA, TA, ZA, are results of the scattering on acoustic phonons along the longitudinal and transverse directions (x, y coordinates), and the z coordinate orthogonal to them [16]. Modes, denoted as LO, TO, ZO, are results of scattering on optical phonons along the longitudinal and transverse directions (x, y coordinates), and the z coordinate orthogonal to them [16].

Hydrogenated graphene C₂H₂ type (graphane) in comparison with graphene have the processes of structure bending, which are presented by the two symmetric modes - longitudinal and transverse LB and TB, and two asymmetric modes LB* and TB* [16]. In the z direction two modes associated with stretching processes are formed – the symmetric mode ZS and asymmetric mode ZS* [16]. The dependences the scattering rates for modes ZA, TA, LA, LB, TB, LB*, TB*, ZO, TO, LO, ZS, ZS* from energy obtained in the EPW program using formulas (1), (2) are presented in Fig. 1–12 by color dots.

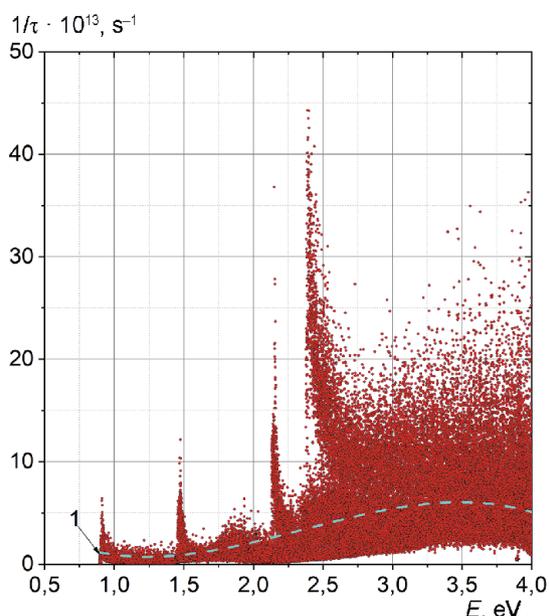


Fig. 1. Scattering rates for the acoustic mode ZA on energy

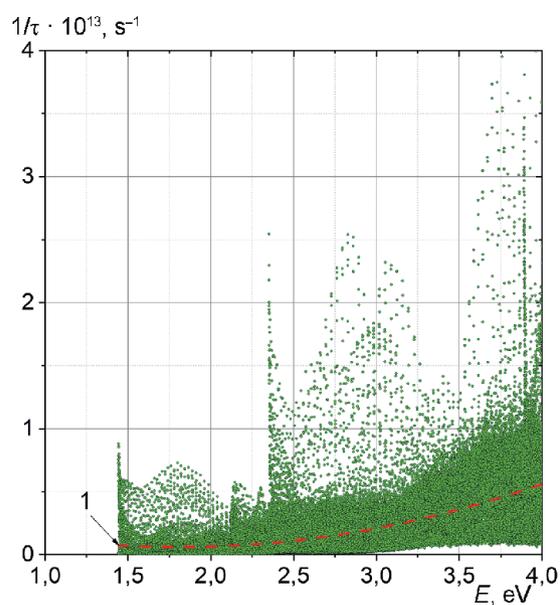


Fig. 2. Scattering rates for the acoustic mode TA on energy

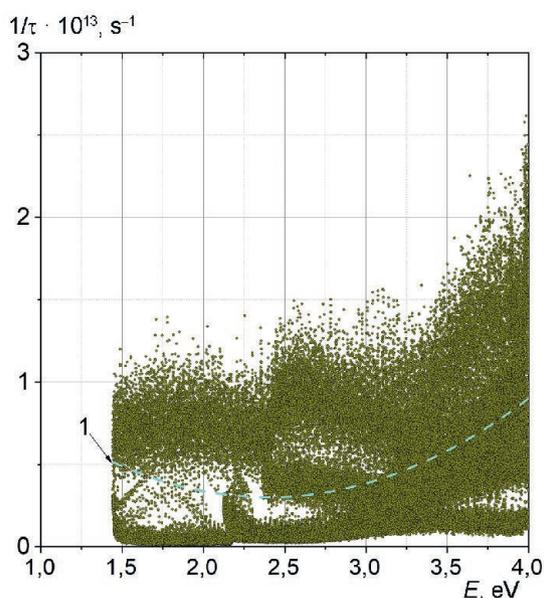


Fig. 3. Scattering rates for the LA acoustic mode on the energy

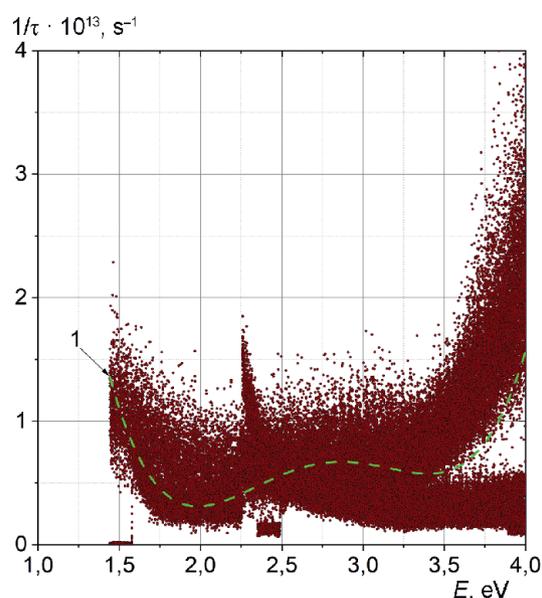


Fig. 4. Scattering rates for the LB mode on the energy

Data processing and plotting program ORIGIN is permitted to complete of approximation of the point data using analytic degree functions the with the help of the Fitting and Polinomial Fit operations in the Analysis section [17]. The Origin program provides the minimum value of the approximation error of the obtained data sets for all scattering intensities inherent to a given material. Approximation of the first-principles modeling data was completed with the help of the ORIGIN program. The results for the modes ZA, TA, LA, LB, TB, LB*, TB*, ZO, TO, LO, ZS, ZS* are shown in Tab. 1. Analytical relationships presented in Tab. 1 were used to plotted the curves 1, which are shown in Fig. 1–12.

Table 1. Results of approximation of first-principles modeling data for the parameter τ^{-1} (s^{-1}) from the energy E (eV)

Type of mode	Type of dependences	Number of the figure where the dependency is represented as a curve 1
ZA	$\tau^{-1} = (24 - 39,6215E + 21,6613E^2 - 3,05675E^3) \cdot 10^{13}$	1
TA	$\tau^{-1} = (1,30817 - 1,22865E + 0,34054E^2) \cdot 10^{13}$	2
LA	$\tau^{-1} = (5,4136 - 3,68907E + 0,768924E^2) \cdot 10^{13}$	3
LB	$\tau^{-1} = (40 - 62,335E - 35,75905E^2 - 8,86966E^3 + 0,80633E^4) \cdot 10^{13}$	4
TB	$\tau^{-1} = (0,02 - 0,1067324E + 0,14873E^2 - 0,06888E^3 + 0,01184E^4) \cdot 10^{13}$	5
LB*	$\tau^{-1} = (0,25 - 0,67324E + 0,62945E^2 - 0,23297E^3 + 0,03156E^4) \cdot 10^{13}$	6
TB*	$\tau^{-1} = (0,5 - 1,39387E + 1,33834E^2 - 0,50374E^3 + 0,06808E^4) \cdot 10^{13}$	7
ZO	$\tau^{-1} = (10^{-4} - 0,64273E + 1,40924E^2 - 0,76814E^3 + 0,13122E^4) \cdot 10^{13}$	8
TO	$\tau^{-1} = (0,65187E - 0,6714E^2 + 0,16824E^3 + 0,00383E^4) \cdot 10^{13}$	9
LO	$\tau^{-1} = (1,77365E - 2,15171E^2 + 0,77598E^3 - 0,05832E^4) \cdot 10^{13}$	10
ZS	$\tau^{-1} = (18,4954E - 15,35071E^2 + 4,50152E^3 - 0,43377E^4) \cdot 10^{13}$	11
ZS*	$\tau^{-1} = (1,86807E - 1,8118E^2 + 0,47577E^3 - 0,01522E^4) \cdot 10^{13}$	12

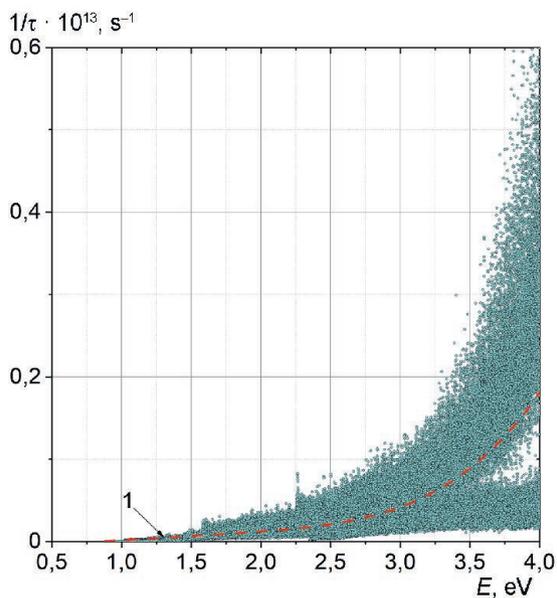


Fig. 5. Scattering rates for the TB mode on the energy

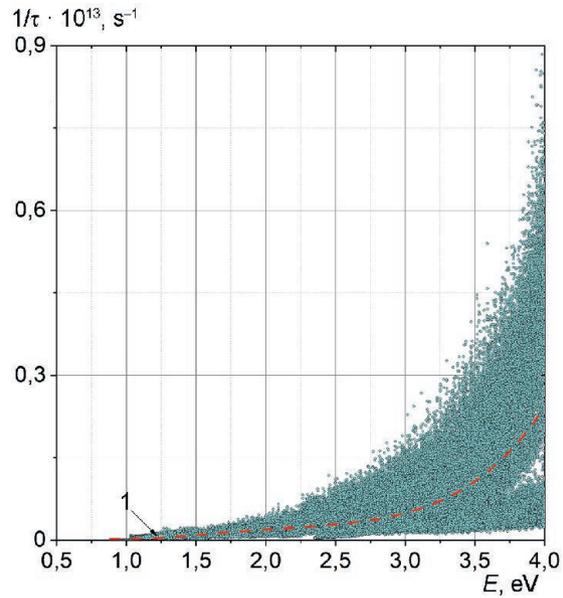


Fig. 6. Scattering rates for the LB* mode on the energy

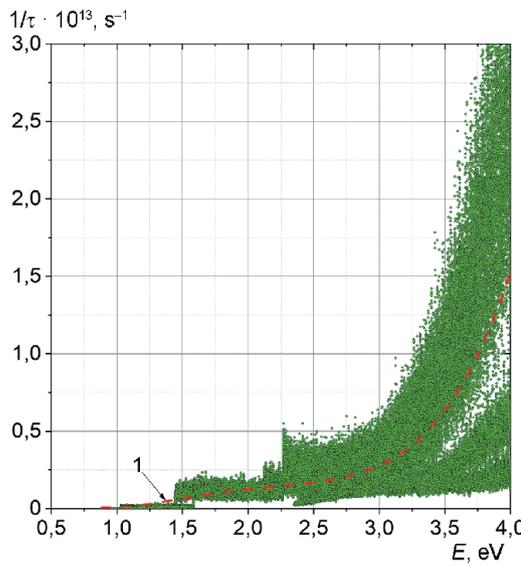


Fig. 7. Scattering rates for TB* optical mode on energy

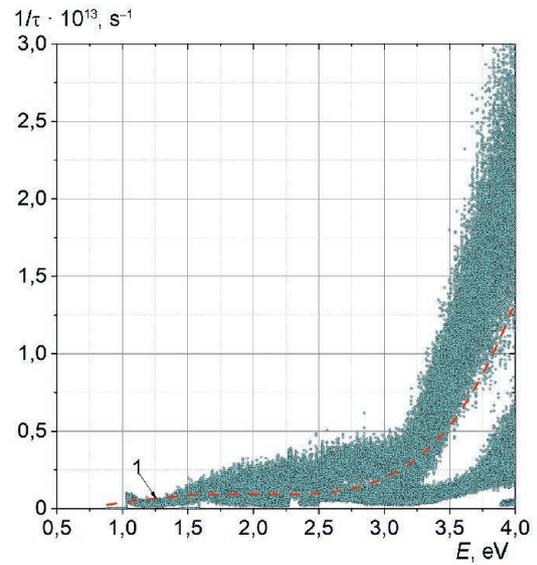


Fig. 8. Scattering rates for ZO optical mode on energy

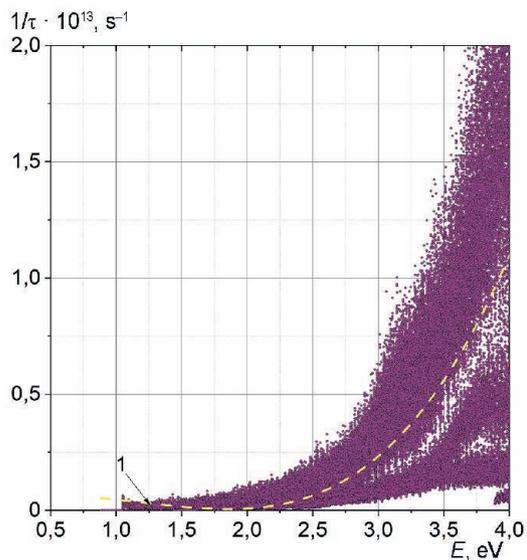


Fig. 9. Scattering rates for the TO optical mode on energy

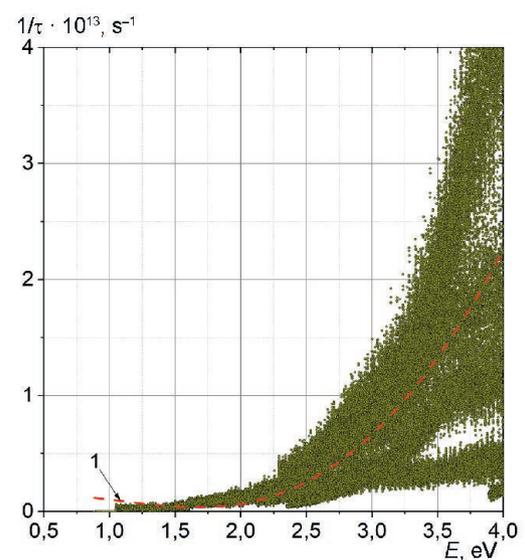


Fig. 10. Scattering rates for LO optical mode on energy

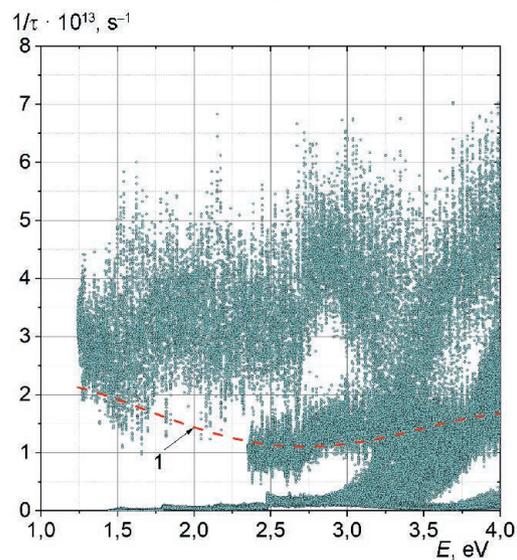


Fig. 11. Scattering rates for the ZS optical mode on energy

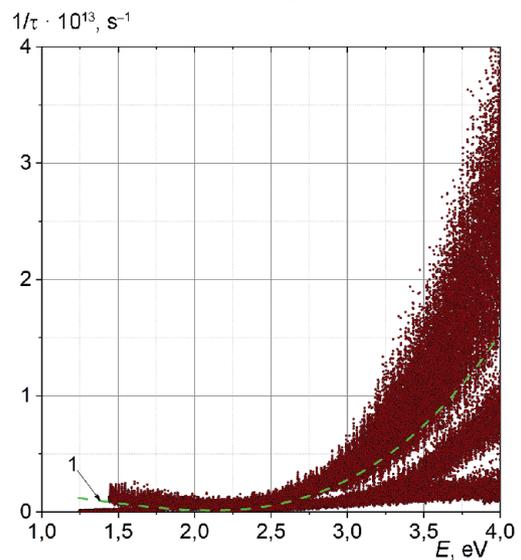


Fig. 12. Scattering rates for the ZS* optical mode on energy

Using data presented in Tab. 1 curves of scattering rates have been calculated for optical modes ZO, TO, LO (Fig. 13, curves 1–3) and for acoustic modes ZA, TA, LA (Fig. 14, curves 1–3).

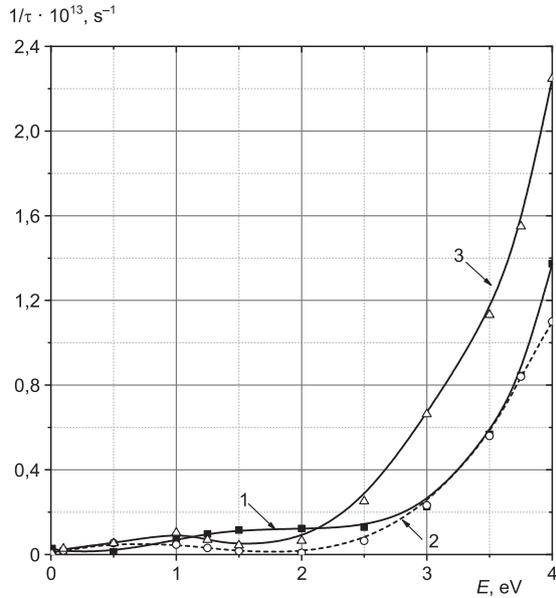


Fig. 13. Scattering rates on energy in the case of ZO (curve 1), TO (2) and LO (3) optical modes

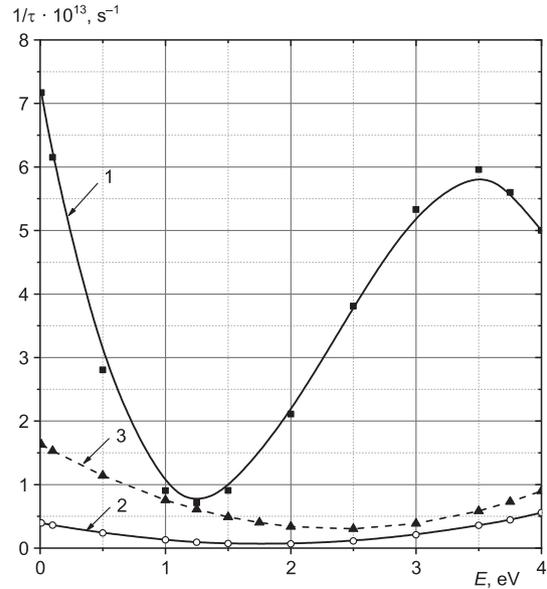


Fig. 14. Scattering rates on energy in the case of ZA (curve 1), TA (2) and LA (3) acoustic modes

Using data presented in Tab. 1 scattering rates have been calculated in the case of ZS and ZS* (Fig. 15, curve 1, 2) and in the case of LB, TB, LB* and TB* mode (Fig. 16, curve 1–4).

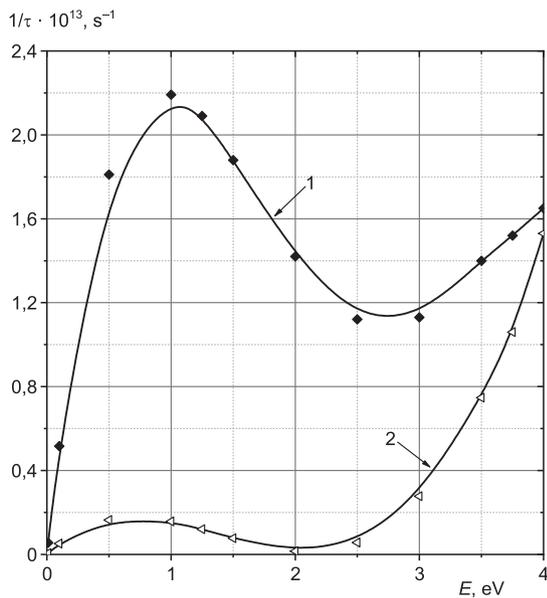


Fig. 15. Scattering rates on energy in the case of ZS (curve 1) and ZS* (2) modes

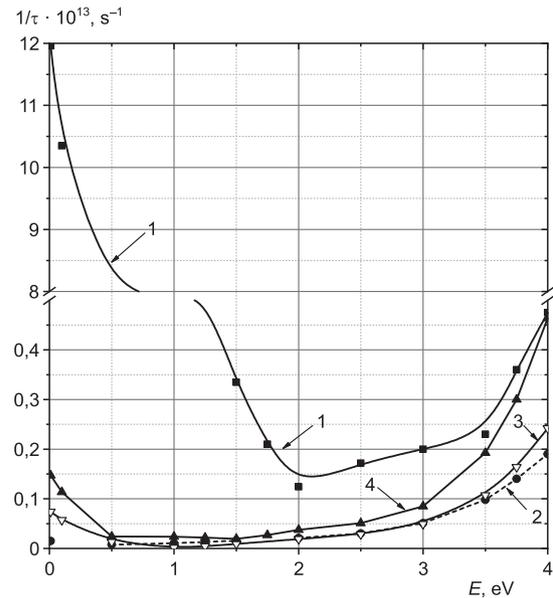


Fig. 16. Scattering rates on energy in the case of LB (curve 1), TB (2), LB* (3), and TB* (4) modes

The largest scattering rates are observed for the LB mode for small energy value less than 1 eV (Fig. 13–16). Modes ZA, ZO, LO, TO, ZS, ZS* have largest scattering rates at the energy greater than 4 eV. Scattering rates of the modes LB, LB*, TB, TB*, TA, LA are smaller than the scattering rates for the modes ZA, ZO, LO, TO, ZS, ZS* for the energy less than 4 eV. The scattering rates of modes LO, TO and ZO are close to each other in energy range which not exceeds 4 eV.

Conclusion

The dependences of electron scattering rates on optical and acoustic phonons in the free layer of hydrogenated graphene of C₂H₂ type (graphane) have been studied. First-principles modelling for modes ZA, TA, LA, ZO, TO, LO, LB, TB, LB*, TB*, ZS, ZS* types has shown that the highest scattering intensity at low energies (less than 1 eV) is observed for the LB-type mode, which is presented a longitudinal symmetric mode associated with the process of structure bending. At significant energy values, which exceed 4 eV, the usual optical modes – longitudinal LO, transverse TO, as well as modes along the z direction – optical ZO and acoustic ZA – already dominate in magnitude. The obtained numerical data on the behaviour of electron scattering rates dependences for graphene modified by hydrogen atoms can be used to study the characteristics of new promising semiconductor devices using the Monte Carlo method.

References

1. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., et al. (2004) Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Film. *Science*. 306, 666–669.
2. Morozov S. V., Novoselov K. S., Katsnelson M. I., Schedin F., Elias D. C., Jaszczak J. A., et al. (2008) Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer. *Physical Review Letters*. 100.
3. Bardeen J., Shockley W. (1950) Deformation Potentials and Mobilities in Nonpolar Crystals. *Physical Review*. 80. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.80.72>.
4. Herring C., Vogt E. (1956) Transport and Deformation-Potential Theory for Many-Valley Semiconductors with Anisotropic Scattering. *Physical Review*. 101.
5. Fröhlich H. (1954) Electrons in Lattice Fields. *Advances in Physics*. 3.
6. Hess K. (1999) *Advanced Theory of Semiconductor Devices*. NJ, Wiley-IEEE Press, Piscataway.
7. Lundstrom M. (2009) *Fundamentals of Carrier Transport*. UK, Cambridge University Press, Cambridge.
8. Poncé S., Margine E. R., Verdi C., Giustino F. (2016) EPW: Electron-Phonon Coupling, Transport and Superconducting Properties Using Maximally Localized Wannier Functions. *Computer Physics Communications*. 209.
9. Zhou J.-J., Park J., Lu I.-Te, Maliyov I., Tong X., Bernardi M. (2021) Perturbo: A Software Package for *ab Initio* Electron-Phonon Interactions, Charge Transport and Ultrafast Dynamics. *Computer Physics Communications*. 264.
10. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N., Calandra M., Car R., Cavazzoni C., et al. (2009) QUANTUM ESPRESSO: A Modular and Open-Source Software Project for Quantum Simulations of Materials. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 21 (39).
11. Noffsinger Jesse, Giustino Feliciano, Malone Brad D., Cheol-Hwan Park, Louie Steven G., Cohen Marvin L. (2010) EPW: A Program for Calculating the Electron–Phonon Coupling Using Maximally Localized Wannier Functions. *Computer Physics Communications*. 181 (12), 2140–2148.
12. Lee H., Poncé S., Bushick K., Hajinazar S., Lafuente-Bartolome J., Leveillee J., et al. (2023) Electron-Phonon Physics from First Principles Using the EPW Code. *npj Computational Materials*. 9.
13. Hamann D. R. (2013) Optimized Norm-Conserving Vanderbilt Pseudopotentials. *Physical Review*. B 88.
14. Mishchanka V. N. (2024) First-Principles Modeling of Electron-Phonon Scattering Rates in Graphene. *Modern Electronic Materials*. 10 (3), 177–184.
15. Bernardi M., Vigil-Fowler D., Lischner J., Neaton J. B., Louie S. G. (2014) *Ab Initio* Study of Hot Carriers in the First Picosecond after Sunlight Absorption in Silicon. *Physical Review Letters*. 112.
16. Long Cheng, Chenmu Zhang and Yuanyue Liu (2019) How to Resolve a Phonon-Associated Property into Contributions of Basic Phonon Modes. *Journal of Physics: Materials*. 2 (4).
17. Isakova O. P., Tarasevich Y. Y., Yuzyuk Y. I. (2009) *Processing and Visualization of Data from Physical Experiments Using Origin Package*. Moscow, LIB-COM Book House.

Received: 19 January 2025

Accepted: 28 February 2025

Information about the author

Mishchanka V. N., Cand. Sci. (Tech.), Associate 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 29 394-55-58
E-mail: mishchenko@bsuir.by
Mishchanka Valery Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-35-43>

УДК 621.373.5

УМЕНЬШЕНИЕ ФАЗОВЫХ ШУМОВ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИИ ПОСРЕДСТВОМ ТРОСОВЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ

В. Н. КИЙКО, Н. М. НАУМОВИЧ, М. В. ДАВЫДОВ, В. И. ЖУРАВЛЁВ

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

Аннотация. Рассмотрено влияние на фазовые шумы кварцевых генераторов случайных вибрационных воздействий. Для уменьшения этих шумов предлагается использовать тросовый виброизолятор ВИ 0,8/0. Проведены экспериментальные исследования, в ходе которых оценивалась эффективность виброизоляторов по осям X , Y и Z . Полученные результаты демонстрируют снижение фазовых шумов при различных вибрационных режимах. Представлены результаты анализа воздействия спектральной плотности вибраций и резонансных частот, подтверждающие улучшение стабильности частоты кварцевых генераторов при использовании тросовых виброизоляторов. В результате измерений установлено, что применение тросовых виброизоляторов позволяет снизить фазовые шумы на 15–30 % в зависимости от частотного диапазона и направления действия случайной вибрации. Виброизоляторы наиболее эффективны в диапазоне частот более 150 Гц для осей X и Z , и более 300 Гц – для Y . Полученные данные подтверждают, что виброизоляторы могут значительно улучшить стабильность работы кварцевых генераторов в условиях вибрации, начиная с определенной частоты воздействия.

Ключевые слова: вибрация, тросовый виброизолятор, кварцевый генератор, спектральная плотность вибрации, резонансные частоты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Уменьшение фазовых шумов высокостабильных кварцевых генераторов при воздействии вибрации посредством тросовых виброизоляторов / В. Н. Кийко [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 35–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-35-43>.

REDUCTION OF PHASE NOISE OF HIGHLY STABLE QUARTZ OSCILLATORS UNDER VIBRATION BY MEANS OF CABLE VIBRATION ISOLATORS

VADIM N. KIYKO, NIKOLAY M. NAUMOVICH, MAKSIM V. DAVYDOV,
VADIM I. ZHURAVLIOV

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

Abstract. The influence of random vibration effects on the phase noise of quartz generators is examined. To reduce this noise, it is proposed to use a VI 0.8/0 cable vibration isolator. Experimental studies were conducted to evaluate the efficiency of vibration isolators along the X , Y , and Z axes. The results demonstrate a decrease in phase noise under various vibration modes. The results of the analysis of the effect of the spectral density of vibrations and resonant frequencies are presented, confirming the improvement of the frequency stability of quartz oscillators when using cable vibration isolators. As a result of measurements, it was found that the use of cable vibration isolators allows for a 15–30 % decrease in phase noise depending on the frequency range and direction of random vibration. Vibration isolators are most effective in the frequency range above 150 Hz for the X and Z axes, and above 300 Hz for the Y axis. The data obtained confirm that vibration isolators can significantly improve the stability of quartz oscillators under vibration conditions, starting from a certain frequency of action.

Keywords: vibration, cable vibration isolator, quartz generator, spectral density of vibration, resonant frequencies.

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

For citation. Kiyko V. N., Naumovich N. M., Davydov M. V., Zhuravliov V. I. (2025) Reduction of Phase Noise of Highly Stable Quartz Oscillators Under Vibration by Means of Cable Vibration Isolators. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 35–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-35-43> (in Russian).

Введение

Стабильность частоты при воздействии внешних дестабилизирующих факторов, одним из которых является вибрация, – ключевое требование к кварцевым генераторам, поскольку он определяет точность и разрешающую чувствительность радиолокационных и радионавигационных систем, погрешность измерений измерительных систем, качество и надежность систем связи [1]. Стабильность частоты генератора при воздействии вибрации характеризуется его G-чувствительностью (относительное изменение выходной частоты генератора при воздействии ускорения 1 g). Когда к генератору прикладывается ускорение, его фазовые шумы определяются именно G-чувствительностью, которая является векторной величиной, зависящей от направления ускорения относительно трех взаимно перпендикулярных осей генератора (X, Y, Z). Величина и ориентация вектора G-чувствительности определяются измерением отдельных компонент по осям X, Y, Z . Следует отметить, что стабильность частоты кварцевого генератора зависит от различных факторов, среди которых уровень виброускорения, приложенного к генератору, который может включать в себя постоянное ускорение, вибрацию, удар, смещение, наклон или вращение при использовании их в аппаратуре, устанавливаемой на подвижных носителях [2].

Снижение реакции кварцевых генераторов на воздействие вибраций улучшает их фазовые характеристики и характеристики радиосистем в целом. В статье для виброзащиты кварцевых генераторов рассмотрено использование тросовых виброизоляторов ВИ 0,8/0 [3].

Методика исследования

Характеристики кварцевого генератора во многом зависят от технологических и конструктивных достижений по изготовлению кварцевого резонатора, высокая добротность которого обеспечивает низкий фазовый шум. Однако динамический фазовый шум, демонстрируемый кварцевым генератором в условиях высокой вибрации, превышает его фазовый шум в состоянии покоя – это так называемая G-чувствительность, которая отражает зависимость частоты генератора от приложенного ускорения [4]. Чем выше G-чувствительность, тем больше изменяется частота генератора при воздействии внешних ускорений. Для многих приложений требуется минимизация G-чувствительности для обеспечения стабильности работы генератора в условиях переменных внешних условий [5]. Сила ускорения, приложенная к кварцевому генератору, вызывает сдвиг частоты Δf , пропорциональный ускорению и зависящий от направления приложения силы [6], рассчитываемый по формуле:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = G\bar{\alpha}, \quad (1)$$

где f_0 – частота кварцевого генератора без вибрации; $\bar{\alpha}$ – приложенное ускорение; G – вектор G-чувствительности.

Для оценки G-чувствительности кварцевого генератора к ускорениям существует множество методов. Обычно это делается для понимания того, как вибрации и механические ускорения могут влиять на стабильность и точность работы генератора. Один из наиболее часто используемых – метод, в котором для создания необходимого ускорения применяется вибростенд, позволяющий создавать вибрации (как гармонические, так и случайные) с различными амплитудами и частотами [7]. Изменения фазовых шумов не одинаковы при различных направлениях прикладываемых механических воздействий. Поэтому такие воздействия следует рассматривать в трех плоскостях.

При измерении фазовых шумов исследуемого кварцевого генератора использовалась схема стенда, приведенная в [3], с рядом доработок. В частности, в нее были добавлены:

– анализатор фазовых шумов, который позволил точно фиксировать изменения фазовых шумов при воздействии вибраций;

– источник питания, обеспечивающий стабильное напряжение для работы кварцевого генератора;

– кварцевый генератор, являвшийся объектом исследования и подвергавшийся вибрационным воздействиям в различных режимах.

Эксперимент проводился при температуре окружающей среды $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 40–50 %. Схема установки, с помощью которой измерялись фазовые шумы кварцевого генератора (без воздействия и при наличии вибраций), приведена на рис. 1. Кварцевый генератор устанавливался на рабочую платформу и подвергался воздействию широкополосной случайной вибрации, определяемой перед началом испытания. Параметры случайной вибрации стандартно устанавливались профилем спектральной плотности мощности (PSD) [8]. Следует отметить, что спектральная плотность вибраций на частотах менее 300 и более 1000 Гц изменяется по закону 3 дБ/октаву.

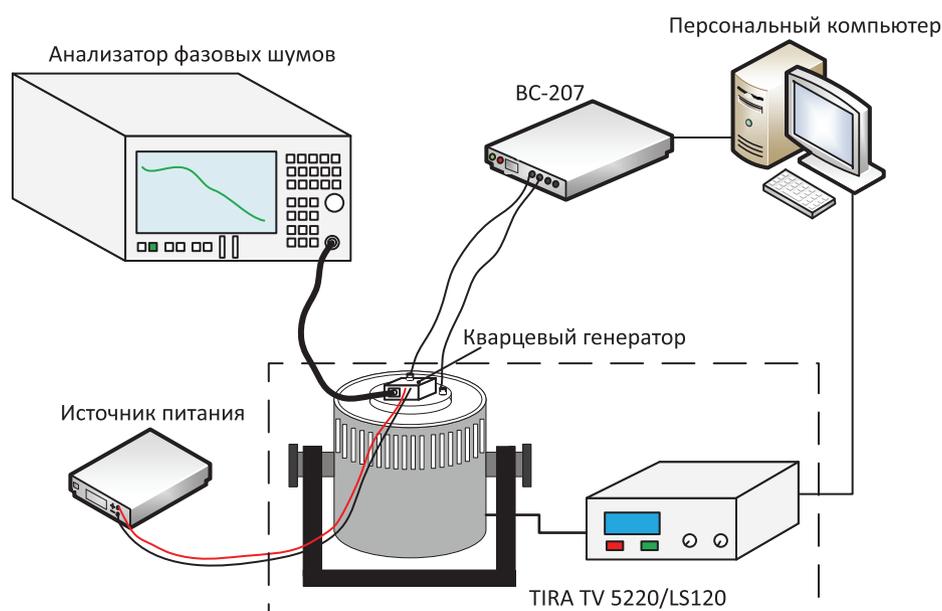


Рис. 1. Схема установки для измерения фазовых шумов:
BC-207 – система управления; TIRA TV 5220/LS120 – электродинамический вибростенд
Fig. 1. Installation diagram for measuring phase noise:
BC-207 – control system; TIRA TV 5220/LS120 – electrodynamic vibration stand

В качестве объекта исследований использовался кварцевый генератор Wenzel 501-24069A (номинальная частота – 100 МГц, напряжение питания – 12 В, выходной сигнал – синусоидальный, уровень выходного сигнала – 0 дБм). Данный генератор является одним из лучших среди доступных на рынке по фазовым шумам и G-чувствительности. Такой подход позволяет оценить эффективность рассматриваемых мероприятий по использованию разработанных виброизоляторов для уменьшения влияния вибраций на фазовые шумы генераторов. Уровень фазовых шумов измерялся анализатором FSWP26 фирмы Rohde & Schwarz.

Первым этапом исследования было изучение влияния случайной вибрации с заданной PSD на кварцевый генератор по осям X , Y , Z . Для измерения фазовых шумов под воздействием вибраций по осям X и Y использовался специальный кондуктор (рис. 2).

Результаты исследований

На рис. 3 приведены зависимости фазовых шумов кварцевого генератора Wenzel при отсутствии вибраций и при различных частотах вибраций вдоль осей X , Y , Z . Как видно из графиков, наиболее чувствительны к вибрациям оси Z и X , что приводит к увеличению фазовых шумов кварцевого генератора.

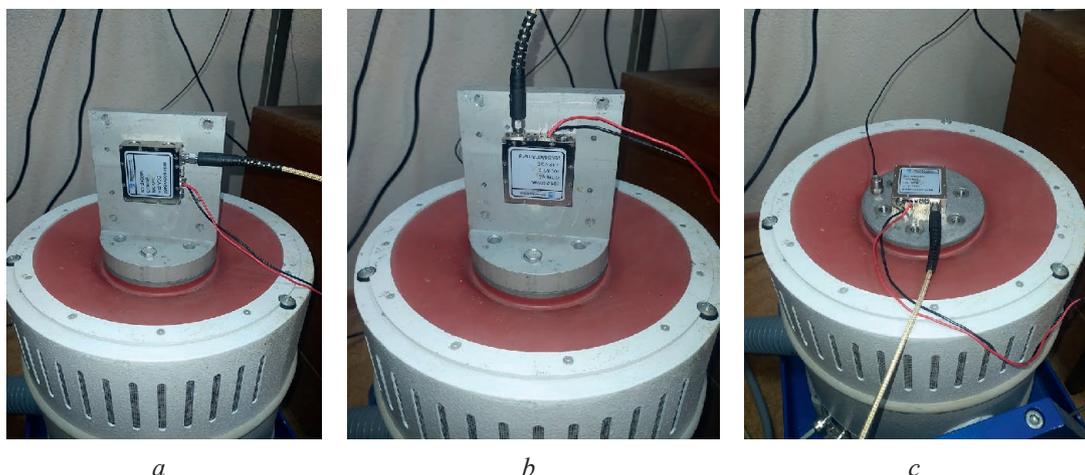


Рис. 2. Внешний вид генератора, установленного на вибростенд для проведения испытаний, при воздействии вибраций вдоль осей X (a), Y (b), Z (c)

Fig. 2. Appearance of the generator installed on a vibration stand for testing under the influence of vibrations along the axes X (a), Y (b), Z (c)

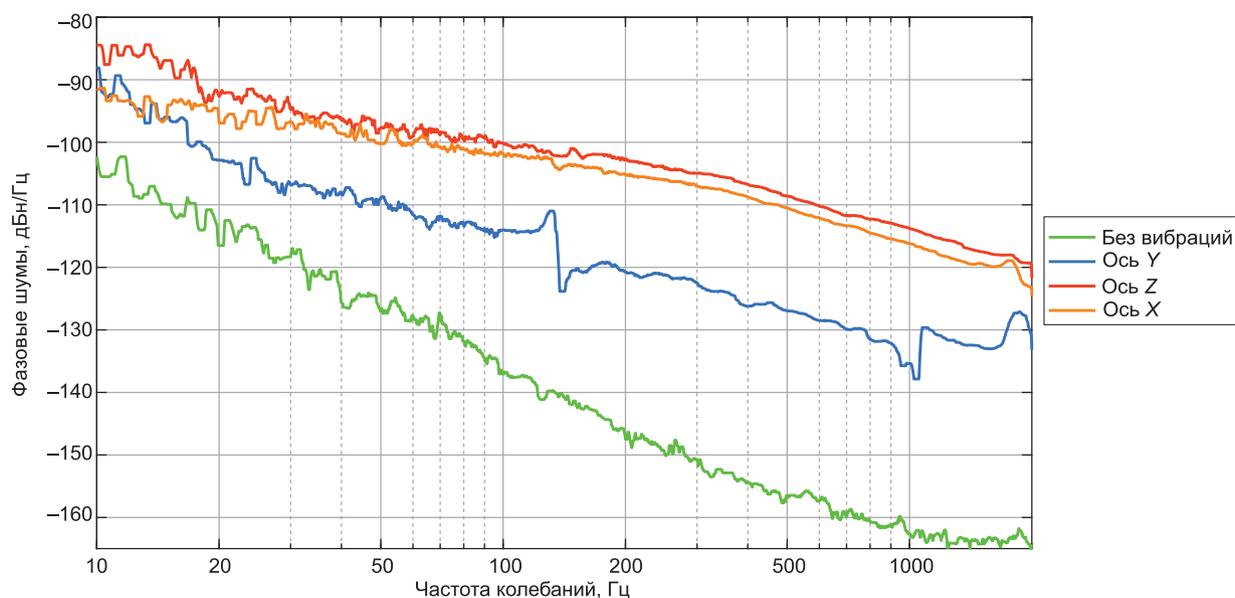


Рис. 3. Зависимость фазовых шумов кварцевого генератора Wenzel от частоты вибраций

Fig. 3. Dependence of phase noise of a Wenzel quartz oscillator on vibration frequency

Применение тросовых виброизоляторов – один из методов уменьшения фазовых шумов кварцевых генераторов. Такие виброизоляторы ослабляют испытываемую кварцевым генератором внешнюю вибрацию, которая может быть выше резонансной частоты системы изоляции, тем самым снижая результирующий динамический фазовый шум [5]. Этот тип виброизоляции увеличивает размеры, поскольку система должна включать в себя виброизоляторы, полезную нагрузку и внешний корпус, а также пространство для колебаний, чтобы все составляющие компоненты могли двигаться независимо друг от друга.

Для испытаний использовались тросовые восьмиветвевые виброизоляторы ВИ 0,8/0 [3], которые монтировались на кварцевый генератор. Генератор с присоединенными виброизоляторами устанавливался во внешний корпус, а он, в свою очередь, – на вибростенд для проведения испытаний (рис. 4).

Воздействие PSD на виброизолированный кварцевый генератор осуществлялось по осям X , Y , Z . При помощи акселерометра РСВ352С22, установленного на кварцевом генераторе, измерялся спектральный уровень вибраций. Измерение уровня вибраций виброизолированного кварцевого генератора при воздействии вибраций вдоль различных его осей необходимо для:

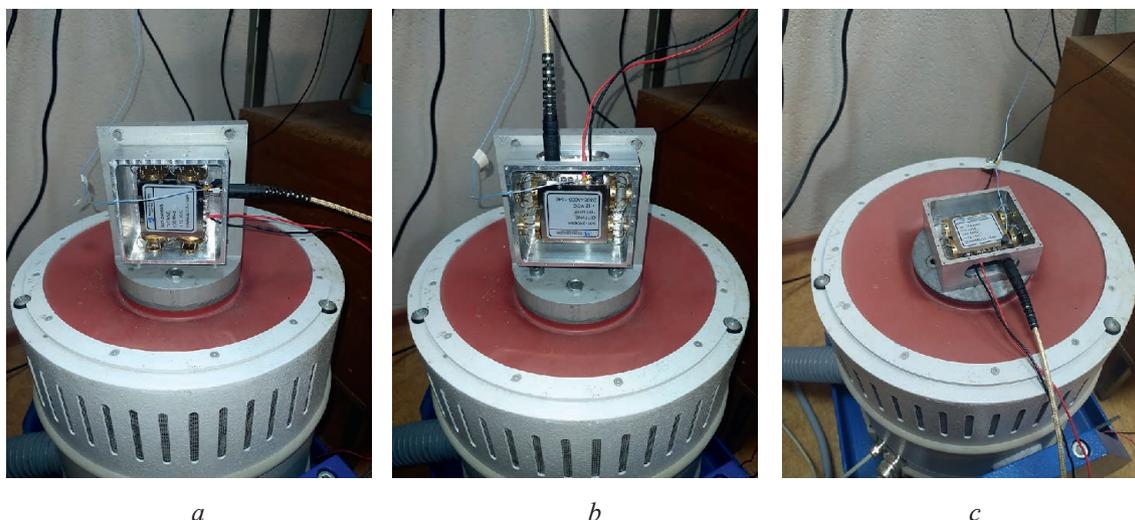


Рис. 4. Внешний вид виброизолированного генератора, установленного на вибростенде, для проведения испытаний при воздействии вибраций вдоль осей X (a), Y (b), Z (c)

Fig. 4. Appearance of a vibration-isolated generator installed on a vibration stand for testing when exposed to vibrations along the axes X (a), Y (b), Z (c)

– оценки эффективности виброизоляции, так как, измеряя уровень вибраций по осям X , Y , Z , можно определить, насколько эффективно виброизоляторы уменьшают вибрационные воздействия на кварцевый генератор. Это помогает оценить, как хорошо изоляторы справляются с поглощением или снижением вибраций, и выявить эффективность предложенной конструкции при различных направлениях воздействия вибраций, что важно для конкретного положения генераторов в реальных конструкциях [9];

– определения чувствительных направлений. Вибрации могут оказывать разное воздействие на генератор в зависимости от направления по осям. Например, вибрации вдоль одной оси могут вызывать более значительные отклонения частоты генератора, чем вдоль другой оси (рис. 3). Измерение уровня вибраций вдоль разных осей позволяет определить, какие направления наиболее критичны для стабильности работы генератора и где нужно усилить меры виброизоляции [4];

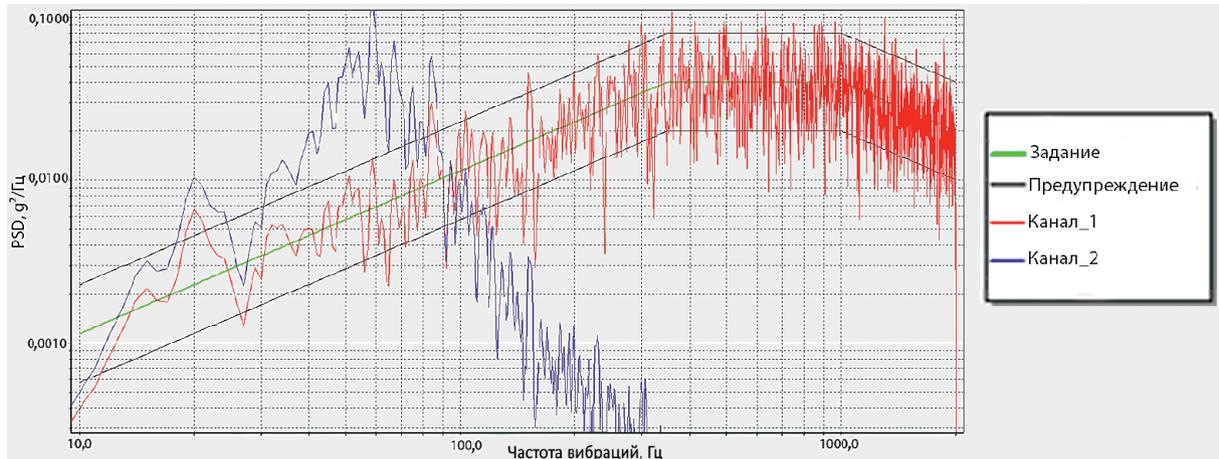
– идентификации резонансных частот. Вибрации могут вызывать резонансные явления, которые сильно влияют на стабильность частоты генератора. Измерение вибраций позволяет обнаружить резонансные частоты, где генератор наиболее подвержен влиянию внешних вибрационных воздействий. Это важно для корректной настройки системы виброизоляции [7];

– анализа фазовых шумов. Уровень вибраций напрямую влияет на фазовые шумы генератора. Измеряя вибрации, можно сопоставить их с фазовыми шумами, выявить корреляцию и понять, как изменение уровня вибраций по разным осям отражается на стабильности выходного сигнала генератора [5];

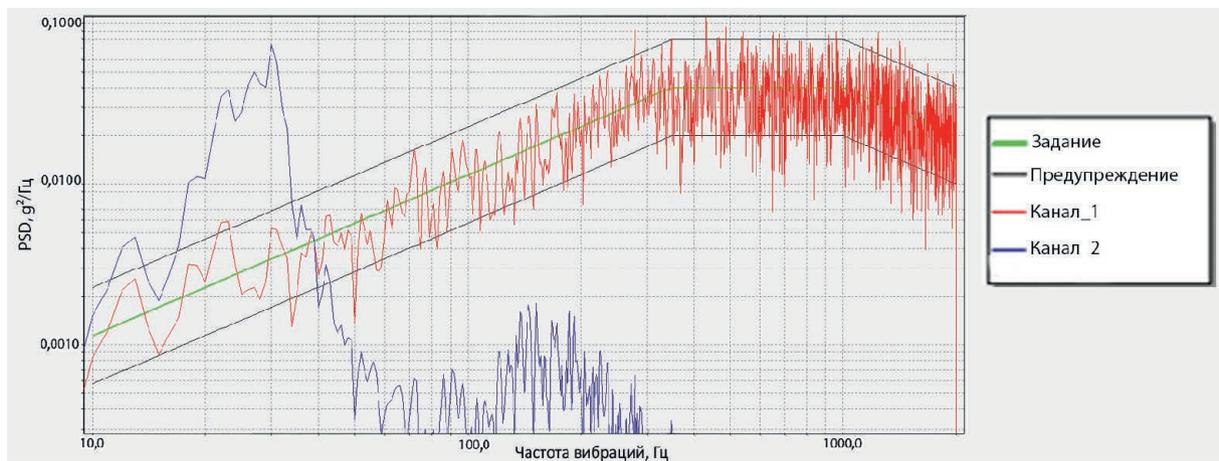
– оптимизации конструкции и настройки виброизоляторов. Результаты измерений позволяют оптимизировать их конструкцию и расположение относительно генератора для достижения максимальной эффективности виброизоляции. Это может включать выбор материалов, формы, а также способов крепления виброизоляторов [7].

В совокупности перечисленные измерения помогают обеспечить надежность и стабильность работы кварцевого генератора в условиях вибрационных воздействий, что критически важно для приложений, требующих высокой точности и стабильности его частоты. На рис. 5 представлены графические зависимости PSD от частоты (канал 2), регистрируемые вибропреобразователем PCB352C22 и являющиеся откликом на возмущающее воздействие.

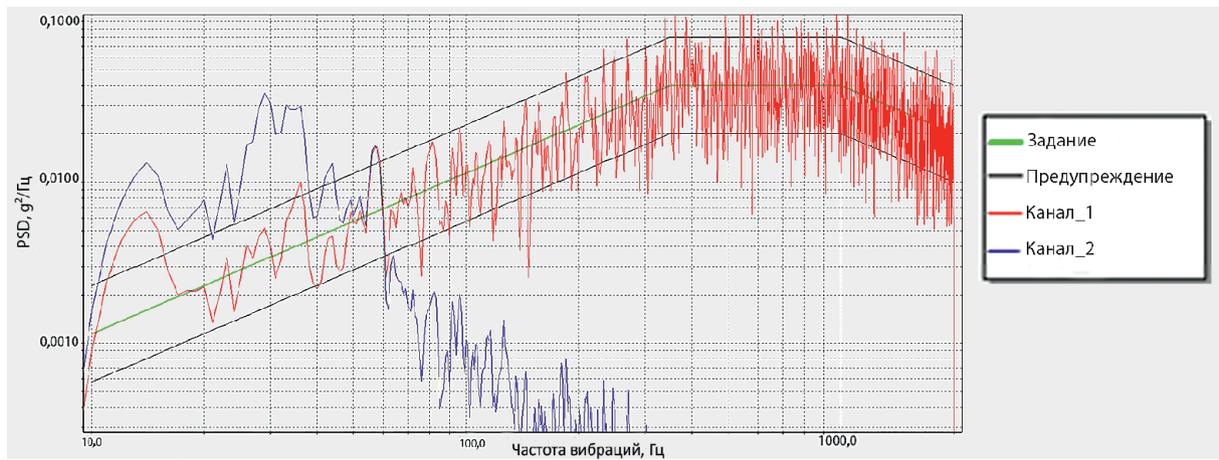
Зависимости фазовых шумов виброизолированного кварцевого генератора от частоты вибраций при воздействии вибраций вдоль различных осей генератора приведены на (рис. 6). Как видно из рис. 6, *a*, *b* (оси X , Z), предлагаемые тросовые виброизоляторы ВИ 0.8/0 позволяют уменьшить уровень фазовых шумов, вызванных вибрациями, начиная со 150 Гц. По оси Y уменьшение уровня фазовых шумов начинается с 300 Гц.



a



b



c

Рис. 5. Зависимость PSD виброизолированного кварцевого генератора от частоты вибраций при воздействии вибраций вдоль осей X (a), Y (b), Z (c)

Fig. 5. Dependence of the PSD of a vibration-isolated quartz generator on the vibration frequency when exposed to vibrations along the X (a), Y (b), Z (c) axes

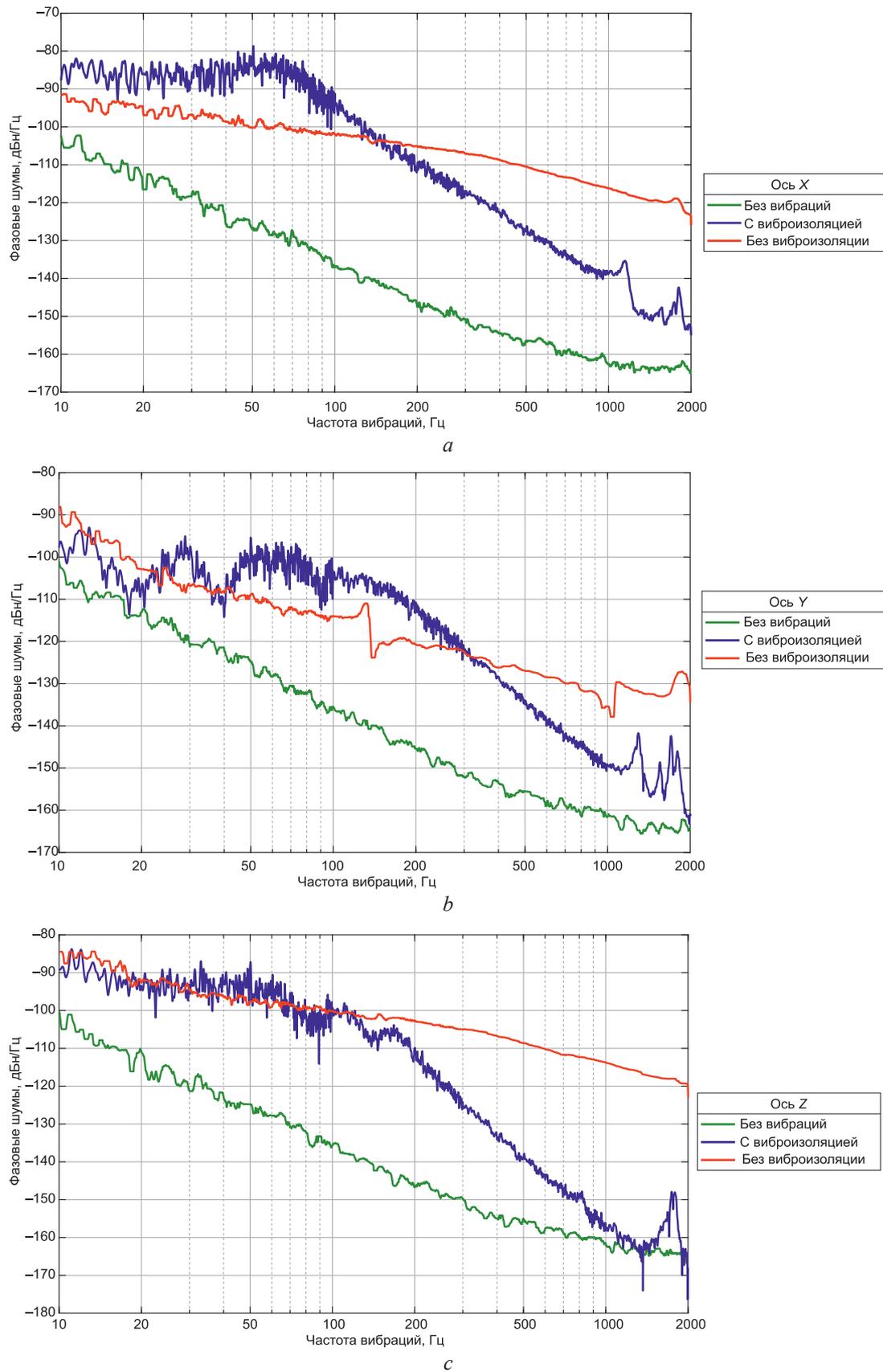


Рис. 6. Зависимость фазовых шумов виброизолированного кварцевого генератора от частоты вибраций при ее воздействии вдоль осей *X* (*a*), *Y* (*b*), *Z* (*c*)
Fig. 6. Dependence of the phase noise of a vibration-isolated quartz oscillator on the vibration frequency when exposed to it along the axes *X* (*a*), *Y* (*b*), *Z* (*c*)

Заключение

1. Максимально возможное снижение фазовых шумов кварцевых генераторов, вызванных вибрацией, является важной задачей для обеспечения характеристик и стабильной работы электронных устройств, отвечающих современным требованиям. Эффективную виброизоляцию кварцевых генераторов в диапазоне частот более 100 Гц могут обеспечить тросовые виброизоляторы.

2. Разработанные авторами виброизоляторы модели ВИ 0,8/0 демонстрируют свою эффективность в снижении уровня фазовых шумов, вызванных случайной вибрацией. Например, на частоте 200 Гц по оси X снижение уровня фазовых шумов составляет 10 дБ, по оси Z – 20 дБ, на частоте 1000 Гц по осям X и Z – 25 и 40 дБ соответственно.

3. Полученные результаты могут быть применены для решения задачи уменьшения фазовых шумов кварцевых генераторов при воздействии на них внешних широкополосных вибраций.

Список литературы

1. Иванов, Ю. Измерение G-чувствительности кварцевых генераторов / Ю. Иванов, А. Никонов, Э. Князева // *Электроника. Наука. Технология. Бизнес.* 2019. № 3. С. 124–129.
2. Ильинский, В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В. С. Ильинский. М.: Радио и связь, 1982.
3. Использование тросовых виброизоляторов для виброзащиты кварцевых генераторов / В. Н. Кийко [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 63–70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-63-70>.
4. Rubiola, E. *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators* / E. Rubiola. UK: Cambridge University Press, 2008.
5. Optimizing Phase – Noise Performance: Theory and Design Techniques for a Crystal Oscillator / A. Apte [et al.] // *IEEE Microwave Magazine.* 2017. Vol. 18, No 4. P. 108–123.
6. Filler, R. L. The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: A Review / R. L. Filler // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.* 1988. Vol. 35, No 3. P. 297–305.
7. Пономарев, Ю. К. Разработка методики расчета характеристик тросового виброизолятора с радиусным и прямолинейными участками осевой линии / Ю. К. Пономарев, П. В. Посохов, О. Б. Симаков // *Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Брянск: Брянский гос. инж.-технол. ун-т,* 2014. С. 64–74.
8. *Test Method Standard – Electronic and Electrical Component Parts: MIL-STD-202G.* USA: Department of Defense, 2008.
9. Kurowski, P. M. *Finite Element Analysis for Design Engineers* / P. M. Kurowski // SAE. 2017. P. 181–196.

Поступила 18.11.2024

Принята в печать 03.01.2025

References

1. Ivanov Y., Nikonov A., Knyazeva E. (2019) Measuring the G-Sensitivity of Quartz Oscillators. *Electronics. Science. Technology. Business.* (3), 124–129 (in Russian).
2. Ilyinsky V. S. (1982) *Protection of Electronic and Precision Equipment from Dynamic Impacts.* Moscow, Radio i Sviaz Publ. (in Russian).
3. Kiyko V. N., Naumovich N. M., Davydov M. V., Zhuravliov V. I. (2023) Use of Cable Vibration Isolators for Vibration Protection of Quartz Generators. *Doklady BGUIR.* 21 (4), 63–70. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-63-70> (in Russian).
4. Rubiola E. (2008) *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators.* UK, Cambridge University Press.
5. Apte A., Rohle U. L., Poddar A., Rudlph M. (2017) Optimizing Phase – Noise Performance: Theory and Design Techniques for a Crystal Oscillator. *IEEE Microwave Magazine.* 18 (4), 108–123.
6. Filler R. L. (1988) The Acceleration Sensitivity of Quartz Crystal Oscillators: A Review. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.* 35 (3), 297–305.
7. Ponomarev Yu. K., Posokhov P. V., Simakov O. B. (2014) Development of a Method for Calculating the Characteristics of a Cable Vibration Isolator with Radius and Straight Sections of the Center Line. *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering, Collection of Scientific Papers.* Bryansk, Bryansk State Engineering and Technology University. 64–74 (in Russian).
8. *MIL-STD-202G. Test Method Standard – Electronic and Electrical Component Parts.* USA, Department of Defense, 2008.
9. Kurowski P. M. (2017) *Finite Element Analysis for Design Engineers.* SAE. 181–196.

Received: 18 November 2024

Accepted: 3 January 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Кийко В. Н., асп. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Наумович Н. М., канд. техн. наук, нач. науч.-констр. центра перспективных радиоэлектронных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн (Центр 1.6), БГУИР

Давыдов М. В., канд. техн. наук, доц., первый проректор БГУИР

Журавлёв В. И., канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Центра 1.6, зав. каф. теоретических основ электротехники, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 337-77-19
E-mail: kiyko@bsuir.by
Кийко Вадим Николаевич

Information about the authors

Kiyko V. N., Postgraduate at the Department of Information Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Naumovich N. M., Cand. Sci. (Tech.), Head of the Research and Design Center of Advanced Radioelectronic Systems of the Centimeter and Millimeter Wavelengths (Center 1.6), BSUIR

Davydov M. V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, First Vice-Rector, BSUIR

Zhuravliov V. I., Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher at the Center 1.6, Head of the Department of Fundamental Electrical Engineering, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 337-77-19
E-mail: kiyko@bsuir.by
Kiyko Vadim Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52>

УДК 615.47

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ВОЗБУЖДАЮЩИХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНУЮ АТМОСФЕРНУЮ ПЛАЗМУ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

А. Н. ОСИПОВ, Т. МА, В. А. РОКАЧ

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

Аннотация. Приведены результаты анализа изменения нелинейного импеданса плазмы диэлектрического барьерного разряда. Нелинейные свойства плазмы больше проявляются при воздействии на нее напряжением меньшей амплитуды. Регистрируемые электрические параметры тока в выходной цепи генератора отражают изменения плазмы, вызванные изменением возбуждающего плазму напряжения, геометрии разрядной системы, расхода потока газа. Экспериментально получены проходные вольт-амперные характеристики плазмы. Установлены зависимости их изменения от амплитуды возбуждающего напряжения в выходной цепи генератора, потока инертного газа и расстояния между электродами разрядной системы.

Ключевые слова: низкотемпературная атмосферная плазма, диэлектрический барьерный разряд, нелинейный импеданс, амплитудный спектр, вольт-амперная характеристика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Осипов, А. Н. Анализ электрических сигналов, возбуждающих низкотемпературную атмосферную плазму диэлектрического барьерного разряда / А. Н. Осипов, Т. Ма, В. А. Рокач // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 44–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52>.

ANALYSIS OF ELECTRICAL SIGNALS EXCITING LOW-TEMPERATURE ATMOSPHERIC PLASMA OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

ANATOLIY N. OSIPOV, T. MA, V. A. ROKACH

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

Abstract. This paper presents the results of analyzing the change in the nonlinear impedance of plasma in a dielectric barrier discharge. The volt-ampere characteristics of the plasma were obtained experimentally. The dependencies of their changes on the amplitude of the excitation voltage in the generator's output circuit, the flow rate of the inert gas, and the distance between the electrodes of the discharge system were determined.

Keywords: low-temperature atmospheric plasma, dielectric barrier discharge, nonlinear impedance, amplitude spectrum, volt-ampere characteristic.

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

For citation. Osipov A. N., Ma T., Rokach V. A. (2025) Analysis of Electrical Signals Exciting Low-Temperature Atmospheric Plasma of Dielectric Barrier Discharge. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 44–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52> (in Russian).

Введение

Сфера применения технологии холодной атмосферной плазмы (ХАП) достаточно обширна. Основные наиболее важные области – микроэлектроника (производство изделий), оптика (обработка и нанесение покрытий), химическая промышленность и получение новых материалов (изменение свойств поверхности различных материалов неразрушающим способом), охрана окружающей среды (технологии очистки воды, воздуха и др.), биология и здравоохранение (ап-

паратура и технологии стерилизации и терапии) и др. Преимуществами обработки в низкотемпературной плазме при атмосферном давлении являются отсутствие необходимости создания и поддержания вакуума в громоздких системах, возможность работы с различного рода материалами, в том числе низкотемпературными полимерами и биологическими объектами, низкая стоимость оборудования в сравнении с вакуумно-плазменным оборудованием, мобильность и универсальность применения.

В [1] опубликована дорожная карта плазмы на 2022–2027 гг., в соответствии с которой приоритетные задачи на указанный период – новые подходы к возбуждению и генерации плазменных разрядов, диагностика и моделирование плазмы. Таким образом, решение задач диагностики и моделирования ХАП является ключевым на данном этапе развития технологии. Параметры плазмы исследовались с помощью оптических, спектроскопических, микроволновых методов и электрических зондов. Поскольку плазма интерпретируется как элемент с нелинейным импедансом, решение задачи аналитического моделирования является весьма сложным [2]. Однако численное моделирование генерации ХАП, основанное на решении уравнений электростатики и гидродинамического движения заряженных частиц в электрическом поле в привязке к конкретной геометрии разрядной системы, не может быть использовано для прогнозирования параметров плазмы в случае изменения параметров разряда (амплитуды возбуждающего сигнала, расхода газа и т. д.). Одним из подходов решения данной проблемы является анализ отклика тока при воздействии напряжения на нелинейный элемент (атмосферную плазму) [3, 4]. Для численного решения задачи необходимо располагать дискретными значениями проходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) нелинейного сопротивления: множеством значений воздействующего мгновенного напряжения и соответствующих им мгновенных токов. Такой массив данных может быть получен экспериментальным путем. В связи с этим в статье приведено исследование проходной вольт-амперной характеристики ХАП в зависимости от параметров электрических сигналов, возбуждающих плазму, расхода инертного газа, геометрии разрядной системы.

Упрощенная электрическая модель выходного каскада генератора плазмы

На рис. 1 представлена упрощенная электрическая схема типового выходного каскада генератора ХАП для генерации ХАП разрядом DBD. Согласно [2], повышающий трансформатор (ПТ), электроды и другие элементы разрядной системы совместно с генерируемой плазмой образуют колебательный контур, который обладает резонансными свойствами. Напряжение с задающего генератора U_r подается на первичную обмотку трансформатора. Напряжение возбуждения $U_{\text{возб}}$ со вторичной обмотки поступает на электроды разрядной системы, которые на схеме представлены эквивалентными емкостями $C_{\text{эл1}}$ и $C_{\text{эл2}}$, и далее подается на нагрузочное сопротивление $Z_{\text{пл}}$. Емкости $C_{\text{эл}}$ состоят из высоковольтного электрода и диэлектрического слоя, покрывающего этот электрод, а $Z_{\text{пл}}$ определяется эквивалентным сопротивлением плазмы. Таким образом, низкотемпературная плазма атмосферного давления, взаимодействующая с поверхностью объекта, является нелинейной нагрузкой для высоковольтного источника переменного тока в цепи с периодическим источником сигнала.

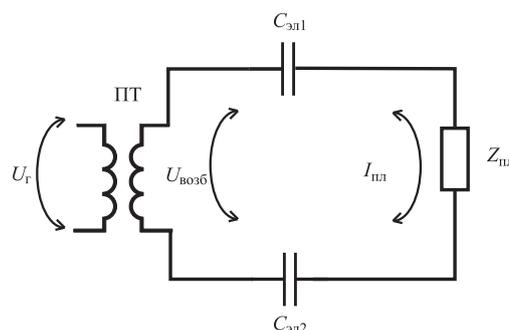


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная электрическая схема выходного каскада генератора холодной атмосферной плазмы

Fig. 1. Simplified equivalent electrical circuit of the output stage of a cold atmospheric plasma generator

В [5, 6] предложен способ диагностики и контроля взаимодействия плазмы с поверхностью объекта на основе параметров сигналов, возбуждающих плазму (мгновенных значений

напряжения и тока). В данной статье эти же сигналы использованы для анализа импедансных свойств плазмы. В качестве датчика тока в высоковольтной цепи применено устройство на основе оптопары [7].

Проведение исследований

Для проведения исследований в области анализа электрических сигналов, возбуждающих плазму диэлектрического барьерного разряда, использовался экспериментальный стенд, включавший в себя генератор сигналов OWON AG4151, осциллограф OWON XDS3204AE, высоковольтный преобразователь (трансформатор), датчик тока, регулятор расхода газа PPG-10 с блоком управления БУИП-1М, а также разрядную систему с электродами (рис. 2).

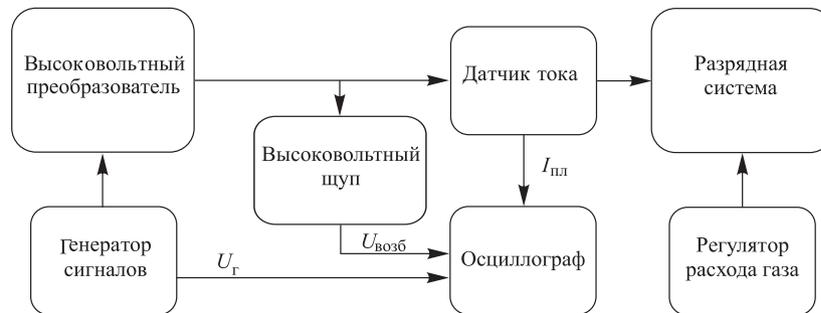


Рис. 2. Структурная схема исследовательского стенда
Fig. 2. Structural diagram of the research stand

Плазма формируется в коаксиальной разрядной системе с использованием инертного газа аргона (Ar), что создает плазменный факел длиной до 3 см и диаметром около 1 см.

Анализ отклика (тока) нагрузочного сопротивления на воздействие напряжением гармонической формы выполняли с помощью дискретного преобразования Фурье. В первичную обмотку ПТ подавался периодический сигнал прямоугольной формы с частотой, близкой к резонансной частоте выходного контура – 50 кГц. Подача сигнала прямоугольной формы была вызвана технической реализуемостью генератора. В результате во вторичной обмотке ввиду наличия реактивных элементов (вторичной обмотки трансформатора, емкости электродов разрядной системы и емкостных свойств самой плазмы) сигнал напряжения приобретал синусоидальную форму. Регистрировались сигналы напряжений и токов в нагрузке. Далее в соответствии с [8] вычислялись спектры сигналов напряжения и тока. Анализ линейности сопротивления нагрузки осуществляли на основе сравнения спектра отклика (тока) к спектру вызвавшего его воздействия (напряжения). По измеренным зависимостям изменения напряжения на электродах разрядной системы от времени и тока, протекающего между электродами, строили ВАХ нагрузочного сопротивления.

Методика исследования

На первом этапе экспериментов исследовали изменения ВАХ при изменении амплитуды напряжения на электродах в диапазоне от 3,5 до 8,0 кВ. Изменение напряжения выполнялось посредством изменения напряжения в первичной обмотке трансформатора и контролировалось высоковольтным щупом на электродах. В память цифрового осциллографа параллельно по трем каналам записывались результаты измерений: напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора U_{Γ} , напряжения $U_{\text{возб}}$ на электродах разрядной системы, сигнала с датчика тока $I_{\text{пл}}$, протекающего между электродами. Время регистрации составляло 200 мкс, частота дискретизации – 200 МГц, частота сигнала на входе трансформатора – 50 кГц, расход газа – 25 л/ч.

На втором этапе исследовали влияние изменения ВАХ при изменении расхода потока инертного газа через разрядную систему. Расход газа изменялся посредством регулятора расхода газа в диапазоне от 25 до 125 л/ч. Амплитуда напряжения на электродах составляла 5,5 кВ. В памяти осциллографа фиксировались параметры зависимости напряжения и тока на (через) электродах разрядной системы от времени. На третьем этапе измеряли напряжение $U_{\text{возб}}(t)$ и ток $I_{\text{пл}}(t)$ при изменении межэлектродного расстояния. Наружный электрод перемещался относительно конца внутреннего электрода, расположенного в кварцевой трубке, на расстояние от (-5) до (+5) мм с шагом 1 мм (рис. 3). Амплитуда напряжения составляла 5,5 кВ, расход газа – 25 л/ч.

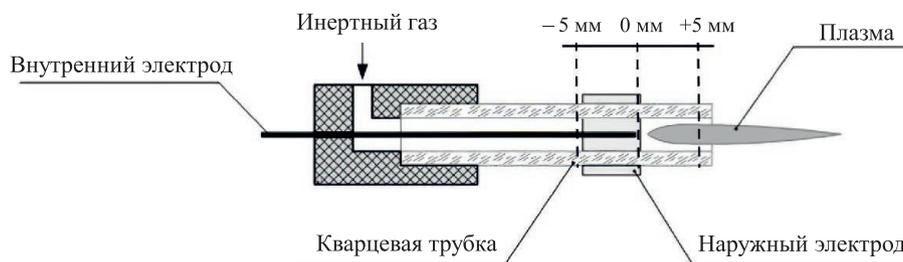


Рис. 3. Изменение положения электродов разрядной системы
Fig. 3. Change in the position of the electrodes of the discharge system

Построение проходных ВАХ на основе зафиксированных на первом, втором и третьем этапах исследований зависимостей напряжений и токов от времени выполнялось в среде MathCAD.

Результаты исследований

На рис. 4 представлены временные диаграммы напряжений в первичной обмотке ПТ и на электродах разрядной системы и тока, протекающего между ними. На вход трансформатора подавалось периодическое напряжение прямоугольной формы (рис. 4, *a*). В выходной цепи генератора наблюдался сигнал синусоидальной формы (рис. 4, *b*), что объясняется наличием реактивных сопротивлений элементов (обмотка ПТ, емкость электродов, плазма).

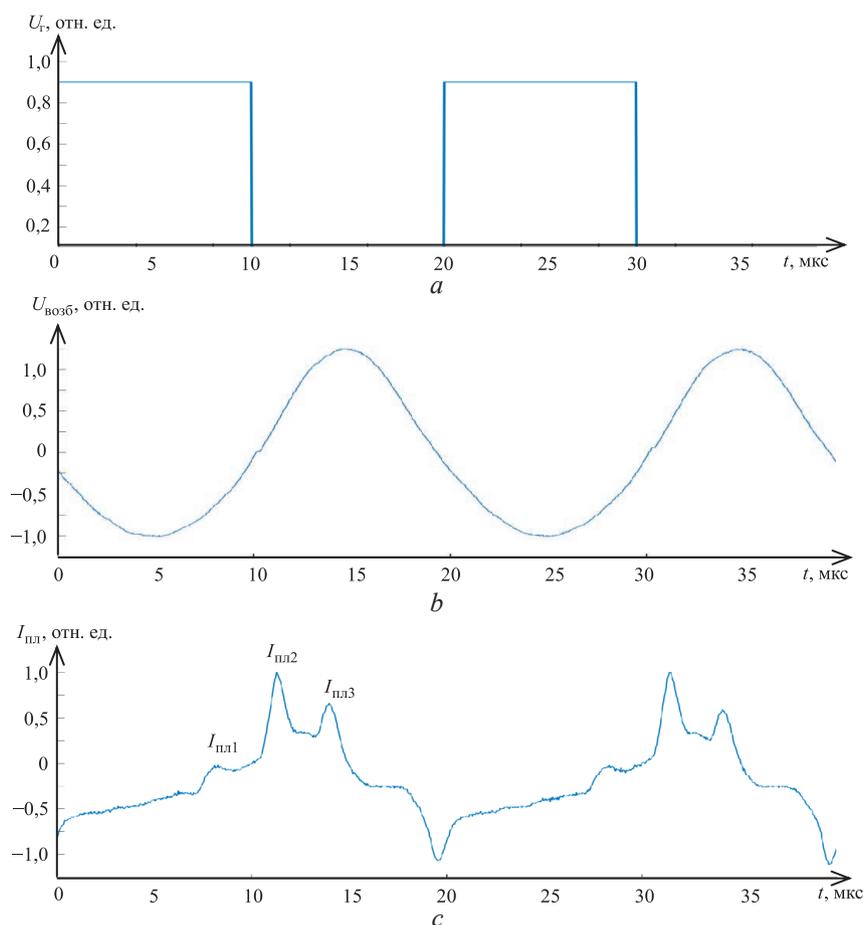


Рис. 4. Изменения напряжения и тока в выходной цепи генератора плазмы:

- a* – напряжение U_g на входе повышающего трансформатора;
- b* – напряжение возбуждения $U_{\text{возб}}$ на выходе повышающего трансформатора;
- c* – ток $I_{\text{пл}}$, протекающий через электроды разрядной системы

Fig. 4. Changes in voltage and current in the output circuit of the plasma generator:
a – input voltage U_g of the step-up transformer; *b* – excitation voltage U_{ex} at the output of the step-up transformer;
c – current I_p flowing through the discharge system electrodes

Зависимость тока от времени, считанная с датчика тока, представлена на рис. 4, с. Форма отклика $I_{пл}(t)$ электрической цепи (плазмы) содержит несколько локальных экстремумов ($I_{пл1}$, $I_{пл2}$, $I_{пл3}$) и существенно отличается от формы задающего гармонического воздействия $U_{возб}(t)$. При этом наблюдается сдвиг фаз между током и напряжением: ток опережает напряжение. Это свидетельствует о том, что при проведении эксперимента в выходном контуре преобладала емкостная составляющая реактивного сопротивления, а частота сигнала возбуждения плазмы отличалась от резонансной. Ввиду сложной формы тока, сдвиги фаз, измеренные на разных уровнях амплитуд, имеют различные значения в разные моменты времени (периода). Так, при возрастании напряжения на уровне нуля сдвиг фаз составляет 18° , а при уменьшении напряжения – 11° . Таким образом, данные параметры характеризуют и определяются изменением импеданса плазмы.

На рис. 5 представлены амплитудные спектры сигналов напряжения и тока. Спектр напряжения – квазигармонический и содержит несколько гармоник, т. е. задающий сигнал несколько отличается от синусоидального. Это объясняется тем, что на вход ПТ подавался прямоугольный сигнал. Спектр отклика (зависимость тока) – мультигармонический и содержит существенно больше гармоник, чем амплитудный спектр сигнала напряжения. Соответственно эффективная ширина полосы спектра f сигнала напряжения $U_{возб}$, определенная согласно [9], составляет 125 кГц, а эффективная полоса спектра f сигнала тока $I_{пл}$ – 425 кГц, т. е. в 3,4 раза больше. Изменение формы сигнала-отклика при воздействии гармоническим сигналом, соответственно и расширение эффективной полосы спектра, свидетельствуют о нелинейном сопротивлении нагрузки (плазмы) цепи.

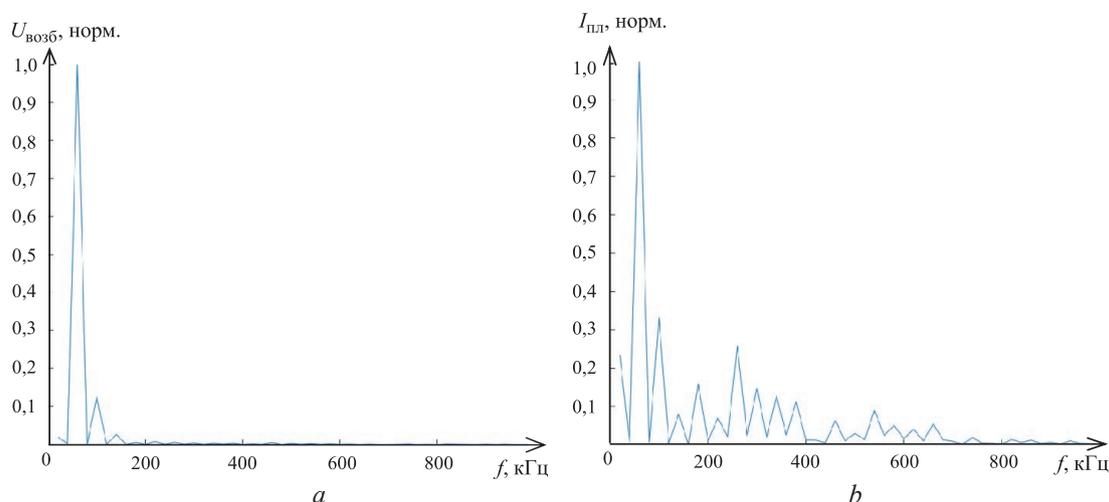


Рис. 5. Амплитудные спектры: *a* – напряжения; *b* – тока
Fig. 5. Amplitude spectrum: *a* – voltage; *b* – current

Исследовали влияние амплитуды напряжения, возбуждающего плазму, расхода инертного газа и расстояния между электродами разрядной системы на ВАХ холодной атмосферной плазмы диэлектрического барьерного разряда. Для анализа изменения импеданса плазмы от параметров генератора и разрядной системы строили проходную ВАХ нагрузки выходной цепи генератора. Расход потока газа составлял 25 л/ч, напряжение на электродах – 5,5 кВ.

На рис. 6 представлена проходная ВАХ, построенная на основе измеренных нормированных зависимостей напряжения и тока от времени. ВАХ имеет сложный гистерезисный характер, соответственно угол наклона принимает как положительные, так и отрицательные значения. Это объясняется наличием реактивной составляющей импеданса нагрузки.

Зависимости изменения тока, протекающего через электроды, при изменении амплитуды напряжения представлены на рис. 7. Наблюдаются изменение (сдвиг) положения локальных экстремумов токов относительно оси времени и непропорциональное изменение их амплитуд. При увеличении амплитуды напряжения виден не только рост амплитуды тока, но также происходит некоторое изменение формы тока – она приближается к синусоидальной. Сдвиг фаз между током и напряжением, определенный на уровне нулевой амплитуды, не изменяется. Следует отметить, что отличие формы тока $I_{пл}(t)$ от синусоидальной, а значит, и нелинейные свойства плазмы, больше проявляются при воздействии на нее напряжением меньшей амплитуды.

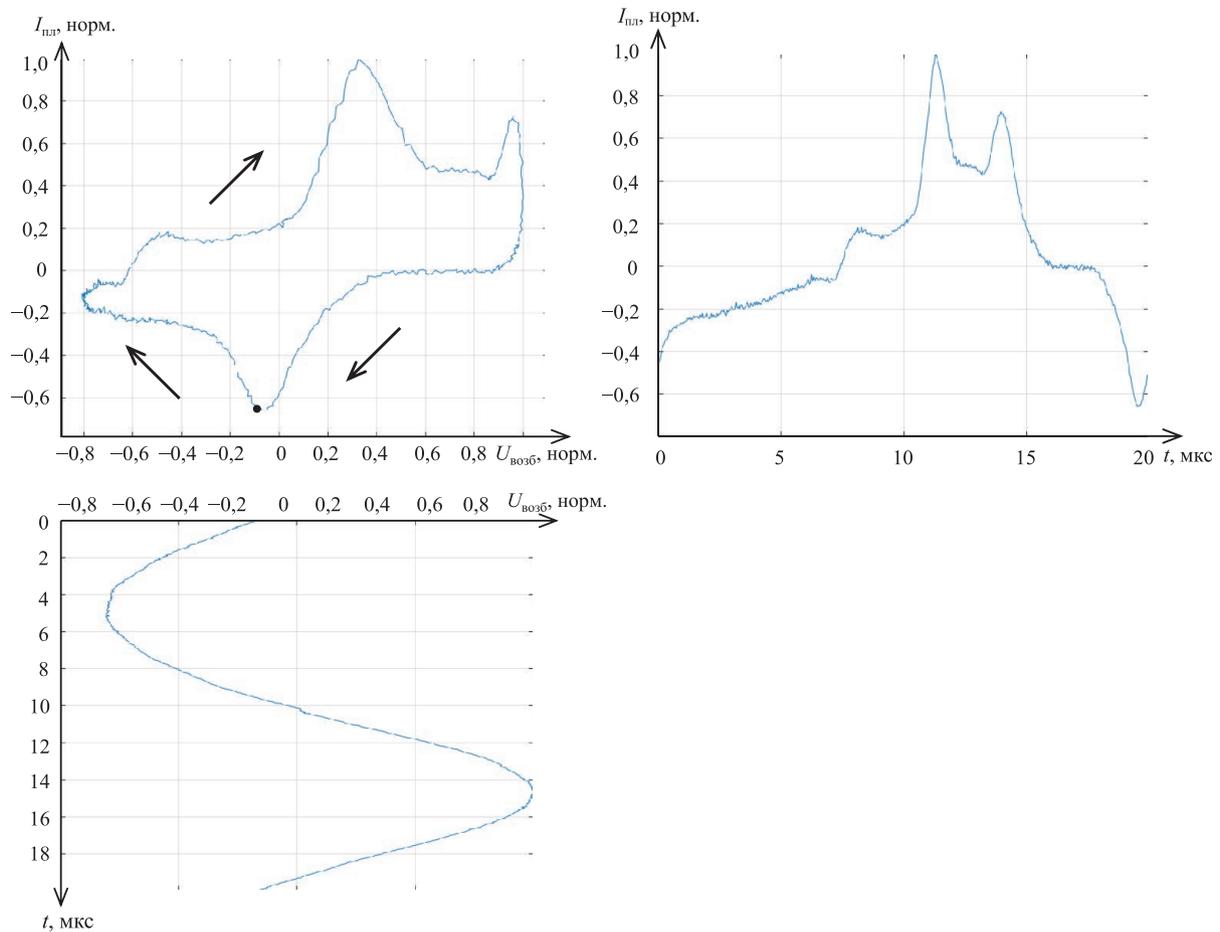


Рис. 6. Проходная вольт-амперная характеристика нагрузки генератора плазмы
Fig. 6. Volt-ampere characteristic of the plasma generator load

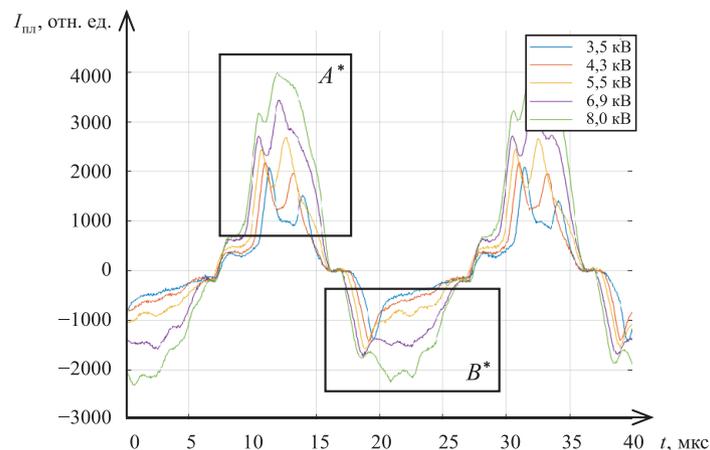


Рис. 7. Зависимость тока нагрузки от времени при различных напряжениях на электродах разрядной системы
Fig. 7. Dependence of load current on time at different voltages on the electrodes of the discharge system

Изменения формы сигналов подтверждают проходные ВАХ плазмы, построенные при различных напряжениях на электродах разрядной системы (рис. 8). Как следует из рис. 8, *a*, существенные изменения формы ВАХ характерны для областей *A* и *B*. Эти области соответствуют участкам *A**, *B** на рис. 7. Увеличение амплитуды $U_{\text{возб}}$ приводит к увеличению площади $S_{\text{ВАХ}}$, ограниченной кривой ВАХ. В табл. 1 представлены значения $S_{\text{ВАХ}}$ для различных напряжений возбуждения плазмы.

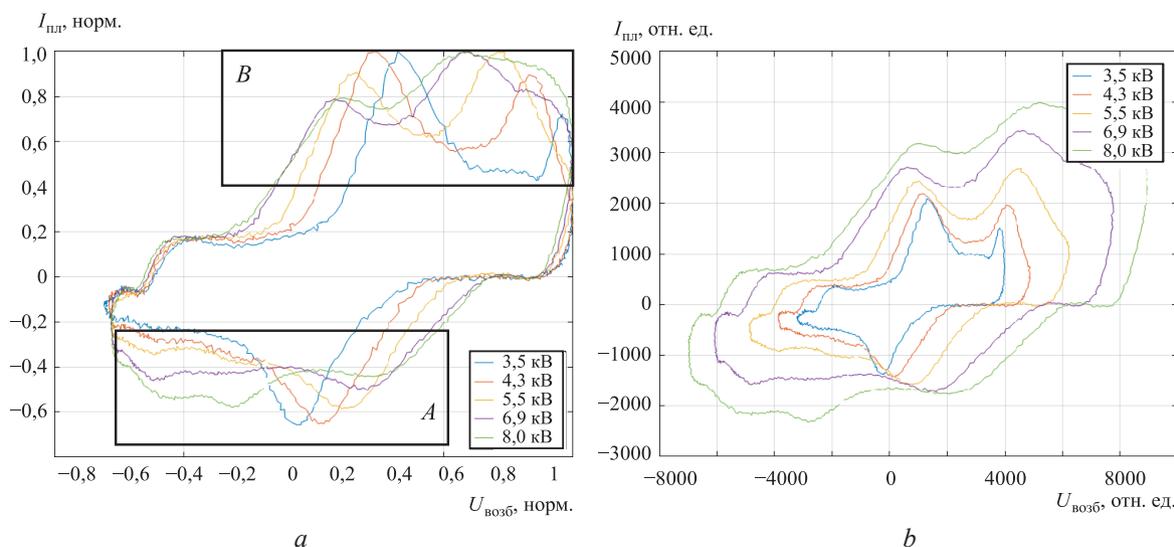


Рис. 8. Проходные вольт-амперные характеристики плазмы при различных напряжениях на электродах разрядной системы для значений токов и напряжений:
a – нормированных; *b* – относительных

Fig. 8. Transitional volt-ampere characteristics of plasma at different voltages on the electrodes of the discharge system for values of currents and voltages:
a – normalized; *b* – relative

Таблица 1. Ограничение площади вольт-амперной характеристики при изменении напряжения возбуждения плазмы

Table 1. Limitation of the area of the volt-ampere characteristic when changing the plasma excitation voltage

$U_{\text{возб}}, \text{кВ}$	3,5	4,3	5,5	6,9	8,0
$S_{\text{ВАХ}}, \text{отн. ед.}$	8,4	13,0	22,5	39,8	57,6

Увеличение напряжения $U_{\text{возб}}$ в 2,3 раза привело к увеличению площади $S_{\text{ВАХ}}$ в 6,8 раза. Таким образом, изменение напряжения возбуждения плазмы приводит к изменению формы тока, протекающего между электродами, а значит, – к изменению импеданса плазмы.

На рис. 9, *a, b* представлены семейства ВАХ соответственно при изменении положения электродов и расхода потока газа. Изменение данных параметров приводило к некоторому изменению формы и площади, ограниченной ВАХ. Для оценки этих изменений рассчитаны площади $S_{\text{ВАХ}}$, периметры кривых $L_{\text{ВАХ}}$ и параметр $S_{\text{ВАХ}}/L_{\text{ВАХ}}$. Результаты вычислений приведены в табл. 2, 3.

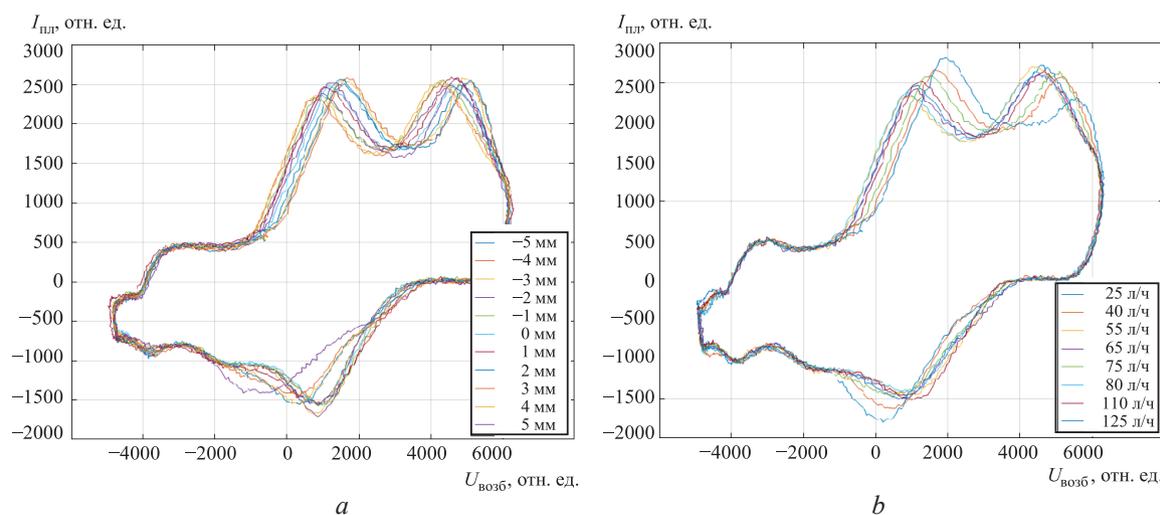


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики плазмы при различных:
a – расстояниях между электродами; *b* – расходах потока газа

Fig. 9. Volt-ampere characteristics of plasma at different: *a* – distances between electrodes; *b* – gas flow rates

Таблица 2. Площадь вольт-амперных характеристик и параметр $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$ при различном межэлектродном расстоянии
Table 2. The area of the volt-ampere characteristics and the parameter $S_{\text{VAC}}/L_{\text{VAC}}$ at different interelectrode distances

Расстояние, мм	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
S	2,089	2,141	2,149	2,174	2,198	2,131	2,279	2,147	2,149	2,168	2,109
S/L	701,3	712,4	725,3	728,1	750,5	723,2	756,3	719,6	733,6	732,4	721,1

Таблица 3. Площадь вольт-амперных характеристик и параметр $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$ при различном расходе газа
Table 3. The area of the volt-ampere characteristics and the parameter $S_{\text{VAC}}/L_{\text{VAC}}$ at different gas flow rates

Расход газа, л/ч	25	40	55	65	75	80	110	125
S	2,327	2,299	2,328	2,309	2,302	2,324	2,329	2,324
S/L	775,908	756,927	771,826	767,321	775,481	777,731	785,887	769,502

Анализ полученных данных показал, что изменение межэлектродного расстояния на 5 мм приводит к незначительному, менее 5 %, изменению площади ВАХ. При этом происходит более значительное изменение формы ВАХ – параметр $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$ изменяется на 9,2 %. Увеличение расхода потока газа в пять раз – с 25 до 125 л/ч – незначительно сказывалось на изменении импеданса плазмы. Так, изменение площади составляло менее 2 %, а параметра $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$ – менее 4 %. Следовательно, изменения электрических сигналов, полученные при разных расходах потока газа, не столь значительны по сравнению с изменениями, вызванными различными напряжениями возбуждения плазмы или расстояниями между электродами разрядной системы.

Заключение

1. Подтверждено, что атмосферная плазма характеризуется нелинейным импедансом. Об этом свидетельствует изменение формы тока (отклика) нагрузки (плазмы) на воздействие гармоническим напряжением соответственно на расширение эффективной полосы и структуры амплитудного спектра тока. При проведении исследований на частоте, близкой к резонансной, наблюдался сдвиг фаз между током и напряжением, причем ток опережал напряжение, что свидетельствует о преобладании емкостной составляющей в выходной цепи генератора. Нелинейные свойства плазмы больше проявляются при воздействии на нее напряжением меньшей амплитуды. При изменении различных параметров генератора для оценки изменения импеданса плазмы построены ее проходные вольт-амперные характеристики, которые имеют сложный гистерезисный характер.

2. Установлено, что регистрируемые электрические параметры тока в выходной цепи генератора отражают изменения плазмы, вызванные изменением возбуждающего плазму напряжения, геометрии разрядной системы, расхода потока газа. Увеличение напряжения $U_{\text{возб}}$ в 2,2 раза приводит к увеличению площади S_{BAX} в 6,8 раза, изменение межэлектродного расстояния на 5 мм – к незначительному (менее 5 %) изменению площади проходной вольт-амперной характеристики. При этом существенно меняется параметр $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$ – на 9,2 %. Изменения геометрии вольт-амперных характеристик при увеличении расхода потока газа с 25 до 125 л/ч не столь ощутимы (площади – менее 2 %, параметра $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$ – менее 4 %) по сравнению с изменениями, полученными при различных напряжениях возбуждения плазмы или расстояниях между электродами.

3. Результаты исследований могут быть использованы при численном моделировании атмосферной плазмы диэлектрического барьерного разряда, а также при выборе оптимальных режимов работы генераторов плазмы.

Список литературы

1. The 2022 Plasma Roadmap: Low Temperature Plasma Science and Technology / I. Adamovich [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022. Vol. 55, No 373001. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/ac5e1c#dac5e1cs11>.
2. Electrical Model of Cold Atmospheric Plasma Gun / Ya. Z. Slutsker [et al.] // Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24, No 10. <https://doi.org/10.1063/1.4986023>.
3. Надольский, А. Н. Теоретические основы радиотехники / А. Н. Надольский. Минск, 2005.
4. Туев, В. И. Проектирование радиоэлектронных средств по критериям нелинейности / В. И. Туев. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлект., 2020.

5. Generation of Low-Temperature Plasma by Pulse-Width Modulated Signals and Monitoring of the Interaction Thereof with the Surface of Objects / Ma Tianbao [et al.] // *Plasma Science and Technology*. 2025. Vol. 27, No 1.
6. Способ диагностики плазмы диэлектрического барьерного разряда: Евраз. пат. 045560; МПК (2006) H05H 1/00 / А. Н. Осипов, Д. А. Котов; заявитель и патентообладатель Белор. гос. ун-т информ. и радио-элек. № 202390454; заявл. 31.01.2023; опубл. 05.12.2023.
7. Устройство для измерения тока в высоковольтной цепи: Евраз. пат. 042096; МПК (2006) G01R 19/06 / А. Н. Осипов; заявитель и патентообладатель Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек. № 202291076; заявл. 28.03.2022; опубл. 13.01.2023.
8. Кривошеев, В. И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ) / В. И. Кривошеев. Нижний Новгород: Нижегородский гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского, 2006.

Поступила 05.02.2025

Принята в печать 04.03.2025

References

1. Adamovich I., Agarwal S., Ahedo E., Alves L. L., Baalrud S., Babaeva N., et al. (2022) The 2022 Plasma Roadmap: Low Temperature Plasma Science and Technology. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 55 (373001). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/ac5e1c#dac5e1cs11>.
2. Slutsker Ya. Z., Semenov V. E., Krasik Ya. E., Ryzhkov M. A., Felsteiner J., Binenbaum Y., et al. (2017) Electrical Model of Cold Atmospheric Plasma Gun. *Physics of Plasmas*. 24 (10). <https://doi.org/10.1063/1.4986023>.
3. Nadolsky A. N. (2005) *Theoretical Foundations of Radiotechnics*. Minsk (in Russian).
4. Tuyev V. I. (2020) *Designing Radioelectronic Systems by Nonlinearity Criteria*. Tomsk, Publishing House of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (in Russian).
5. Tianbao Ma, Kalenkovich Ya., Rokach V., Osipov A. (2025) Generation of Low-Temperature Plasma by Pulse-Width Modulated Signals and Monitoring of Their Interaction with Object Surfaces. *Plasma Science and Technology*. 27 (1).
6. Osipov A. N., Kotov D. A. (2006) Method for Diagnosing Dielectric Barrier Discharge Plasma. *Eurasian Patent 045560, IPC, H05H 1/00, Applicant and Patent Holder Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. No 202390454; Declared 31.01.2023; Published 05.12.2023 (in Russian).
7. Osipov A. N. (2006) Device for Measuring Current in a High-Voltage Circuit. *Eurasian Patent 042096, IPC, G01R 19/06, Applicant and Patent Holder EI Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. No 202291076; Declared 28.03.2022; Published 13.01.2023 (in Russian).
8. Krivosheev V. I. (2006) *Modern Methods of Digital Signal Processing (Digital Spectral Analysis)*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky (in Russian).

Received: 5 February 2025

Accepted: 4 March 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Осипов А. Н., канд. техн. наук, доц., зав. отрасл. лаб. центра «Приборы, системы и технологии медицинского назначения», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Ма Т., асп. каф. электронной техники и технологий, БГУИР

Рокач В. А., асп. каф. электронной техники и технологий, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Осипов Анатолий Николаевич

Information about the authors

Osipov A. N., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Sectoral Laboratory at the Center for “Devices, Systems and Technologies for Medical Purposes”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Ma T., Postgraduate at the Department of Electronic Engineering and Technologies, BSUIR

Rokach V. A., Postgraduate at the Department of Electronic Engineering and Technologies, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Osipov Anatoliy Nikolayevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-53-60>

УДК 621.391.82

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ СМЕСИТЕЛЕЙ ДИАПАЗОНА FR1 ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Е. В. СИНЬКЕВИЧ¹, В. И. МОРДАЧЕВ¹, ФАЮ ВАН², Д. А. ЦИОНЕНКО¹,
И. В. ШАКИНКО¹

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

²Нанкинский университет информационных наук и технологий
(Нанкин, Китайская Народная Республика)

Аннотация. С применением технологии двухчастотного зондирования выполнен экспериментальный анализ нелинейных свойств маломощных радиочастотных смесителей на частотах полосы n7, выделенной в Беларуси для систем мобильной связи 4G, и полосы n78, которую планируется использовать в республике для систем мобильной связи 5G. На основе результатов измерений двухчастотных характеристик смесителей, их односигнальных амплитудных характеристик, а также двухсигнальных амплитудных характеристик и динамического диапазона по интермодуляции 3-, 5-, 7- и 9-го порядков в гармонической зоне полезного сигнала синтезированы полиномиальные модели высоких порядков, описывающие передаточные характеристики исследуемых смесителей и предназначенные для анализа влияния радиочастотных электромагнитных помех на радиотракты методом дискретного нелинейного моделирования при большом динамическом диапазоне входных воздействий. Полученные модели обеспечивают высокую адекватность и вычислительную эффективность количественного анализа нелинейных процессов и радиопомех, возникающих в приемном оборудовании радиосетей 4G/5G/6G в сложной электромагнитной обстановке.

Ключевые слова: мобильная связь 4G/5G, FR1, электромагнитная обстановка, смеситель, нелинейность, интермодуляция, блокирование, динамический диапазон, полиномиальная модель.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Экспериментальные исследования и разработка моделей нелинейности смесителей диапазона FR1 для анализа электромагнитной совместимости / Е. В. Синькевич [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 53–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-53-60>.

EXPERIMENTAL RESEARCH AND DEVELOPMENT OF NONLINEARITY MODELS FOR FR1 RANGE MIXERS FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ANALYSIS

EUGENE V. SINKEVICH¹, VLADIMIR I. MORDACHEV¹, FAYU WAN²,
DZMITRY A. TSYANENKA¹, IVAN V. SHAKINKA¹

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

²Nanjing University of Information Science and Technology (Nanjing, People's Republic of China)

Abstract. By using the technology of double-frequency testing, an experimental analysis of nonlinear properties of low-power radio-frequency mixers is performed at frequencies of the n7 band allocated in Belarus for 4G mobile communication systems and the n78 band that is planned to be used in Belarus for 5G mobile communications. Based on the results of the measurements of mixer characteristics (the double-frequency characteristics,

single-tone amplitude characteristics, as well as two-tone amplitude characteristics and dynamic ranges for 3rd-, 5th-, 7th-, and 9th-order intermodulation) in the harmonic zone of the useful signal, high-order polynomial models describing the transfer characteristics of the considered mixers are synthesized. These models are intended to analyze the effect of radio-frequency electromagnetic interference on radio links behavior in case of a large dynamic range of input signals by using the discrete nonlinear modeling technique. The obtained models provide high adequacy and computational efficiency of quantitative analysis of nonlinear processes and radio interference occurring in receivers of 4G/5G/6G radio networks in a complex electromagnetic environment.

Keywords: mobile communications 4G/5G, FR1, electromagnetic environment, mixer, nonlinearity, intermodulation, blocking, dynamic range, polynomial model.

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

For citation. Sinkevich E. V., Mordachev V. I., Fayu Wan, Tsyantenka D. A., Shakinka I. V. (2025) Experimental Research and Development of Nonlinearity Models for FR1 Range Mixers for Electromagnetic Compatibility Analysis. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 53–60. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-53-60> (in Russian).

Введение

Постоянное усложнение электромагнитной обстановки (ЭМО) в полосах частот мобильной (сотовой) связи (МС), сопровождающееся увеличением числа и динамического диапазона сигналов на входе радиоприемников базового и абонентского оборудования МС, приводит к росту опасности нелинейных помех радиоприему, таких как интермодуляция, блокирование, перекрестные искажения, преобразование шумов гетеродинов и др. Эти помехи создаются при воздействии мощных внеполосных сигналов на входную нелинейность радиоприемников, определяемую нелинейностью его входных элементов – усилителей радиочастоты (УРЧ) и смесителей, что обуславливает актуальность детальных исследований нелинейности этих элементов в интересах построения адекватных математических моделей, описывающих их передаточные характеристики (ПХ) в широком динамическом диапазоне входных воздействий.

В [1] такие исследования применительно к УРЧ, функционирующим в полосах n7 и n78 нижнего диапазона частот FR1 (0,410–7,125 ГГц) мобильной связи 4G/5G, позволили синтезировать полиномиальные модели ПХ УРЧ до 37 порядка, пригодные для использования в широком динамическом диапазоне входных воздействий с целью одновременного моделирования нелинейных эффектов всех видов, представляющих опасность для радиоприема в сложной ЭМО, создаваемой в полосах частот МС: как «тонких» эффектов (интермодуляция), так и «грубых» (блокирование, перекрестные искажения). Данные модели предназначены для использования в качестве типовых (справочных), обеспечивающих возможность исследований, эффективного моделирования и количественного анализа нелинейных процессов и радиопомех в радиосетях МС 4G/5G/6G в сложной ЭМО с использованием технологии [2, 3] дискретного нелинейного анализа поведения радиооборудования при большом динамическом диапазоне входных воздействий, которая при фиксированном порядке полиномиальных моделей передаточных характеристик инвариантна к сложности ЭМО. Однако эти модели не обеспечивают объективности анализа нелинейных помех функционированию широкого класса радиоприемных трактов МС, для которого входная нелинейность тракта в значительной степени определяется нелинейностью первого смесителя в силу слабой частотной избирательности УРЧ.

Цель исследований – разработка адекватных моделей ПХ смесителей диапазона FR1 4G/5G для гармонической зоны полезного сигнала, обеспечивающих возможность количественного анализа их поведения при большом динамическом диапазоне входных воздействий, на основе экспериментальных исследований характеристик нелинейности данных смесителей методом двухчастотного зондирования (ДЧЗ) [4].

Экспериментальные исследования характеристик нелинейности смесителей

Проведены экспериментальные исследования нелинейных свойств маломощных смесителей производства компании Mini-Circuits (США) на частотах полосы n7 (2500–2570 / 2620–2690 МГц), которая выделена в Беларуси для систем МС 4G, и полосы n78 (3300–3800 МГц), которую планируется использовать в республике для систем МС 5G. Структурная схема автоматизированной системы (АС) ДЧЗ, использованной при проведении измерений, приведена на рис. 1.

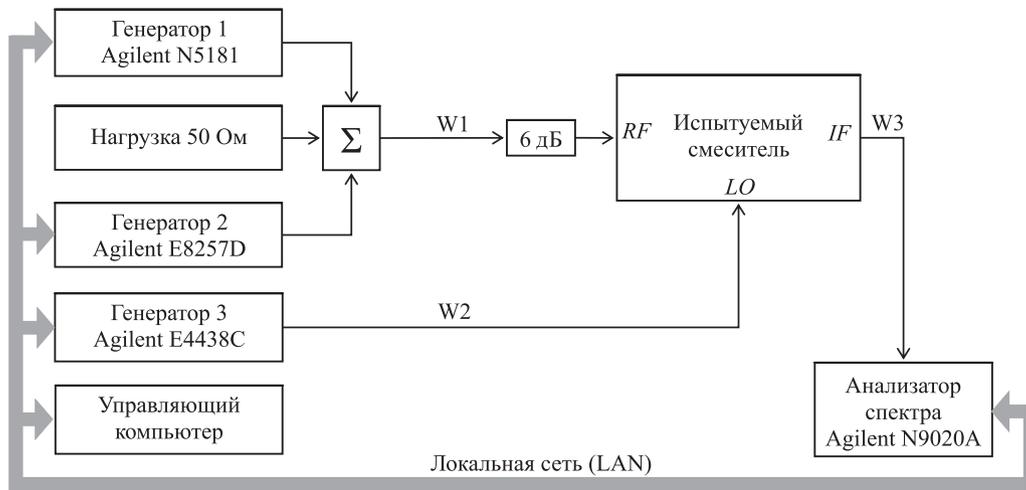


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы двухчастотного зондирования при измерении характеристик смесителя

Fig. 1. Block diagram of the automatic double-frequency test system used in the tests of mixer

При проведении исследований измерены следующие характеристики, отражающие нелинейные свойства радиочастотных смесителей: односигнальная амплитудная характеристика (АХ) по полезному сигналу (АХ-1), двухчастотная характеристика (ДЧХ), АХ по двухсигнальной интермодуляции (АХ-ИМ) 3-, 5-, 7- и 9-го порядков в гармонической зоне полезного сигнала. Амплитудные характеристики смесителей измерены в большом динамическом диапазоне уровней входных сигналов (от приведенного уровня собственных шумов до уровня насыщения), что обеспечивает возможность синтеза математических моделей нелинейности, пригодных для одновременного анализа нелинейных явлений всех основных видов, возникающих в радиочастотных смесителях: интермодуляции, блокирования, перекрестных искажений.

На рис. 2–5 приведены примеры результатов измерения характеристик нелинейности смесителя ZEM-4300+ в окрестности частоты полезного сигнала на входе RF, равной 2551 МГц (при частоте колебания гетеродина 3437 МГц, уровне колебания гетеродина 7 дБм и промежуточной частоте 886 МГц).

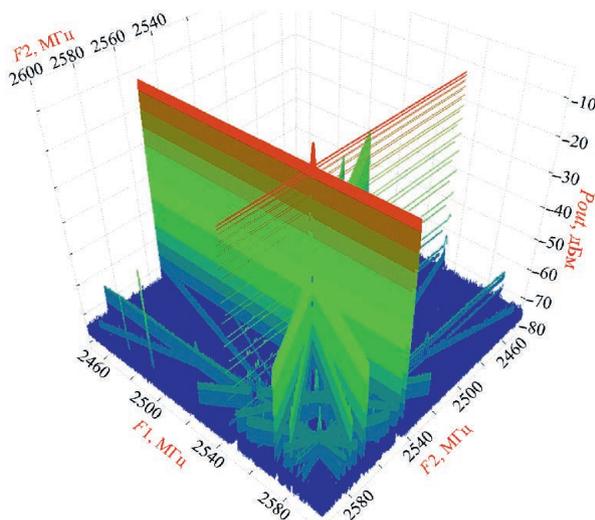


Рис. 2. Двухчастотная характеристика смесителя ZEM-4300+; амплитуды испытательных сигналов на входе RF одинаковы и равны (-6) дБм

Fig. 2. Double-frequency characteristic of ZEM-4300+ mixer; amplitudes of test signals at RF input are the same and equal to (-6) dBm

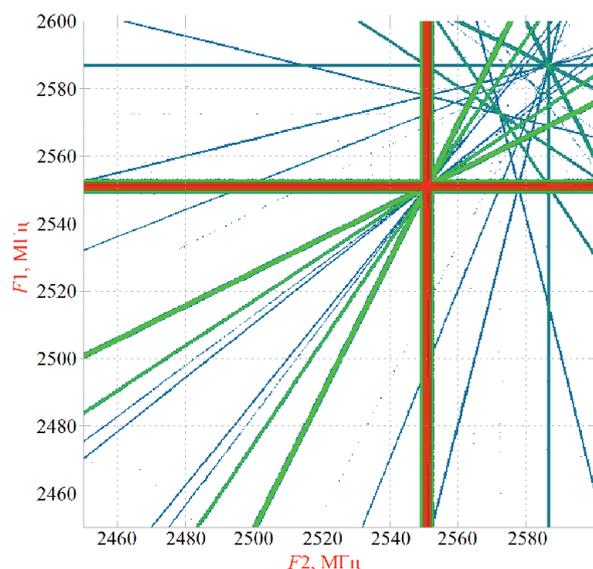


Рис. 3. Двухчастотная характеристика (ДЧХ) смесителя ZEM-4300+ в виде двухчастотной диаграммы – сечения ДЧХ по уровню (-71) дБм

Fig. 3. Double-frequency characteristic (DFC) of the ZEM-4300+ mixer in the form of a dual-frequency diagram – DFC cross-section at the level of (-71) dBm

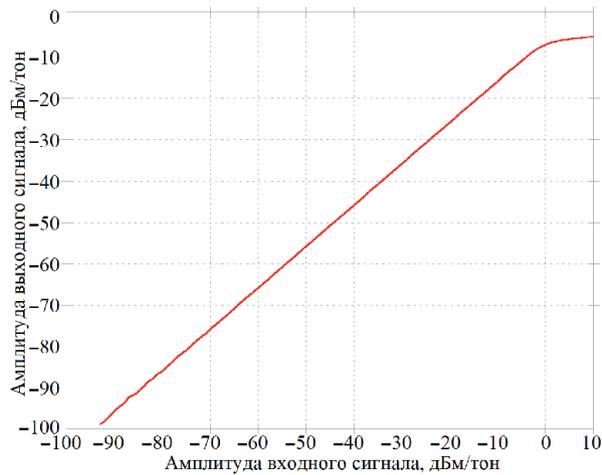


Рис. 4. Амплитудная характеристика AX-1 ZEM-4300+;

частота сигнала на входе $RF = 2551$ МГц

Fig. 4. Amplitude characteristic AX-1 of the ZEM-4300+; signal frequency at the RF input is 2551 MHz

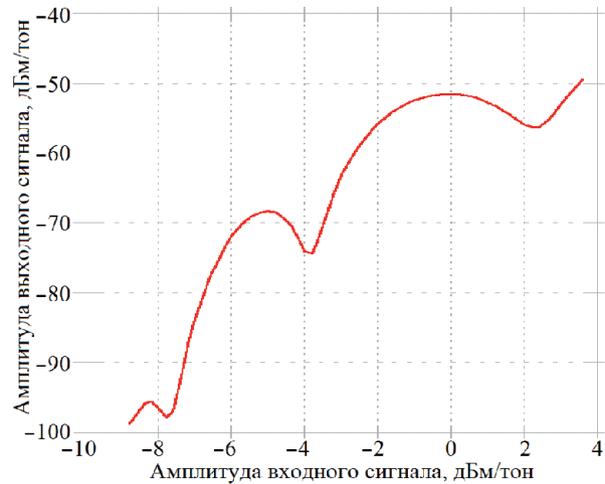


Рис. 5. Равносигнальная AX-ИМ-9 ZEM-4300+; частоты испытательных сигналов равны 2487,25 и 2500 МГц; частота продукта интермодуляции на выходе $IF = 886$ МГц

Fig. 5. Equal-signal AX-ИМ-9 of the ZEM-4300+; test signal frequencies are 2487.25 and 2500 MHz; intermodulation product frequency at the IF output is 886 MHz

Правильность выполненных измерений подтверждается соответствием между измеренными значениями основных числовых характеристик смесителей (потерь преобразования, уровня компрессии) и их номинальными значениями, приведенными в спецификациях производителя.

Синтез моделей нелинейности смесителей

На основе результатов испытаний маломощных смесителей методом ДЧЗ выполнен синтез полиномиальных моделей нелинейности данных смесителей по методикам, разработанным в [5]. Эти модели ориентированы на использование при анализе методом дискретного нелинейного моделирования [2, 3] влияния радиочастотных электромагнитных помех большого динамического диапазона на радиотракты, реализованные с использованием аналогичной элементной базы. В качестве исходных данных для синтеза использованы измеренные АХ-1 и АХ-ИМ 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков в гармонической зоне полезного сигнала, а также значения динамического диапазона анализируемых смесителей по двухсигнальной интермодуляции (ДДИ) 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков; каждое значение ДДИ вычислено на основе измеренной АХ-ИМ соответствующего порядка и измеренной АХ-1.

В качестве примера в табл. 1 и 2 приведены результаты синтеза полиномиальных моделей нелинейности смесителя ZEM-4300+ на частотах (2551 ± 180) МГц (для верхней настройки гетеродина 3437 МГц) и (3501 ± 18) МГц (для нижней настройки гетеродина 2615 МГц) при уровне основного колебания гетеродина 7 дБм и промежуточной частоте 886 МГц:

– классическая модель 9-го порядка $S09rnnnnH$ (табл. 1) получена на основе малосигнального коэффициента усиления и ДДИ 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков;

– классическая модель 7-го порядка $S07rnnnH$ (табл. 1) получена на основе малосигнального коэффициента усиления и ДДИ 3-го, 5-го и 7-го порядков (для смесителя ZEM-4300+ в окрестности частоты 3501 МГц интермодуляция 9-го порядка не наблюдалась, поскольку ее уровень ниже уровня шумов АС ДЧЗ);

– комбинированная модель 29-го порядка $A29C07rnnnH$ (табл. 2) получена на основе АХ-1 по полезному сигналу и ДДИ 3-го, 5-го и 7-го порядков;

– комбинированная модель 9-го порядка $A09C03rpnH$ (табл. 2) получена на основе АХ-1 по полезному сигналу и ДДИ 3-го порядка.

Таблица 1. Коэффициенты классических полиномиальных моделей передаточной характеристики радиочастотного смесителя ZEM-4300+ по мгновенному значению сигнала на разных частотах
Table 1. Coefficients of the classical polynomial models of the transfer characteristic of the radiofrequency mixer ZEM-4300+ with respect to the instantaneous signal value at different frequencies

Степень k	Частота 2551 МГц, C09pnnnnH		Частота 3501 МГц, C07pnnnH	
	ДДИ, дБ	Коэффициент полинома, B^{1-k}	ДДИ, дБ	Коэффициент полинома, B^{1-k}
1	–	0,5128613839913648	–	0,4518559443749223
3	67,1	–0,47732854666718033	64,3	–0,8679230736632407
5	77,2	–5,098983407209903	74,3	–7,451166144768661
7	79,5	128,8379109598531	80,0	–22,238829726105212
9	80,7	–2414,7346843165187	–	–

Таблица 2. Коэффициенты комбинированных полиномиальных моделей передаточной характеристики радиочастотного смесителя ZEM-4300+ по мгновенному значению сигнала на разных частотах
Table 2. Coefficients of the combined polynomial models of the transfer characteristic of the radiofrequency mixer ZEM-4300+ with respect to the instantaneous signal value at different frequencies

Степень k	Частота 2551 МГц, A29C07pnnnH	Частота 3501 МГц, A09C03pnH
	Коэффициент полинома, B^{1-k}	Коэффициент полинома, B^{1-k}
1	0,5128613839913648	0,4518559443749223
3	–0,48994672003815554	–0,8809245973434593
5	0,2752086528030535	0,9288212597121278
7	–80,74431037317753	–0,49625524277699173
9	–141,9736891223379	0,13223948954241788
11	10692,939962352659	–
13	–88039,59443965062	–
15	373876,57196827297	–
17	–988875,0842773796	–
19	1738394,8095183442	–
21	–2072571,1211467958	–
23	1660412,2125338174	–
25	–857053,1360728182	–
27	257680,56696512253	–
29	–34295,599341172136	–

Проверка корректности и анализ качества синтезированных моделей нелинейности смесителей выполнены путем сравнения характеристик (АХ-1 и АХ-ИМ 3-, 5-, 7- и 9-го порядков) моделей с измеренными характеристиками смесителя. В качестве примеров на рис. 6–9 показаны графики амплитудных характеристик различных моделей смесителя ZEM-4300+ и результаты измерений в окрестности частот 2551 МГц (рис. 6, 7) и 3501 МГц (рис. 8, 9). Обозначения кривых на рис. 6–9: 1 – измеренная АХ-1 смесителя; 2, 3 – одно- и двухсигнальная АХ-1 модели смесителя соответственно; 4, 5 – равносигнальные АХ-ИМ 3-го порядка – модель и измерения соответственно; 6, 7 – равносигнальные АХ-ИМ 5-го порядка – модель и измерения соответственно; 8, 9 – равносигнальные АХ-ИМ 7-го порядка – модель и измерения соответственно; 10, 11 – равносигнальные АХ-ИМ 9-го порядка – модель и измерения соответственно; 12 – уровень восприимчивости к интермодуляции на выходе смесителя; 13 – нижняя граница области блокирования для односигнальных АХ (точка децибелльной компрессии односигнальной АХ-1); 14 – нижняя граница области блокирования для двухсигнальных АХ (точка децибелльной компрессии двухсигнальной АХ-1).

Как следует из рис. 6, 7, для смесителя ZEM-4300+ в окрестности частоты 2551 МГц классическая модель C09pnnnnH удовлетворительно аппроксимирует АХ-1 и АХ-ИМ 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядков в режиме малой нелинейности (в котором уровень входного сигнала не превышает нижней границы области блокирования), а комбинированная модель A29C07pnnnH адекватно воспроизводит уровни АХ-1 и АХ-ИМ 3-го порядка в области не только малой, но и существенной нелинейности.

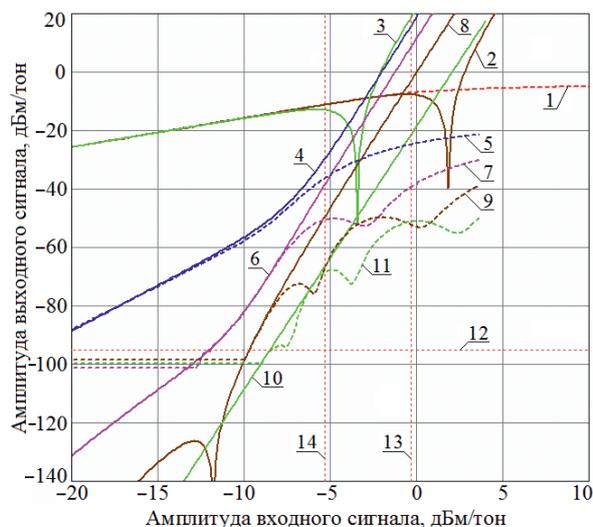


Рис. 6. Амплитудные характеристики смесителя ZEM-4300+ и классической модели C09pnnnnH в окрестности частоты 2551 МГц
Fig. 6. Amplitude characteristics of the ZEM-4300+ mixer and the classical model C09pnnnnH in the vicinity of 2551 MHz

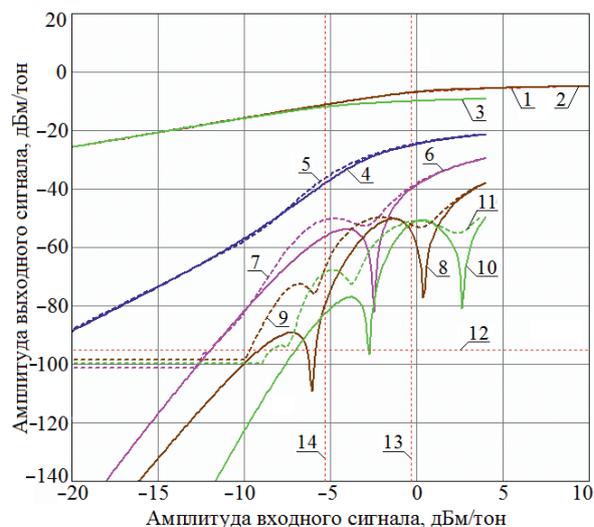


Рис. 7. Амплитудные характеристики смесителя ZEM-4300+ и комбинированной модели A29C07pnnnH в окрестности частоты 2551 МГц
Fig. 7. Amplitude characteristics of the ZEM-4300+ mixer and the combined model A29C07pnnnH in the vicinity of 2551 MHz

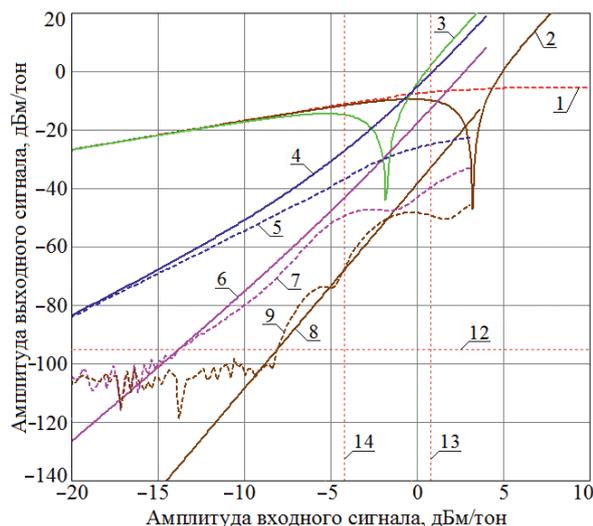


Рис. 8. Амплитудные характеристики смесителя ZEM-4300+ и классической модели C07pnnnH в окрестности частоты 3501 МГц
Fig. 8. Amplitude characteristics of the ZEM-4300+ mixer and the classical model C07pnnnH in the vicinity of 3501 MHz

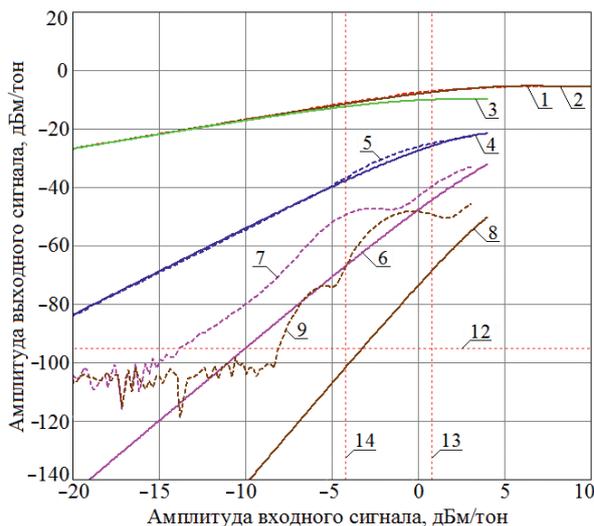


Рис. 9. Амплитудные характеристики смесителя ZEM-4300+ и комбинированной модели A09C03pnnH в окрестности частоты 3501 МГц
Fig. 9. Amplitude characteristics of the ZEM-4300+ mixer and the combined model A09C03pnnH in the vicinity of 3501 MHz

Из рис. 8, 9 следует, что для ZEM-4300+ в окрестности частоты 3501 МГц классическая модель C07pnnnH удовлетворительно аппроксимирует АХ-1 и АХ-ИМ 3-го, 5-го и 7-го порядков только в режиме малой нелинейности, а комбинированная модель A09C03pnnH адекватно воспроизводит уровни АХ-1 и АХ-ИМ 3-го порядка в области не только малой, но и существенной нелинейности.

Наблюдаемые значительные различия в измеренных и расчетных АХ-ИМ смесителя ZEM-4300+ в окрестностях частот 2551 и 3501 МГц, находящихся в его рабочей полосе частот 300–4300 МГц, как и различия в порядках классических и особенно комбинированных моделей нелинейности данного смесителя, свидетельствуют о значительной зависимости ха-

рактических характеристик нелинейности ZEM-4300+ от частоты и о необходимости учета этой зависимости при анализе электромагнитной совместимости оборудования, использующего подобные смесители. Одним из вариантов такого учета является применение различных моделей смесителя в разных полосах частот.

Как и для усилителей в [1], существует оптимальный порядок комбинированной полиномиальной модели радиочастотного смесителя. Если полный порядок комбинированной модели уменьшать ниже оптимального (29-го – для модели на рис. 7), то аппроксимация АХ смесителя моделью ухудшается, особенно в области ограничения и колена (перехода от области малой нелинейности к области ограничения), из-за нехватки степеней свободы полинома. Если же полный порядок модели увеличивать выше оптимального, то ухудшается аппроксимация моделью АХ смесителя по интермодуляции в области малой нелинейности, поскольку полиномиальная модель начинает воспроизводить погрешности измерения АХ-1.

Синтезированные комбинированные полиномиальные модели (описывающие как область малой нелинейности, так и область насыщения) пригодны для одновременного анализа нелинейных явлений всех основных видов, возникающих в радиочастотных смесителях: интермодуляционных и перекрестных помех основных типов, а также блокирования. Это полезное свойство обеспечит возможность выполнять моделирование поведения рассмотренных смесителей в ЭМО различной сложности, создаваемой системами MC 4G/5G/6G с разной пространственной плотностью источников радиочастотных электромагнитных полей.

Заключение

1. Синтезированы полиномиальные модели высоких порядков для описания передаточных характеристик радиочастотных смесителей, пригодные для использования в широком динамическом диапазоне входных воздействий с целью одновременного моделирования на поведенческом уровне нелинейных эффектов всех видов, представляющих опасность для радиоприема в сложной электромагнитной обстановке, создаваемой в полосах частот мобильной связи: как «тонких» (интермодуляция), так и «грубых» (блокирование, перекрестные искажения).

2. В связи с отсутствием в научной литературе параметров полиномиальных моделей высоких порядков для описания нелинейности современных маломощных смесителей диапазона FR1 данные табл. 1, 2 могут использоваться в качестве справочных, обеспечивая возможность исследований, эффективного моделирования и количественного анализа нелинейных процессов и радиопомех в оборудовании и радиосетях мобильной связи 4G/5G/6G в сложной электромагнитной обстановке с применением технологии [2, 3] дискретного нелинейного анализа поведения радиооборудования при большом динамическом диапазоне входных воздействий.

3. Разработанные модели описывают нелинейность смесителей только в рамках гармонической зоны полезного сигнала, и поэтому позволяют, наряду с блокированием, анализировать интермодуляционные и перекрестные помехи только ограниченного количества наиболее распространенных видов (в первую очередь тех видов, которые возникают за счет нелинейного взаимодействия сигналов нескольких десятков соседних каналов в пределах выделенной полосы частот мобильной связи, не ослабляемых входными фильтрами радиоприемного тракта). Возможное направление развития проведенного исследования – синтез моделей нелинейности смесителей в виде ряда Тейлора – Фурье [6], пригодных для описания всех гармонических зон и всех видов интермодуляционных и перекрестных помех.

4. Работа выполнена в рамках совместного научного проекта T22КИТГ-018 (2022YFE0122700) при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Национальной программы ключевых исследований и разработок КНР.

Список литературы / References

1. Mordachev V. I., Sinkevich E. V., Fayu W., Tsyankenka D. A., Shakinka I. V., Dubovik A. A. (2024) Experimental Investigation of Characteristics and Development of Nonlinearity Models for FR1-Range Radio-Frequency Amplifiers. *Doklady BGUIR*. 22 (1), 39–47. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-39-47> (in Russian).
2. Mordachev V. I. (1988) Express Analysis of Electromagnetic Compatibility of Radio Electronic Equipment with the Use of the Discrete Models of Interference and Fast Fourier Transform. *IX Int. Wroclaw Symp. on EMC*. 565–570.

- Mordachev V. I., Sinkevich E. V. (2008) “EMC-Analyzer” Expert System: Improvement of IEMCAP Models. *19th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Wroclaw, 11–13 June*. 423–428.
- Mordachev V. I. (2000) Automated Double-Frequency Testing Technique for Mapping Receiver Interference Responses. *IEEE Trans. on EMC*. 42 (2), 213–225.
- Sinkevich E. V. (2015) Composite Model of Radio-Frequency Path Nonlinearity for Discrete Analysis of Electromagnetic Compatibility. *Doklady BGUIR*. (3), 36–42 (in Russian).
- Sinkevich E. (2020) Worst Case Model for Fast Analysis of Intermodulation Interference in Radio Receiver. *Int. Virtual Conf. “EMC Europe 2020”*. Rome, Italy.

Поступила 15.11.2024
Received: 15 November 2024

Принята в печать 28.01.2025
Accepted: 28 January 2025

Вклад авторов

Синькевич Е. В. выполнил обоснование и экспериментальную проверку методик испытаний и синтеза моделей нелинейности смесителей, принял участие в обсуждении результатов и подготовке рукописи статьи.

Мордачев В. И. выполнил постановку задачи, участвовал в обсуждении методик измерений и синтеза и полученных результатов исследований, в подготовке рукописи статьи.

Фаю Ван принял участие в обсуждении методик измерений и синтеза, а также полученных результатов.

Ционенко Д. А. осуществил проверку и оформление результатов синтеза полиномиальных моделей нелинейности смесителей.

Шакинко И. В. выполнил синтез полиномиальных моделей по разработанной методике.

Authors' contribution

Sinkevich E. V. carried out the substantiation and experimental verification of the methods of testing and synthesizing models of nonlinearity of mixers, took part in the discussion of the results and preparation of the manuscript of the article.

Mordachev V. I. stated the research problem, participated in the discussion of measurement and synthesis techniques and obtained results, in preparation of the manuscript of the article.

Fayu Wan participated in the discussion of measurement and synthesis techniques as well as the results obtained.

Tsyankenka D. A. completed the verification and registration of the results of the synthesis of polynomial models of mixer nonlinearity.

Shakinka I. V. performed the synthesis of polynomial models using the developed methodology.

Сведения об авторах

Синькевич Е. В., зам. зав. науч.-исслед. лаб. «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (Лаб. 1.7), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Мордачев В. И., канд. техн. наук, доц., зав. Лаб. 1.7, БГУИР

Фаю Ван, д-р филос., проф., Нанкинский университет информационных наук и технологий

Ционенко Д. А., канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр. Лаб. 1.7, БГУИР

Шакинко И. В., науч. сотр. Лаб. 1.7, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-94
E-mail: esinkevich@bsuir.by
Синькевич Евгений Васильевич

Information about the authors

Sinkevich E. V., Deputy Head of the R&D Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment” (Lab 1.7), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Mordachev V. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Lab 1.7, BSUIR

Fayu Wan, Ph.D, Professor, Nanjing University of Information Science and Technology

Tsyankenka D. A., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Senior Researcher at the Lab 1.7, BSUIR

Shakinka I. V., Researcher at the Lab 1.7, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-94
E-mail: esinkevich@bsuir.by
Sinkevich Eugene Vasil'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-61-69>

УДК 621.311.243

ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТОЙЧИВОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

К. С. ДИК¹, И. В. ГАСЕНКОВА²

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

²Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрено применение двухдиодной физико-математической модели при анализе телеметрических данных функционирования солнечных панелей с использованием цифровых двойников для контроля эффективности работы солнечных электростанций. Такой подход позволил заменить временные данные функционирования каждой солнечной панели в течение месяца данными из семи выходных электрофизических параметров. Благодаря этому упростилась обработка данных: одна солнечная панель – один набор параметров в месяц. Анализ телеметрических данных с применением цифровых двойников позволяет использовать их для расчета нормализованных значений выходной электрической мощности в точке максимальной выработки электроэнергии для всех солнечных панелей и по результатам находить аномалии в их работе. На примере солнечной электростанции из 272 панелей показана возможность эффективного определения аномально работающих солнечных панелей.

Ключевые слова: солнечная панель, двухдиодная физико-математическая модель, цифровой двойник, нормализованное значение мощности, эффективность работы солнечной электростанции.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дик, С. К. Характеристики устойчивости солнечных батарей в условиях эксплуатации / С. К. Дик, И. В. Гасенкова // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 61–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-61-69>.

CHARACTERISTICS OF SOLAR PANEL STABILITY UNDER OPERATING CONDITIONS

KANSTANTIN S. DZIK¹, IRINA V. GASENKOVA²

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

²State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers the application of a two-diode physical and mathematical model in the analysis of telemetry data of solar panels using digital twins to monitor the efficiency of solar power plants. This approach made it possible to replace the temporary data of each solar panel's operation during a month with data from seven output electrophysical parameters. This simplified data processing: one solar panel – one set of parameters per month. Analysis of telemetry data using digital twins allows using them to calculate normalized values of the output electric power at the point of maximum electricity generation for all solar panels and, based on the results, to find anomalies in their operation. Using the example of a solar power plant consisting of 272 panels, the possibility of effectively identifying abnormally operating solar panels is shown.

Keywords: solar panel, two-diode physical and mathematical model, digital twin, normalized power value, solar power plant efficiency.

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

For citation. Dzik K. S., Gasenkova I. V. (2025) Characteristics of Solar Panel Stability Under Operating Conditions. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 61–69. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-61-69> (in Russian).

Введение

Установленная мощность мировой солнечной фотоэнергетики в 2023 г. достигла 1,2 ТВт, что значительно превышает показатели предыдущих лет. Согласно прогнозам Международного энергетического агентства, к 2027-му она может увеличиться до 2,3 ТВт. Доля солнечной энергетики в мировом спросе на электроэнергию составляет 4,5 % и продолжает увеличиваться [1]. Это демонстрирует стремительное развитие отрасли.

Более 90 % современных солнечных фотоэлектрических панелей по-прежнему производятся с использованием кристаллических кремниевых элементов. Эта технология остается доминирующей благодаря своей надежности и относительно низкой стоимости. Производственные мощности по выпуску кремния в 2023 г. оценивались в 1,5–1,7 млн т, причем около 50 000 т использовалось электронной промышленностью. Средние затраты кремния при производстве солнечной энергии снизились до 3,2 г/Вт благодаря улучшению и оптимизации технологических процессов [2].

За период с 2010 по 2023 год средняя стоимость солнечной энергии значительно снизилась: с 0,36 долл. США за 1 кВт·ч в 2010-м до 0,049 долл. США за 1 кВт·ч в 2023-м. Для сравнения: стоимость электроэнергии, вырабатываемой тепловыми и атомными электростанциями, составляет в среднем 0,05–0,07 долл. за 1 кВт·ч. Снижение стоимости солнечной энергии на 90 % за последнее десятилетие стало возможным благодаря технологическим инновациям и масштабированию производства. Стоимость солнечных модулей за этот период уменьшилась на 80 %, что сделало солнечную энергетику одной из самых конкурентоспособных отраслей в энергетическом секторе [1].

Повышение эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую играет ключевую роль как в технологических процессах производства солнечных панелей, так и в их практическом использовании. В связи с этим разработка методов оценки и улучшения эффективности работы солнечных элементов становится важной задачей. Актуальность задачи по поиску аномалий в работе солнечных панелей обусловлена необходимостью обеспечения максимальной эффективности использования солнечной электростанции, которая зависит от своевременного обнаружения неисправностей в ее работе. Множество программных и аппаратных инструментов при мониторинге критически важных параметров функционирования солнечной панели представляет собой комбинации классических способов поиска аномалий в массивах информации. Однако при этом не учитывается ряд отрицательных факторов, влияющих на работу панели, в том числе на долговременную ее стабильность при сохранении условий эксплуатации.

Современная элементная база солнечной энергетики

Современную элементную базу солнечной энергетики можно разделить на четыре технологические группы.

Группа 1. Кремниевые фотоэлементы (рис. 1) делятся на два основных типа: монокристаллические (mono-Si) и поликристаллические (poly-Si). Монокристаллические модули обладают большей эффективностью (до 22–24 %), но их производство дороже. Поликристаллические модули дешевле, однако они менее эффективны (15–18 %) [3, 4].

Группа 2. Каскадные фотоэлементы на основе соединений III и V групп периодической системы. Такие преобразователи солнечной энергии в электрическую могут состоять из каскадов в количестве от одного до пяти и формироваться как путем эпитаксиального выращивания многослойной монокристаллической структуры, так и механической стыковкой отдельных элементов. Эффективность солнечных панелей, созданных на основе каскадных фотоэлементов, варьируется от 27,5 до 46,0 % и зависит от количества каскадов и конечной конструкции [5–9].

Группа 3. Тонкопленочные фотоэлементы. В основе фотоэлектрических элементов этой группы лежат структуры на базе пленок CIGS (медь-индий-галлий-селенид) и теллурида кадмия (CdTe). Эффективность солнечных панелей, созданных по тонкопленочной технологии, – от 14,0 до 23,3 % [10–12].

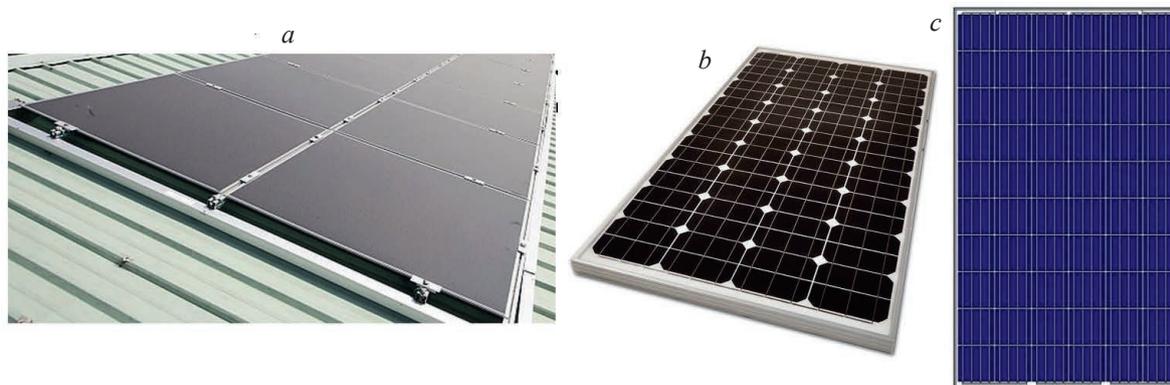


Рис. 1. Виды конструкций солнечных панелей из кремния:

a – аморфного; *b* – монокристаллического; *c* – микроморфного

Fig. 1. Types of solar panel designs made of silicon: *a* – amorphous; *b* – monocrystalline; *c* – micromorphous

Группа 4. В этой группе фотоэлементы созданы на основе пленок из таких материалов, как перовскиты, органические материалы, сенсibilизированные красители, тандемные органические структуры и нанокристаллы (квантовые точки). Эти фотоэлементы относят к числу инновационных, поскольку некоторые из них сегодня являются лабораторными прототипами либо существуют в виде экспериментальных моделей. Достаточно высокие характеристики могут обеспечить солнечные элементы на основе перовскитов [13, 14]. Максимальное значение зафиксированной эффективности для перовскитового фотоэлемента – 22,7 % (2017 г.).

Одним из ключевых направлений развития солнечной энергетики является повышение эффективности фотоэлементов. Поэтому ученые различных стран сосредоточены на исследованиях в области тандемных солнечных элементов: комбинация кремния и перовскита позволяет достичь эффективности более 30 % [15, 16]. Также продолжается совершенствование многослойных и каскадных структур: использование нескольких слоев с разной шириной запрещенной зоны позволяет охватывать более широкий спектр солнечного света. Кроме того, перспективное направление развития отрасли – органические фотоэлементы: легкие и гибкие, они могут использоваться в портативных устройствах и интегрированных системах. Однако их эффективность преобразования пока не превышает 15 % и зависит от формы поверхности солнечных панелей (рис. 2).

Следует отметить, что солнечная энергетика сталкивается с критикой из-за использования токсичных материалов (например, кадмия в CdTe) и высокого энергопотребления при производстве кремния. В ответ на это разрабатываются перерабатываемые модули и программы утилизации солнечных панелей, осуществляется зеленое производство с использованием возобновляемых источников энергии для изготовления солнечных модулей.



Рис. 2. Гибкая солнечная панель [17]

Fig. 2. Flexible solar panel [17]

Проблемы обеспечения стабильности работы солнечных панелей

Важное значение имеет повышение эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую как на уровне технологических процессов изготовления солнечных панелей, так и при их эксплуатации. Оценка и повышение эффективности эксплуатации солнечных панелей обеспечиваются постоянным сбором данных телеметрии (электрофизических характеристик – силы тока, напряжения, температуры, плотности потока солнечной энергии) о работе солнечных элементов, которая основывается на применении измерительных устройств и приборов сбора и передачи информации. Функциональная схема сбора телеметрии с одной солнечной панели, демонстрирующая ее основные компоненты и процесс работы (начиная от сбора энергии и заканчивая передачей данных и преобразованием энергии), приведена на рис. 3.

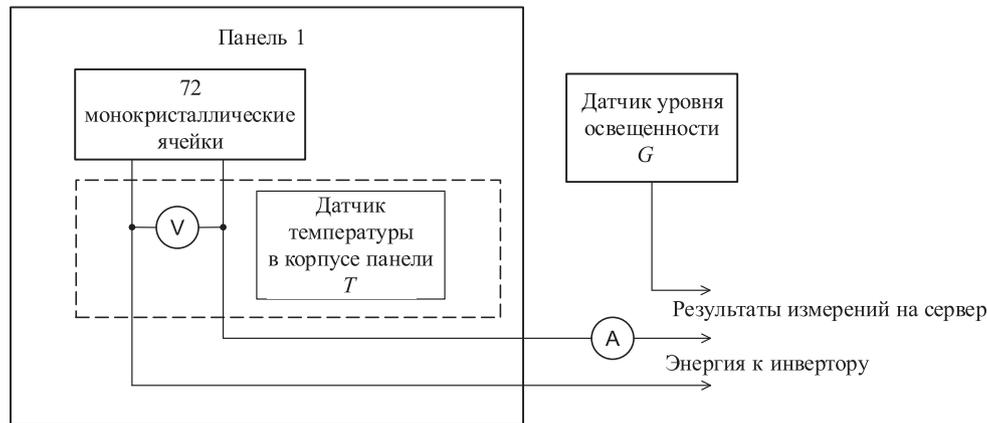


Рис. 3. Функциональная схема для сбора телеметрии с одной солнечной панели
Fig. 3. Functional diagram for collecting telemetry from a single solar panel

В комплект измерительных устройств для сбора результатов телеметрии с солнечной панели, состоящей из 72 монокристаллических ячеек, входят: вольтметр V и датчик температуры T , подключаемые к силовой линии для измерения напряжения и передачи информации о результатах измерения; датчик уровня освещенности G , общий для всей электростанции, который измеряет интенсивность света; амперметр A для измерения силы тока, генерируемой солнечной панелью. Измеренные данные с заданной периодичностью передаются на сервер для их анализа и мониторинга.

Результаты исследований и их обсуждение

Поскольку солнечные панели при подключении к инвертору представляют собой цепочку последовательно включенных панелей, для сбора результатов телеметрии собирается функциональная схема, изображенная на рис. 4.

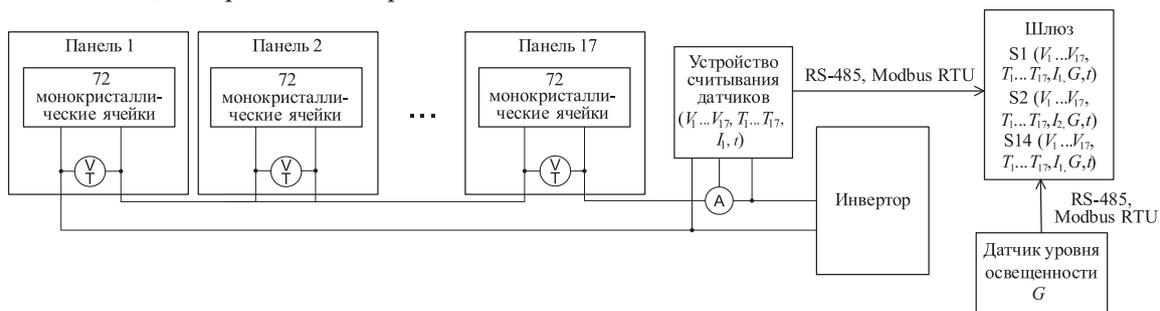


Рис. 4. Функциональная схема для сбора телеметрии с солнечных панелей электростанции
Fig. 4. Functional diagram for collecting telemetry from solar panels of a power plant

Для электростанции, состоящей из 272 солнечных панелей M190 (STORM Energy GmbH, Германия), состав устройств и объем собираемой телеметрии будут выглядеть следующим образом. Собираемые параметры: напряжение V и температура T в каждой солнечной панели, сила тока I в цепочке панелей, уровень энергетической экспозиции G (уровень освещенности). Интервал

сбора результатов измерений – 15 мин с фиксацией даты и времени t . Приборы и измерительные устройства: датчик в солнечной панели производства SunSniffer GmbH & Co (Германия); датчик уровня энергетической экспозиции Irradiance Sensor Si-13TC (Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer GmbH, Германия); шлюз производства SunSniffer GmbH & Co, записывающий все результаты телеметрии в базу данных на сервер; устройство сбора данных (SunSniffer GmbH & Co) и силы тока с цепочки семнадцати последовательно включенных панелей. В эксперименте использовались результаты телеметрии, собранные в течение семи месяцев работы солнечной электростанции – с мая по ноябрь 2020 г.

Платформа цифрового двойника, применяемого в исследованиях, была основана на двухдиодной модели фотоэлектрической ячейки солнечной панели, приведенной в [18]. Электрическая схема такой модели изображена на рис. 5. Результатом работы цифрового двойника являлись следующие параметры, определенные в смоделированных стандартных условиях испытаний для каждой солнечной панели электростанции: выходная электрическая мощность P_N в точке максимальной выработки электроэнергии (Maximum Power Point, MPP), электрические напряжение и сила тока в MPP, последовательное и параллельное электрические сопротивления, электрический ток короткого замыкания и напряжение холостого хода.

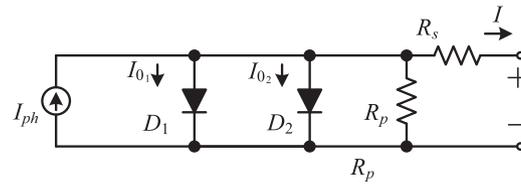


Рис. 5. Электрическая схема двухдиодной модели фотоэлектрической ячейки солнечной панели:

I_{01}, I_{02} – обратный ток насыщения диодов D_1 и D_2 соответственно, А; I_{ph} – фототок, А;
 R_p, R_s – шунтирующее и последовательное сопротивления, Ом; I – сила тока в солнечной панели, А

Fig. 5. Electrical diagram of a two-diode model of a solar panel photovoltaic cell:

I_{01}, I_{02} – reverse saturation current of diodes D_1 and D_2 respectively, А; I_{ph} – photocurrent, А;
 R_p, R_s – shunt and series resistance, Ohm; I – current in the solar panel, А

Для построения цифрового двойника использовались соответствующие уравнения [18] зависимости электрического напряжения V в солнечной панели, I_{ph} и термоЭДС v_T (для каждого диода в отдельности) от уровня солнечной радиации G и от I_{01}, I_{02} :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{n_{s1}v_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{n_{s2}v_T}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p}, \quad (1)$$

где $v_T = \frac{v_{T1}v_{T2}}{v_{T1} - v_{T2}}$; $v_{T1(2)} = n_{s1(2)}kT/q$; $I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} \left((I_{sc})_{T_1} + K_0(T - T_1) \right)$; $(I_0)_{T_1} = \left(\frac{(I_{sc})_{T_1}}{e^{\frac{q(V_{oc})_{T_1}}{nkT_1}} - 1} \right)$;

$$I_0 = I_{01} = I_{02} = (I_0)_{T_1} \left(\frac{T}{T_1} \right)^3 e^{\frac{q(E_g)_{T_1}}{nk} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right)}.$$

На основе результатов работы цифрового двойника были разработаны две методики для анализа данных телеметрии и поиска аномалий в работе кремниевых солнечных панелей. Нормализованные значения выходной электрической мощности P_N в MPP для всех солнечных панелей рассчитывались по формуле

$$P_N = \frac{P_{MPP} - P_m}{P_m} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где P_{MPP} – выходная мощность в точке MPP, Вт; P_m – глобальная медианная мощность, Вт

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_S}{n};$$

P_S – медианная мощность отдельной цепочки последовательно подключенных солнечных панелей, Вт; n – количество цепочек в электростанции; i – номер цепочки солнечных панелей.

Дисперсия выборки данных S рассчитывалась как для уровня цепочки, так и для панельного уровня

$$S^2 = \frac{\sum (X - M)^2}{N - 1}. \quad (3)$$

где X – значение в баллах; M – среднее значение выборки; N – количество баллов.

Результаты расчета P_N каждой из солнечных панелей группировались различным образом для анализа панели одного инвертора, панели одной электростанции, группировки панелей по медианным значениям и центру масс, одноточечного и линейного значений за исследуемый период. Последовательность группировки позволила начать поиск выбросов на уровне всей электростанции, а затем на каждом этапе группирования постепенно сужать область анализа для выявления локальных проблем с отдельными солнечными элементами и панелями. При этом результаты расчета нормализованных значений P_N в MPP для всех солнечных панелей в предыдущем месяце сравнивали с аналогичными результатами для текущего месяца. Если отличия в значениях P_N для конкретной солнечной панели (цепочки панелей) составляли величину, больше определенного порогового значения, то в ее работе отмечалось наличие аномалий. Поиск локальных проблем осуществлялся на двух уровнях – в цепочке панелей и в единичных солнечных панелях. В качестве пороговых использовались значения отклонений 5 и 10 %. Такая методика помогает выявить динамические (месяц к месяцу) изменения, которые могут быть пропущены при применении других методик анализа, не учитывающих изменения параметров от месяца к месяцу (табл. 1).

Таблица 1. Результаты применения методики поиска аномалий со значениями отклонений 10 % в единичных солнечных панелях

Table 1. Results of application of the method of searching for anomalies with deviation values of 10 % in single solar panels

Количество аномалий	Номер солнечной панели	От месяца – к месяцу	Отклонение P_N , %
16	Module 1.1.2	Июнь_2020 – июль_2020	-11,60
	Module 1.1.3	Июнь_2020 – июль_2020	-10,80
	Module 1.1.4	Июнь_2020 – июль_2020	-13,20
		Июль_2020 – август_2020	-11,80
	Module 1.1.13	Июнь_2020 – июль_2020	-9,10
	Module 1.1.14	Июнь_2020 – июль_2020	-8,10
	Module 1.4.9	Август_2020 – сентябрь_2020	-11,50
	Module 1.4.13	Август_2020 – сентябрь_2020	-11,40
	Module 1.4.17	Август_2019 – сентябрь_2020	-11,30
	Module 1.5.6	Октябрь_2020 – ноябрь_2020	-11,40
	Module 1.5.14	Сентябрь_2020 – октябрь_2020	-9,10
	Module 1.6.9	Август_2020 – сентябрь_2020	-8,90
	Module 1.7.8	Сентябрь_2020 – октябрь_2020	-11,80
	Module 1.8.15	Июнь_2020 – июль_2020	-9,90
	Module 1.10.7	Июль_2020 – август_2020	-10,10
	Module 1.11.15	Октябрь_2020 – ноябрь_2020	-48,50

На рис. 6 показан уровень генерируемой солнечными панелями в цепочках с номерами Chain 1.4 (рис. 6, *a*) и Chain 2.3 (рис. 6, *b*) энергии, рассчитанной с использованием цифрового двойника за период наблюдения (с мая по ноябрь 2020 г.). Полученные уровни энергии отличаются от аналогичных, описанных в [19] для 2019 г.

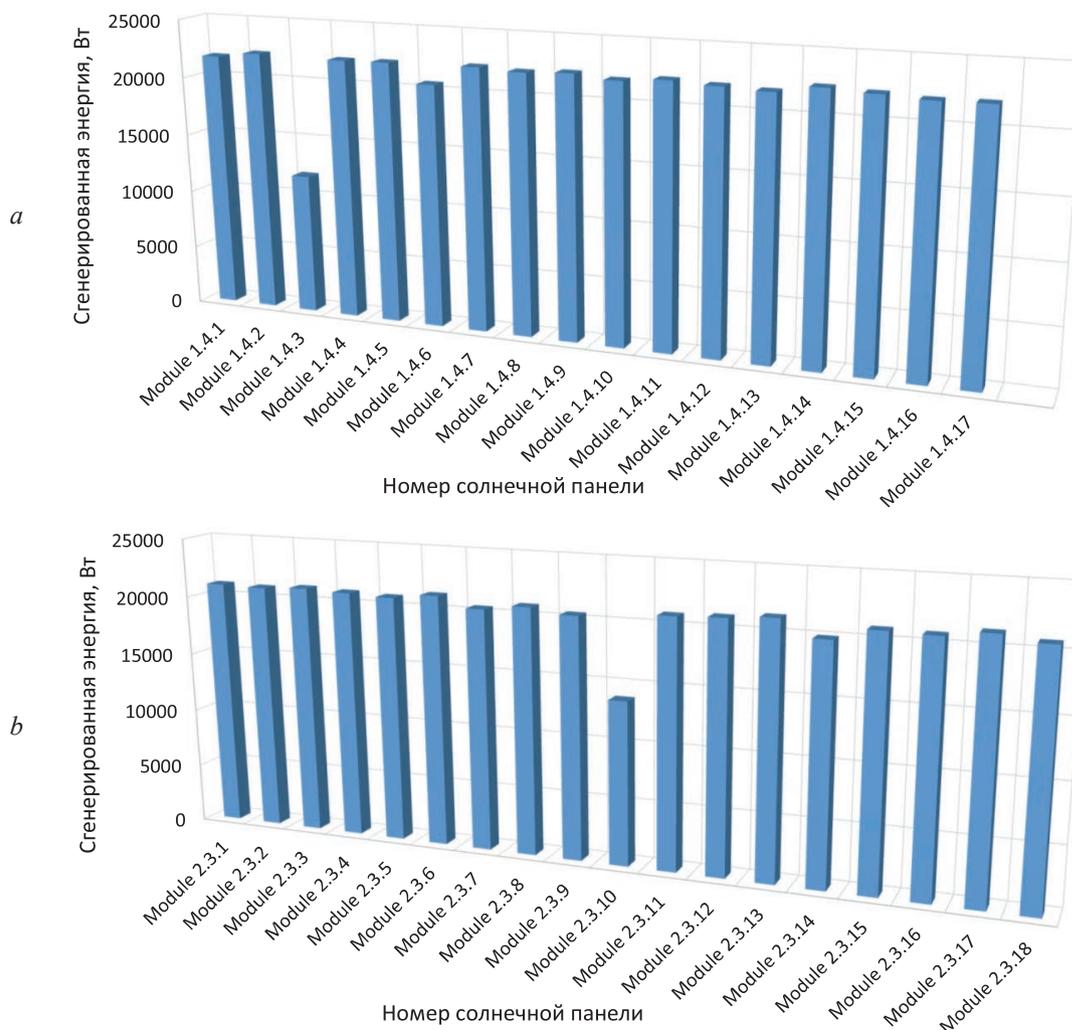


Рис. 6. Уровень генерируемой энергии цепочками солнечных панелей с номерами: *a* – Chain 1.4; *b* – Chain 2.3
Fig. 6. The level of energy generated by solar panels in a chains with a numbers: *a* – Chain 1.4; *b* – Chain 2.3

Заключение

1. Разработана концепция анализа телеметрических данных на солнечных электростанциях с использованием цифровых двойников солнечных панелей. Цифровой двойник строился на двухдиодной физико-математической модели с учетом контролируемых выходных электрофизических параметров отдельных солнечных панелей. Такой подход позволил заменять временные данные функционирования каждой солнечной панели в течение месяца данными из семи выходных электрофизических параметров. То есть обработка данных упростилась: одна солнечная панель – один набор параметров в месяц. По результатам расчета нормализованных значений выходной электрической мощности в точке максимальной выработки электроэнергии для всех солнечных панелей можно определить аномалии в их работе.

2. Установлено, что неэффективно работающая отдельная солнечная панель уменьшает выходную мощность совокупности последовательно включенных панелей примерно на 2,0 %. Это снижает эффективность работы группы других панелей, подключенных к инвертору параллельно с солнечной панелью.

3. Предложенная двухдиодная физико-математическая модель для анализа телеметрических данных солнечных панелей может найти применение в автоматизации систем мониторинга эффективности функционирования солнечных электростанций. Рассмотренные методики мониторинга могут быть применены для контроля качества солнечных панелей при их производстве и для проверки функционирования таких панелей как источников электропитания космических аппаратов и станций.

Список литературы

1. World Energy Outlook 2024 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Date of access: 24.05.2024.
2. New Energy Outlook [Electronic Resource]. Mode of access: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#exec-summary>. Date of access: 24.05.2024.
3. Wikimedia Commons. File: Best Research-Cell Efficiencies.png [Electronic Resource]. Mode of access: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png. Date of access: 20.02.2018.
4. Outdoor Performance Modeling of Three Different Silicon Photovoltaic Module Technologies / A. Meflah [et al.] // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 8, No 143.
5. Nguyen, X. H. Mathematical Modeling of Photovoltaic Cell/module/arrays with Tags in Matlab/Simulink / X. H. Nguyen, M. P. Nguyen // *Environmental Systems Research*. 2015. Vol. 4, No 24. P. 24–32.
6. III–V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics / H. Cotal [et al.] // *Energy & Environmental Science*. 2009. Vol. 2, No 2. P. 174–192.
7. High Efficiency III–V Solar Cells / K. W. J. Barnham [et al.] // *International School on Crystal Growing of Materials for Energy Production and Energy-Saving Applications: Conf. Proc.* 2001.
8. Solar Cell for NASA RAINBOW Concentrator / M. A. Smith [et al.] // *Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference: Proceed. of the Conf.* 2000. P. 1139–1151.
9. Fan, J. C. C. Thin-Film GaAs Solar Cells / J. C. C. Fan, C. O. Bozler, R. W. McClelland // *15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Kissimmee, Florida, May 12–15, 1981: Conf. Record. New York, 1981. P. 375–377.*
10. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / В. А. Меличко [и др.] // *Успехи физических наук*. 2016. № 186. С. 801–852.
11. Features of KF and NaF Postdeposition Treatments of Cu(In,Ga)Se₂ Absorbers for High Efficiency Thin Film Solar Cells / P. Reinhard [et al.] // *Chemistry of Materials*. 2015. Vol. 27, Iss. 16. P. 5755–5764.
12. Bonnet, D. Cadmium-Telluride – Material for Thin Film Solar Cells / D. Bonnet, P. Meyers // *Journal of Materials Research*. 1998. Vol. 13. P. 2740–2753.
13. Integrated Perovskite/Bulk-Heterojunction Toward Efficient Solar Cells / Y. Liu [et al.] // *Nano Letters*. 2015. Vol. 15, Iss. 1. P. 662–668. <https://doi.org/10.1021/nl504168q>.
14. Snaith, H. J. Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells / H. J. Snaith // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2013. Vol. 4, Iss. 21. P. 3623–3630.
15. Synergetic Substrate and Additive Engineering for Over 30%-Efficient Perovskite-Si Tandem Solar Cells / D. Turkyay [et al.] // *Joule*. 2024. Vol. 8, No 6. P. 1735–1753.
16. Detection of Typical Defects in Silicon Photovoltaic Modules and Application for Plants with Distributed MPPT Configuration / J. Ahmad [et al.] // *Energies*. 2019. Vol. 12, No 23. P. 4547–4573.
17. Methods for Modelling and Analysis of Bendable Photovoltaic Modules on Irregularly Curved Surfaces / A. Groenewolt [et al.] // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2016. No 7. P. 261–271.
18. Информационное обеспечение мониторинга технического состояния солнечных электростанций / С. В. Валевич [и др.] // *Информационные технологии*. 2020. Т. 26, № 10. С. 594–601. DOI: 10.17587/it.26.594-601.
19. Дик, К. С. Методика поиска дефектных солнечных панелей в данных телеметрии электростанции на основе результатов работы цифрового двойника / К. С. Дик // *Доклады БГУИР*. 2023. Т. 21, № 6. С. 113–120. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-113-120>.

Поступила 21.02.2025

Принята в печать 24.03.2025

References

1. *World Energy Outlook 2024*. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> (Accessed 24 May 2024).
2. *New Energy Outlook 2024*. Available: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#exec-summary> (Accessed 24 May 2024).
3. *Wikimedia Commons. File: Best Research-Cell Efficiencies.png*. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png (Accessed 20 February 2018).
4. Meflah, A., Rahmoun K., Mahrane A., Chikh M. (2017) Outdoor Performance Modeling of Three Different Silicon Photovoltaic Module Technologies. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 8, 143–152.
5. Nguyen X. H., Nguyen M. P. (2015) Mathematical Modeling of Photovoltaic Cell/module/arrays with Tags in Matlab/Simulink. *Environmental Systems Research*. 4 (24), 24–32.
6. Cotal H., Fetzer C., Boisvert J., Kinsey G., King R., Hebert P., et al. (2009) III–V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics. *Energy & Environmental Science*. 2 (2), 174–192.
7. Barnham K. W. J., Bushnell D. B., Connolly J. P., Ekins-Daukes N. J., Klufftinger B. G., Mazzer M., et al. (2001) High Efficiency III–V Solar Cells. *International School on Crystal Growing of Materials for Energy Production and Energy-Saving Applications, Conference Proceedings*.

8. Smith M. A., Sinharoy S., Weizer V. G., Khan O., Pal A.-M., Clark E. B., et al. (2000) Solar Cell for NASA RAINBOW Concentrator. *Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Proceedings of the Conference*. 1139–1151.
9. Fan J. C. C., Bozler C. O., McClelland R. W. (1981) Thin-Film GaAs Solar Cells. *15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Kissimmee, Florida, May 12–15, 1981, Conference Record*. New York. 375–377.
10. Milichko V. A., Shalin A. S., Mukhin I. S., Kovrov A. E., Krasilin A. A., Vinogradov A. V., et al. (2016) Solar Photovoltaics: Current State and Trends. *Physics–Uspekhi*. (186), 801–852 (in Russian).
11. Reinhard P., Bissig B., Pianezzi F., Avancini E., Hagendorfer H., Keller D., et al. (2015) Features of KF and NaF Postdeposition Treatments of Cu(In,Ga)Se₂ Absorbers for High Efficiency Thin Film Solar Cells. *Chemistry of Materials*. 27 (16), 5755–5764.
12. Bonnet D., Meyers P. (1998) Cadmium-Telluride – Material for Thin Film Solar Cells. *Journal of Materials Research*. 13, 2740–2753.
13. Liu Y., Hong Z., Chen Qi, Chang W., Zhou H., Song T.-B., et al. (2015) Integrated Perovskite/Bulk-Heterojunction Toward Efficient Solar Cells. *Nano Letters*. 15 (1), 662–668. <https://doi.org/10.1021/nl504168q>.
14. Snaith H. J. (2013) Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 4 (21), 3623–3630.
15. Turkay D., Artuk K., Chin X.-Yu, Jacobs D., Moon S.-J., Walter A., et al. (2024) Synergetic Substrate and Additive Engineering for Over 30%-Efficient Perovskite-Si Tandem Solar Cells. *Joule*. 8 (6), 1735–1753.
16. Ahmad J., Ciocia A., Fichera S., Murtaza A. F., Spertino F. (2019) Detection of Typical Defects in Silicon Photovoltaic Modules and Application for Plants with Distributed MPPT Configuration. *Energies*. 12 (23), 4547–4573.
17. Groenew A., Bakker J., Hofer J., Nagy Z., Schlüter A. (2016) Methods for Modelling and Analysis of Bendable Photovoltaic Modules on Irregularly Curved Surfaces. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 7, 261–271.
18. Valevich S. V., Osipovich V. S., Kruse I., Asimov R. M. (2020) Information Support for Monitoring of Solar Power Station’s Technical State. *Information Technologies*. 26 (10), 594–601. DOI: 10.17587/it.26.594-601 (in Russian).
19. Dzik K. S. (2023) A Method for Searching for Defective Solar Panels in Telemetry Data of a Power Plant Based on the Results of a Digital Twin. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 113–120. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-113-120> (in Russian).

Received: 21 February 2025

Accepted: 24 March 2025

Вклад авторов / Authors’ contribution

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

Сведения об авторах

Дик К. С., асп. каф. информатики, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

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

Адрес для корреспонденции

220018, Республика Беларусь,
Минск, ул. Якубовского, 15/1, кв. 358
Тел.: +375 29 625-10-56
E-mail: kanstantind@gmail.com
Дик Константин Сергеевич

Information about the authors

Dzik K. S., Postgraduate at the Department of Informatics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

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

Address for correspondence

220018, Republic of Belarus,
Minsk, Yakubovskogo St., 15-1-358
Tel.: +375 29 625-10-56
E-mail: kanstantind@gmail.com
Dzik Kanstantin Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-70-76>

UDC 681.586, 004.942

PROACTIVE MULTISENSORY SOLUTION FOR MITIGATING THERMAL RUNAWAY RISKS IN LI-ION BATTERIES

ULADZIMIR S. FIADOSENKA¹, LINXI DONG², CHENXI YUE², GENNADY G. GOROKH¹

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

²*Hangzhou Dianzi University (Hangzhou, People's Republic of China)*

Abstract. The paper presents the concept and modeling results of a multisensor system designed to prevent thermal runaway in lithium-ion batteries. This is especially true for LCO, NMC and NCO batteries. The system integrates three types of sensors: a capacitive pressure sensor, a gas sensor based on a metal oxide semiconductor, and a platinum temperature sensor. Moreover, all sensors are located on a single chip, which ensures increased reliability and safety, minimizing the risks of fire, explosion, or damage to batteries. Three battery operating modes are proposed: normal, hazardous, and critical. In the normal mode, the temperature and gas concentration remain at safe levels, while in the hazardous mode, they begin to increase, indicating the possible onset of destructive reactions. In the critical mode, the battery reaches hazardous levels, which can lead to damage, fire, or explosion. The multisensor system was modeled using the COMSOL Multiphysics 6.1 package using the finite element method. This approach helps to improve the safety of lithium-ion batteries by solving the problems of monitoring their condition. The scalability of the system makes it suitable for applications in both portable electronics and electric vehicles.

Keywords: simulation, thermal runaway, lithium-ion batteries, multisensory system, gas sensor, pressure sensor, temperature sensor.

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

For citation. Fiadosenka U. S., Linxi Dong, Chenxi Yue, Gorokh G. G. (2025) Proactive Multisensory Solution for Mitigating Thermal Runaway Risks in Li-Ion Batteries. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 70–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-70-76>.

ПРОАКТИВНОЕ МУЛЬТИСЕНСОРНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РИСКА ПЕРЕГРЕВА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

В. С. ФЕДОСЕНКО¹, ЛИНКСИ ДОНГ², ЦЕНКСИ ЮЭ², Г. Г. ГОРОХ¹

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

²*Университет Ханчжоу Дианзи (Ханчжоу, Китайская Народная Республика)*

Аннотация. В статье представлены концепция и результаты моделирования мультисенсорной системы, разработанной для предотвращения теплового разгона в литий-ионных аккумуляторах. Особенно это актуально для батарей LCO, NMC и NCO. Система интегрирует три типа датчиков: емкостной датчик давления, газовый датчик на основе металлооксидного полупроводника и платиновый датчик температуры. При этом все датчики располагаются на одном чипе, что обеспечивает повышенную надежность и безопасность, минимизируя риски возгорания, взрыва или повреждения аккумуляторов. Предложены три режима работы аккумулятора: нормальный, опасный и критический. В нормальном режиме температура и концентрация газа остаются на безопасных уровнях, в опасном они начинают повышаться, что указывает на возможное начало разрушительных реакций. В критическом режиме аккумулятор достигает опасных уровней – это может привести к повреждению, возгоранию или взрыву. Мультисенсорную систему моделировали с использованием пакета COMSOL Multiphysics 6.1 с применением метода конечных элементов. Этот подход способствует повышению безопасности литий-ионных аккумуляторов, решая проблемы контроля за их состоянием. Масштабируемость системы делает ее подходящей для применения как в портативной электронике, так и для электрических транспортных средств.

Ключевые слова: моделирование, тепловой разгон, литий-ионные аккумуляторы, мультисенсорная система, газовый сенсор, датчик давления, датчик температуры.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Проактивное мультисенсорное решение для снижения риска перегрева литий-ионных аккумуляторов / В. С. Федосенко [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 70–76. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-70-76>.

Introduction

Lithium-ion batteries (Li-ion or LIBs) have become a ubiquitous power source in various electronic devices due to their high energy density and long service life. However, the occurrence of overheating in these batteries poses a significant safety threat, as it can lead to catastrophic failures such as fires and explosions. The process in which the temperature of the battery increases rapidly, which leads to a chain reaction of increased heat generation, is called thermal runaway (TR). Over the past decade, the issue of TR in LIBs has garnered significant attention from both manufacturers and consumers. The processes occurring in a lithium-ion battery that lead to TR are conventionally divided into 12 stages [1]. They include dissolution of metal ions, decomposition of the SEI (Solid Electrolyte Interphase) film, reaction between lithium and electrolyte, melting of the separator, and combustion of the electrolyte. These stages are accompanied by significant changes in temperature and voltage, illustrating the complex and dangerous progression of TR.

To protect lithium-ion batteries, a Battery Management System (BMS) is used, but such protection is not always effective. Periodic fire incidents, in portable devices and electric vehicles, demonstrate that modern BMS systems sometimes fail to provide long-term protection, highlighting the urgent need for effective solutions to address this issue. For instance, the authors in [2] demonstrated that the thermocouples employed in BMS for temperature monitoring detect a malfunction only after at least one cell has already entered a state of TR, which can lead to irreversible processes.

It is well known that an increase in temperature within a battery leads to gas release, which in turn causes an increase in internal pressure [3]. To prevent TR in a lithium-ion battery by detecting its onset at early stages, we propose a design of a multi-sensor system consisting of a gas, temperature and pressure sensor. This paper presents the results of modeling such a multi-sensor system, which can become an effective early warning option for a dangerous terminal runaway.

Design of multisensory microsystem

Gas sensor constructions

At temperatures between 70 and 120 °C in a lithium-ion battery, the electrolyte begins to evaporate, and the salt inside starts to decompose. This decomposition triggers chemical reactions between the decomposed salt and either the solvent or the SEI. These reactions result in the accumulation of gases within the battery, causing the internal pressure to rise. As the pressure increases, the battery undergoes an initial venting process, which serves as a safety mechanism to release the excess pressure. However, if the temperature continues to rise after venting, it can lead to TR, where the chemical reactions inside the battery become uncontrollable. Among all the gases released within a lithium-ion battery cell, hydrogen has been identified by researchers as the most effective early warning sign for ensuring the safety of LIBs [4]. The concentration of hydrogen gas released during the first venting event can range from zero to approximately 1000 ppm [5].

LIBs are highly sensitive to temperature variations; therefore, it is imperative for the gas sensor to function without a heater. For the multisensory system, a metal oxide gas sensor was selected due to several advantages, including high sensitivity, rapid response time, and cost-effectiveness. Although hydrogen is the target gas, it is worth noting that metal oxide gas sensors typically lack high selectivity. However, in this case, this lack of high selectivity is advantageous because the sensor will promptly react to a range of gases that could arise during a TR event, with hydrogen being the main target.

A multi-sensor system consisting of a gas, temperature and pressure sensor was made on an anodic alumina (AA) substrate with overall dimensions of 4.00×4.00×0.43 mm³ (Fig. 1). Interdigitated electrodes of gas sensor, consisting of three pairs of electrodes 100 μm long, 30 μm wide and with a gap of 15 μm between them. Gas-sensitive layer of ZnO–GaO with a thickness of 1 μm is located on top

of the electrodes. The use of AA in modern sensors allows significant reduction in the energy consumption of thin film chemical sensors [5].

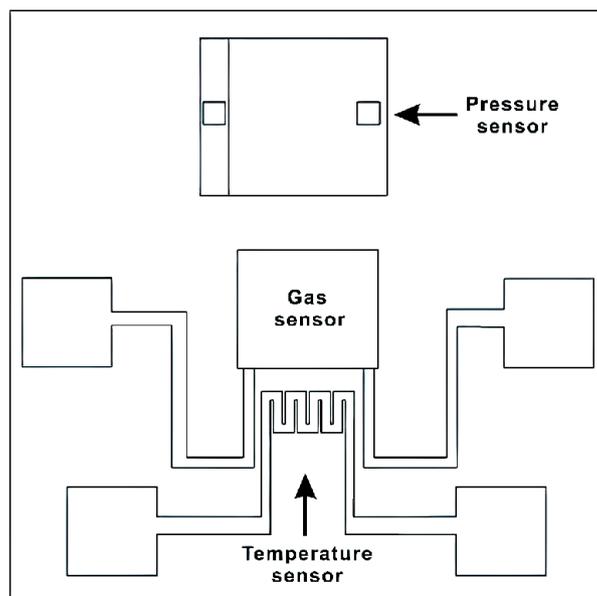


Fig. 1. Design of multisensory microsystem

Pressure sensor constructions

The pressure inside a LIBs before and during a TR can be vary, depending on the specific conditions and the design of the battery. For cylindrical batteries, the pressure at the first venting begins to rise to 10–36 bar (1.0–3.6 MPa), while normal operation pressure is approximately 0.97 bar (97 kPa). Pouch batteries have the thinnest outer shell among the three types of batteries. Therefore, the pressure during the first venting in pouch-type batteries is usually the lowest, approximately 190 kPa. The most common MEMS pressure sensors are piezoresistive, capacitive and resonator sensors. Advantages of a capacitive sensor: high sensitivity to pressure; less temperature sensitivity; less floor power consumption; low costs, easy to manufacture. The proposed capacitive pressure sensor includes an aluminum lower plate ($625 \times 530 \mu\text{m}$, $2 \mu\text{m}$ thick), a dielectric (air and silicon nitride supporting the sides) between the plates, an upper membrane of polycrystalline silicon ($530 \times 530 \mu\text{m}$, $12 \mu\text{m}$), and contact pads on the membrane and bottom plate ($75 \times 75 \mu\text{m}$) made of aluminum. The layer sizes proposed here are optimal and most effective in terms of modeling results. This design of the pressure sensor allows to accurately measuring pressure by analyzing changes in the capacity caused by the deflection of the membrane under the influence of external influences.

Temperature sensor

In the study, a platinum wire was used as a temperature sensor. A contactless temperature sensor based on platinum resistance thermometers allows avoiding the error in measuring emissivity. The platinum temperature sensor in the system under consideration is a four-circuit platinum meander structure with a thickness of $0.3 \mu\text{m}$. It is located directly under the gas sensor in the system, as shown in Fig. 1. The total area of the sensor, including its contacts, is 0.55682 mm^2 . The temperature sensor based on a platinum meander operates on the principle of measuring the change in electrical resistance of a platinum element with a change in temperature.

The technological process for creating such a microsystem of three sensors includes four stages:

- 1) forming a substrate (the formation of a substrate from AA is described in more detail in [6]);
- 2) forming a platinum temperature sensor and platinum counter-pin electrodes for the gas sensor;
- 3) applying a gas-sensitive layer to the counter-pin electrodes for the final formation of the gas sensor;

4) formation of the pressure sensor (includes several operations for the formation of layers of the capacitive pressure sensor and electrodes).

The process of modeling a multisensory system took place in COMSOL Multiphysics 6.1 using the finite element method [7]. The list of modules, used and their description are given in the Tab. 1. Parameters of materials such as Young's modulus, thermal conductivity coefficient, relative permittivity, electrical conductivity and material density during modeling were taken from the libraries of materials.

Table 1. The list of modules used in COMSOL Multiphysics 6.1

Type of sensor	COMSOL Module	Description
Temperature sensor	Electric Currents	Creating electrical boundary conditions of a conductor with electrodes
	Heat Transfer in Solids	Simulation of heat transfer in a sensor
Pressure sensor	Solid Mechanics	Simulation of deformation of the sensor membrane under external pressure
	Electrostatics	Changing the sensor capacity during deformation
Gas sensor	Laminar Flow	Simulation of the gas flow in the system with the laminar flow regime
	Transport of Diluted Species	Modeling the transport of dilute components, with the diffusion of gases in the system
	Reaction Engineering	Initiation of chemical reactions on the surface of the gas sensor

Research results and their discussion

The temperature sensor was simulated by applying a direct current to one of the electrodes. To prevent self-heating of the platinum wire, the low current of 20 μA was utilized. With increasing temperature, the sensor's resistance demonstrated a linear progression (Fig. 2, *a*). Specifically, at the temperature of 100 $^{\circ}\text{C}$, the resistance was 35.7 Ohms, while at 200 $^{\circ}\text{C}$, the resistance increased to 45.35 Ohms. The OriginLab program's linear approximation unveiled the relationship between resistance R and temperature T , delineated by the expression:

$$R = 26.224 + 0.09454T. \quad (1)$$

Thus, using this expression, it is possible to calculate the temperature from the resistance of the sensor. For gas sensor modeling in the COMSOL, a gas reactor with periodic hydrogen supply at the concentration of ppm from 10, 50 and 100 was created during the time-dependent study. The correction coefficients based on experimental data [8] were used due to the fact that in the COMSOL Multiphysics program, the task of describing all chemical reactions on the surface of the gas-sensitive layer is complicated. The change in resistance of the ZnO–GaO gas sensor based on simulation results and is presented in the Fig. 2, *b*. The sensitivity of the gas sensor for 100 ppm is determined by the expression

$$\frac{R_{air}}{R_{gas}} = \frac{179.88 \text{ kOhm}}{95.68 \text{ kOhm}} = 1.88. \quad (2)$$

For hydrogen concentrations of 50 and 10, the sensitivity of the sensor was 1.66 and 1.47, respectively. For pressure sensor the simulations unveiled that with rising pressure, the membrane's deformation and corresponding capacitance both escalate (Fig. 2, *c, d*). As previously noted, under normal operating conditions, the pressure inside the cylindric LIBs is 97 kPa, at this pressure, the sensor capacity was 0.329 pF, when gases begin to be released inside the battery, the pressure inside the battery can rise to 3 MPa. At the pressure of 1 MPa, the capacity was 0.360 pF, at the pressure of 2 MPa, the capacity was 0.415 pF, at the pressure of 3 MPa, the capacity was 0.550 pF.

The polynomial approximation of the OriginLab described the relationship between the sensor capacity C and the pressure value P as expression

$$P = 0.3216 + 5.33 \cdot 10^{-5} C - 2.494 \cdot 10^{-8} C^2 + 1.054 \cdot 10^{-11} C^3. \quad (3)$$

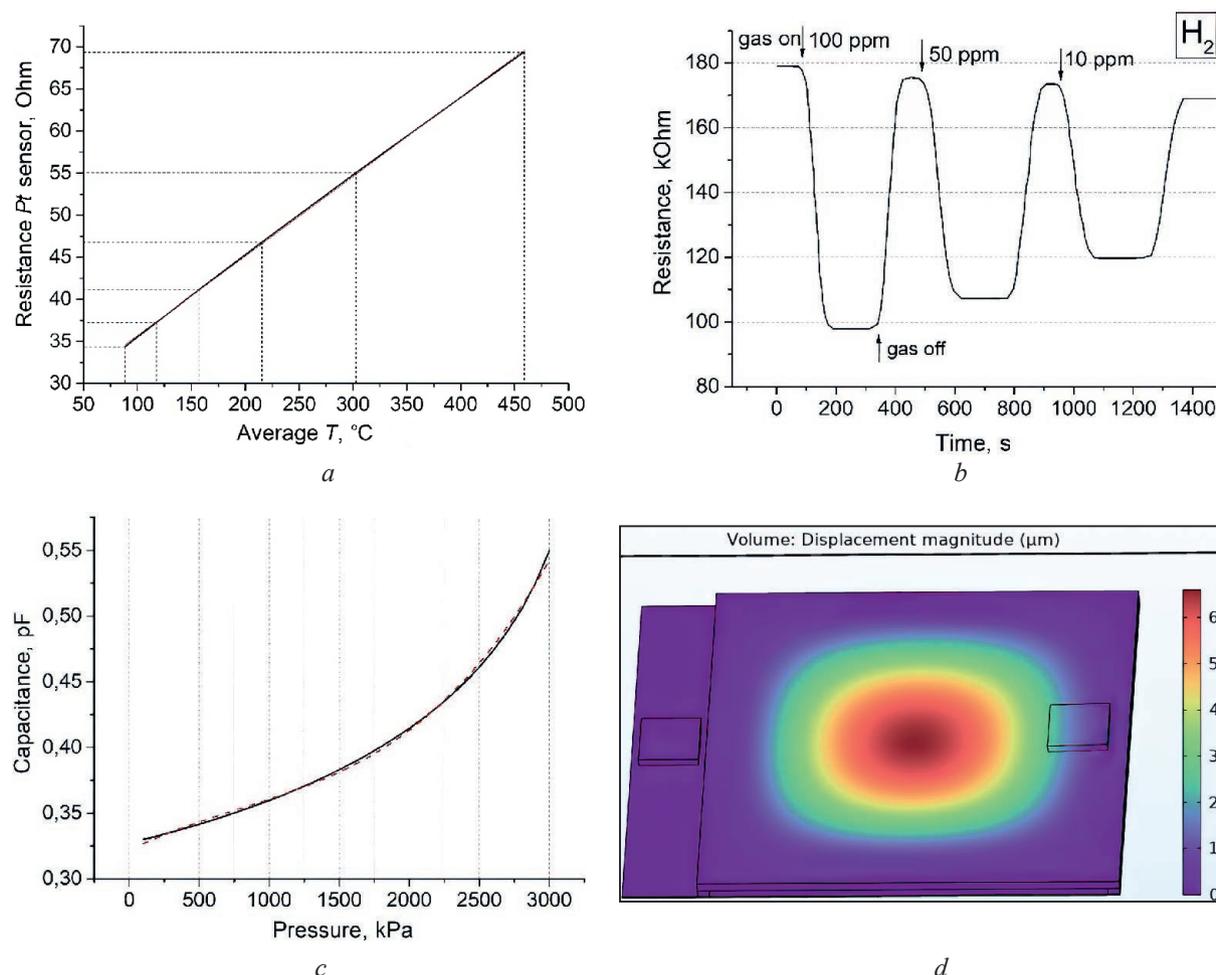


Fig. 2. Sensor modeling results: *a* is dependence of *Pt* sensor resistance on temperature; *b* is correlation between gas sensor resistance and hydrogen concentration; *c* is dependence of capacity on pressure; *d* is membrane displacement magnitude in COMSOL Multiphysics 6.1

Concept application and prospects

It is proposed to use the described sensors (to determine three operating modes of the battery: normal, dangerous and critical (Tab. 2).

Table 2. Possible operation modes for 18650 li-ion battery

Operation modes	Temperature, °C	Pressure, kPa	Gas concentration, ppm
Normal safety	20–60	100	0
Dangerous	61–80	200	20
Critical	Above 80	600	500

1. Normal safety range. In this range, the battery capacity is within normal operating limit, which depends on the packaging shape of the lithium ion battery. The temperature according to the sensor is within 20–60 °C, which avoids overheating or hypothermia. The gas concentration level remains at zero or a safe level, without reaching critical levels that could lead to fire or explosion.

2. Dangerous range. The battery temperature begins to approach dangerous levels (61–80 °C) where overheating or hypothermia may occur, posing a threat to the safety and stability of the battery. Gas concentration levels may begin to increase, indicating possible problems within the battery, such as overheating or problems that could be a precursor to a fire. In this range, battery capacity may be at the edge of acceptable limits, which may indicate that measures must be taken to prevent deep discharge or overcharging, which can negatively affect the life cycle of the battery.

3. Critical range. The battery reaches a critical level of discharge or overcharge that may result in structural damage or poor performance. The battery temperature (above 80 °C) is outside the safe range, which may cause fire or explosion. The gas concentration reaches critical levels, indicating serious problems within the battery and increasing the risk of fire or explosion. For instance, the Tab. 2 shows possible modes as an example for 18650 li-ion battery.

Sensor locations

There are two options for the location of the multi-sensory system.

1. Consider the devices with only one or several li-ion elements such as a smartphone, tablet laptops, power tools and shaving trimmers, the most promising design solution is to place the sensor near the positive electrode at the top of the batteries with cylindrical and prismatic shapes (for LCO, NCA and NCM types of batteries). During the first gas release in a cylindrical lithium-ion battery, the breakdown typically occurs in the upper part of the casing, where the safety valve is located. Prismatic lithium-ion batteries also have a protective gas release mechanism to reduce pressure, similar to cylindrical batteries. This mechanism is usually implemented using a safety valve or a bursting diaphragm (often in prismatic batteries there are several in different places of the case), which open or burst when a certain internal pressure is reached, allowing gases to escape and preventing the battery from bursting. This location will provide the ability to continuously and accurately monitor the parameters, which significantly reduces the risk of unexpected incidents such as overheating or fire.

2. For electric vehicles with hundreds or even thousands (for example Tesla S) li-ion element placing a multi-sensor system should be inside a battery module (more important for NMC, NCA, then LFP battery types). We propose to allocate a specific number of cells within a module that will be monitored by a single multi-sensor system. For instance, 16 cylindrical cells (arranged in a 4×4 configuration) will be controlled by one multi-sensor system. Upon detection of any issues, the individual matrix of cells will be disconnected from the power supply. This arrangement will ensure constant monitoring of temperature, pressure and gas concentrations inside the battery pack. However, with this arrangement, the efficiency of the pressure sensor is significantly reduced, because the pressure change in the module is much lower than the pressure change inside a single lithium-ion cell. Therefore, in the case of such an arrangement, it is proposed to remove the pressure sensor from the system, and control should be carried out using a gas and temperature sensor. Or install pressure sensors on the housings of individual elements if this makes sense.

Based on the results of the study, the concept, design and simulation of a multi-sensor system for preventing TR in lithium-ion batteries are proposed. Future developments are planned to integrate an IC block for collecting, storing and transmitting data, and conduct experimental testing.

Conclusion

1. The results of modeling the complex multisensory system including gas, pressure and temperature sensors are presented. Additionally, we delved into the operational concepts across three modes and location options. The design of the developed multi-sensor system promises to bolster the reliability and safety of various lithium-ion battery types like LCO, NMC, and NCO by mitigating risks associated with fire, explosions, or battery pack damage. This proposed system has a wide array of potential applications, spanning from portable gadgets like smartphones, tablets, laptops, and power tools to modules in electric vehicles.

2. The study was carried out with partial support from the State Research Program of the Republic of Belarus “Micro- and Nanoelectronics” (task 3.7.1).

References

1. Huang Li, Qiangling Duan, Chunpeng Zhao, Zonghou Huang, Qingsong Wang (2019) Experimental Investigation on the Thermal Runaway and Its Propagation in the Large Format Battery Module with $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ as Cathode. *Journal of Hazardous Materials*. 375, 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.116>.
2. Ting Cai, Stefanopoulou A. G., Siegel J. B. (2019) Early Detection for Li-Ion Batteries Thermal Runaway Based on Gas Sensing. *ECS Transactions*. 89 (1), 85–97. DOI 10.1149/08901.0085ecst.

3. Maloney T. (2016) Lithium Battery Thermal Runaway Vent Gas Analysis. *Technical Report*. 1–35. DOI: 10.13140/RG.2.2.17563.80169.
4. Sixun Li, Shiyu Zhou, Shuaiyin Zhao, Tengfei Jin, Maohua Zhong, Zhuhao Cen, et al. (2023) Room Temperature Resistive Hydrogen Sensor for Early Safety Warning of Li-Ion Batteries. *Chemosensors*. 11 (6). <https://doi.org/10.3390/chemosensors11060344>.
5. Yang Jin, Zhikun Zheng, Donghui Wei, Xin Jiang, Hongfei Lu, Lei Sun, et al. (2020) Detection of Micro-Scale Li Dendrite via H₂ Gas Capture for Early Safety Warning. *Joule*. 4 (8), 1714–1729. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.016>.
6. Gorokh G., Zakhlebayaeva A., Taratyn I., Lozovenko A., Zhylynski V., Iji M., et al. (2022) A Micropowered Chemoresistive Sensor Based on a Thin Alumina Nanoporous Membrane and Sn_xBi_kMo_yO_z Nanocomposite. *Sensors*. 22. <https://doi.org/10.3390/s22103640>.
7. Pepper D. W., Heinrich J. C. (2017) *The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications with MATLAB, MAPLE, and COMSOL*. CRC Press. Boca Raton.
8. Bohr-Ran H., Deepa K., Hsin-Rong H., Adhimoorthy S. (2024) Heterostructure Interfaces and Dimensionally Transformed GaO/ZnO Nanostructures for Room-Temperature Hydrogen Gas Sensors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 64, 889–895. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.273>.

Received: 15 November 2024

Accepted: 28 January 2025

Authors' contribution

Fiadosenka U. S., Chenxi Yue completed the research work.

Linxi Dong, Gorokh G. G. formulated the scientific task and reviewed the article material.

Information about the authors

Fiadosenka U. S., Master's, Postgraduate, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Linxi Dong, PhD (Microelectronics and Solid-State Electronics), Professor, Hangzhou Dianzi University (HDU)

Chenxi Yue, Postgraduate, HDU

Gorokh G. G., Cand. Sci. (Tech.), Leading Researcher, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-80-47
E-mail: v.fedosenko@bsuir.by
Fiadosenka Uladzimir Serheyevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-77-83>

УДК 621.373.826

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Е. Б. ШЕРШНЕВ

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (Гомель, Республика Беларусь)

Аннотация. Представлены результаты исследования лазерной обработки кристаллов природных и искусственных алмазов в технологиях микроэлектроники методом термической лазерной сепарации. Проведен анализ физико-химических явлений, наблюдаемых в результате теплового воздействия лазерного излучения на анизотропные материалы в различных кристаллографических направлениях. На основании критерия Гриффитса проанализирована механика хрупкого разрушения как результат формирования критических микромеханических напряжений, вызванных тепловым воздействием лазерного излучения. Решена нестационарная задача теплопроводности, рассчитаны температурные распределения в объеме материала, на основании которых получена информация об изменении упругих свойств кристаллов, приводящем к его управляемому разрушению в заданных направлениях. Результаты моделирования подтверждены экспериментально в процессе термической лазерной сепарации алмазного сырья путем формирования на заданной глубине в объеме кристалла локализованных областей критических термоупругих микронапряжений, являющихся исходной точкой линии управляемого разделения кристалла. Выявлены оптимальные режимы управляемого разделения кристаллов природных и искусственных алмазов при использовании лазера с одной накачкой с длиной волны излучения 1064 нм.

Ключевые слова: лазерная обработка материалов, кристаллы алмаза, алмазы в электронных приборах, анизотропия упругих свойств.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шершнев, Е. Б. Особенности изготовления элементной базы высокотемпературной электроники лазерным излучением / Е. Б. Шершнев // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 77–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-77-83>.

FEATURES OF MANUFACTURING THE ELEMENT BASE OF HIGH-TEMPERATURE ELECTRONICS USING LASER RADIATION

EVGENY B. SHERSHNEV

Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the results of research on laser processing of natural and artificial diamond crystals in microelectronics technologies by thermal laser separation. An analysis of physical-chemical phenomena observed as a result of the thermal effect of laser radiation on anisotropic materials in various crystallographic directions is conducted. Based on the Griffiths criterion, the mechanics of brittle fracture as a result of the formation of critical micromechanical stresses caused by the thermal action of laser radiation are analyzed. The non-stationary problem of thermal conductivity was solved, temperature distributions in the volume of the material were calculated, on the basis of which information on the change of elastic properties of crystals leading to its controlled destruction in given directions was obtained. The simulation results were confirmed experimentally in the processes of thermal laser separation of rough diamonds by forming localized areas of critical thermoelastic microstresses at a given depth in the crystal volume, which are the starting point of the line of controlled crystal separation. Optimal modes of controlled separation of crystals of natural and artificial diamonds using a diode-pumped laser with a radiation wavelength of 1064 nm have been identified.

Keywords: laser processing of materials, diamond crystals, diamonds in electronic devices, anisotropy of elastic properties.

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

For citation. Shershnev E. B. (2025) Features of Manufacturing the Element Base of High-Temperature Electronics Using Laser Radiation. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 77–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-77-83> (in Russian).

Введение

Алмаз имеет существенные преимущества, например, перед Si и GaAs, как материал микроэлектроники, в частности, акусто- и оптоэлектроники. В приборах пикосекундной оптоэлектроники используется плазма носителей тока, генерированная мощным оптическим излучением. Высокая теплопроводность и электрическая прочность алмаза определяют большую стойкость к электрическому напряжению и импульсному току, т. е. позволяют создать достаточно высоковольтные и мощные приборы, детекторы элементарных частиц и прочие компоненты высокотемпературной электроники [1]. В настоящее время приборы на основе полупроводниковых алмазов становятся реальностью, поскольку промышленность освоила выпуск синтетических алмазов, стоимость которых не выше стоимости обычных полупроводниковых материалов.

Лазерная обработка имеет существенные преимущества перед традиционными механическими способами обработки кристаллов алмаза [2–4]. Преимуществом данной технологии является возможность получения узких резов с минимальной зоной термического влияния в сочетании с высокой производительностью процесса размерной обработки. Кроме того, благодаря возможности вариации параметров лазерного излучения такой процесс можно относительно легко автоматизировать. Особо важный раздел научных исследований – изучение особенностей лазерной обработки кристаллов алмазов в различных кристаллографических направлениях [4].

Температура плавления $T_{пл}$ алмаза лежит в диапазоне 3700–4000 °С. При микродеформации кристаллов алмаза в условиях высоких температур ($\sim 0,3T_{пл}$) может наблюдаться их хрупкое разрушение, обусловленное объемно-напряженным состоянием, концентрацией термоупругих напряжений, примесей и дефектов структуры. Для анализа возможности реализации метода термической лазерной сепарации (ТЛС) [5] в кристаллах алмаза с последующим образованием управляемой трещины необходима информация о распределении термоупругих напряжений в объеме обрабатываемого алмазного образца. Преимущество ТЛС в том, что эта технология лазерной резки без абляции и, следовательно, без прошила.

ТЛС представляет собой двухэтапный процесс. На первом на краю пластины лазером создается заранее определенная точка разрыва для инициирования образования трещины, или линия разрыва на поверхности пластины, чтобы направлять распространение трещины вдоль линии нарезки. Это достигается путем модификации материала импульсным абляционным лазером. Образование трещины и отделение слоя достигаются на втором этапе путем создания сжимающего напряжения нагреванием и растягивающего напряжения охлаждением определенной точки на поверхности пластины. Нагрев пластины достигается с помощью сфокусированного лазера инфракрасного диапазона (1064 нм), работающего в квазинепрерывном режиме, с последующим охлаждением нагретой зоны посредством струи водяного аэрозоля [5]. При этом алмаз обладает ярко выраженной «спайностью», поэтому геометрия трещины при фиксированных параметрах лазерного излучения зависит от кристаллографической плоскости, по которой она распространяется.

Анизотропия упругих свойств кристаллической решетки алмаза

Согласно классификации Браве, кристаллическая решетка алмаза соответствует кубической сингонии. Поэтому полагается, что его упругие свойства описываются тремя независимыми компонентами тензора модулей упругости Юнга, а именно: $\sigma_{11} = 1079$ ГПа, $\sigma_{12} = 124$ ГПа, $\sigma_{44} = 578$ ГПа [4]. Расчет полей термоупругих микронапряжений, возникающих в кристаллах алмаза в условиях лазерного воздействия, выполнялся вдоль трех осей симметрии: второго L_2 , третьего L_3 и четвертого L_4 порядков.

Значения локальной температуры кристалла характеризуют переход от квазихрупкого к вязкому виду разрушения. При этом в различных кристаллографических плоскостях предельное значение такой температуры отличается. Также установлено, что она ниже у синтетических алмазов, что объясняется высокой концентрацией примесей парамагнитного азота. При хрупком разрушении кристаллов происходит образование новых поверхностей. В этом случае ключевую роль играет свободная поверхностная энергия F , для значений которой характерна анизотропия

в зависимости от выбранной плоскости кристаллической решетки алмаза, как это представлено в табл. 1 [6].

Таблица 1. Значения свободной поверхностной энергии по различным плоскостям кристаллической решетки алмаза
Table 1. Values of free surface energy on different planes of the crystal lattice of a diamond

Плоскость	(100)	(110)	(111)	(210)	(211)	(221)	(311)	(320)	(321)	(332)
$F, \text{ Дж/м}^2$	18,4	13,0	10,6	16,4	15,0	12,2	16,6	15,3	14,3	11,7

В технологиях лазерной обработки материалов используется ряд критериев хрупкого разрушения, характеризующихся предельными значениями соответствующих физических величин и их коэффициентов. Существует классический критерий Гриффитса [7], согласно которому при достаточном значении микромеханического напряжения трещина развивается в плоскости, которой соответствует наименьшая поверхностная энергия. Таким образом, в случае раскалывания в вершине локальной области критических термоупругих микронапряжений (КТМ) образуется остаточное избыточное механическое напряжение, обусловленное взаимодействием на границе алмаз-расплав. Геометрическое место зоны КТМ можно установить на основании информации о распределении термоупругих микромеханических напряжений. В дальнейшем процесс раскалывания алмаза идет вдоль плоскости (111), для которой удельная поверхностная энергия минимальна (табл. 1.)

Постановка задачи и моделирование

Распределение температур, сформированное лазерным тепловым источником, можно получить, решив нелинейную осесимметричную задачу теплопроводности (т. е. решив в цилиндрической системе координат). За счет изменения положения фокуса лазерного луча существует возможность формировать тепловой источник как на поверхности обрабатываемого объекта, так и в его объеме. Математическое моделирование представленной задачи сводится к решению классического дифференциального уравнения теплопроводности параболического типа

$$\rho c \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad}(T(\vec{r}, t))) = f(\vec{r}, t), \quad (1)$$

где ρ – плотность; c – теплоемкость; T – термодинамическая температура; t – время; λ – коэффициент теплопроводности; \vec{r} – вектор координат x, y, z (при этом z направлена вдоль оси лазерного излучения); $f(\vec{r}, t)$ – интенсивность тепловыделения (плотность мощности тепловых источников) в момент времени t .

Применительно к случаю ТЛС представляет интерес моделирование лазерной обработки равномерно движущимся тепловым источником

$$f(\vec{r}, t) = P_0 \exp \left[\frac{-(x - vt)^2}{A^2} - \frac{-(y)^2}{B^2} - \gamma z \right], \quad (2)$$

где P_0 – плотность мощности в центре зоны термического воздействия с учетом отражения на заданной длине волны; v – скорость сканирования; A, B – полуоси эллиптического гауссова пучка; γ – коэффициент поглощения среды.

Задачи (1), (2) имеют известное решение, различные вариации которого представлены в [8–10]. Кроме того, задачи допускают численное решение, основанное на построении конечно-разностной схемы. Для решения задачи теплопроводности использовался модуль `pde-toolbox` компьютерной системы автоматизации MATLAB [11]. При этом можно варьировать размеры обрабатываемого образца, его физические характеристики, такие как плотность, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, плотность мощности, локализация теплового источника (создается лазерным излучением), температура и условия теплообмена с окружающей средой, граничные и начальные условия. Средства графической визуализации MATLAB позволяют получить изображение распределения температуры (при лазерном излучении 1,06 мкм) в любом сечении образца в плоскости z и схему направления тепловых потоков в произвольный момент времени, как это продемонстрировано рис. 1.

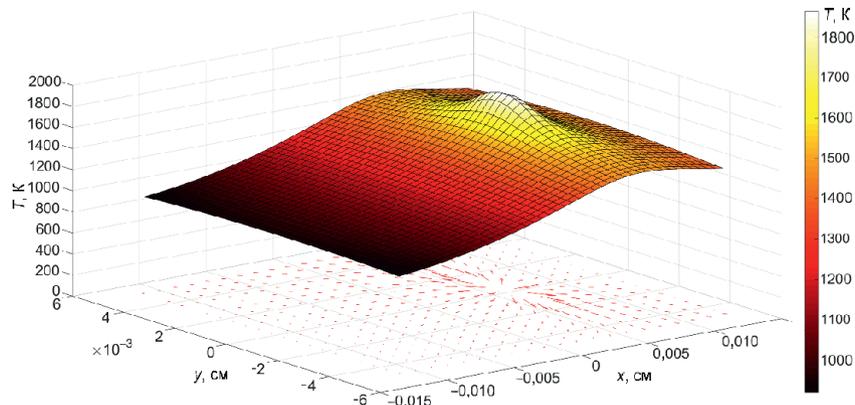


Рис. 1. Распределение температур в сечении образца при плотности мощности теплового источника $2 \cdot 10^6$ Вт/см²
Fig. 1. Temperature distribution in the sample cross-section at the power density of a thermal source of $2 \cdot 10^6$ W/cm²

При определении термоупругих микронапряжений будем пренебрегать инерционными членами в уравнении движения, что соответствует рассмотрению установления «стационарного» напряженного состояния как некоторой последовательности равновесных состояний. Для исследуемой системы характерна квазистатическая модель термоупругости, т. е. напряженное состояние наступает значительно быстрее, чем термодинамическое равновесие. Это следует из того, что скорость распространения упругих колебаний (скорость звука) в материале значительно превышает скорость движения теплового фронта. Отметим, что даже при внезапном изменении температуры на границе упругого полупространства погрешность в определении величины термонапряжений, связанная с пренебрежением инерционными эффектами, оказывается несущественной. Величину термоупругих механических микронапряжений σ_{ij} можно определить, используя формулу [12]:

$$\sigma_{ij} = \frac{\alpha\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \cdot \frac{1}{L} \int_0^L T(\vec{r}, t) d\vec{r}, \quad (3)$$

где α – коэффициент линейного расширения, $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹; μ, λ – коэффициенты Ламе.

Используя (3), можно построить распределение (поле) механических микронапряжений σ в любом сечении образца на основании пространственного распределения температур (рис. 2). Распространение трещины сопровождается разрывом ковалентных связей и высвобождением упругой энергии, величина которой определяется значением микромеханического напряжения.

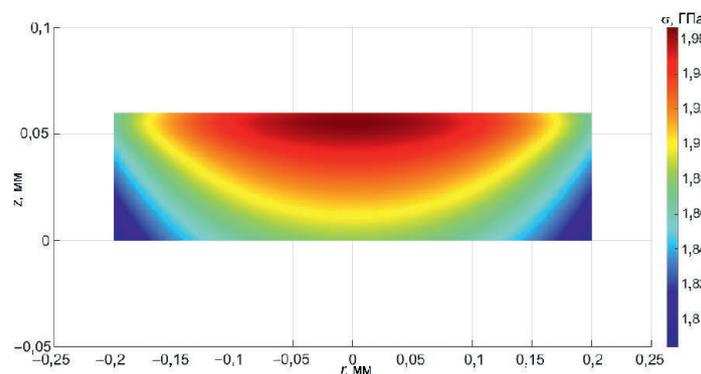


Рис. 2. Распределение механических микронапряжений σ в сечении образца, сформированных лазерным излучением 1,06 мкм при плотности мощности теплового источника $2 \cdot 10^6$ Вт/см²
Fig. 2. Distribution of mechanical microstresses σ in the cross-section of the sample formed by laser radiation of 1.06 μ m at the power density of the heat source $2 \cdot 10^6$ W/cm²

Управляемое термораскалывание алмаза сводится к локальному управляемому лазерному нагреву по требуемому контуру, режим которого инициирует появление трещины в кристалле, которая следует за лазерным лучом по поверхности материала. Лазерное скрайбирование обеспечивает возможность достаточно точного разделения алмазных пластин.

Результаты исследований и их обсуждение

Основа технологии управляемого лазерного термораскалывания алмаза – зарождение первичной микротрещины и дальнейшее управление ее развитием посредством лазерного излучения и охлаждающего потока аэрозоля (хладагента) (рис. 3). Микротрещина зарождается на первоначальном дефекте, который искусственно формируется с использованием импульсного лазера по механизму абляции. Затем эту микрообласть подвергают воздействию лазерного излучения специальной геометрии (например, в виде эллипса). Хладагент из форсунки попадает на нагретую после прохода лазерного излучения область поверхности, вызывая избыточное микромеханическое термонапряжение для создания управляемой микротрещины.

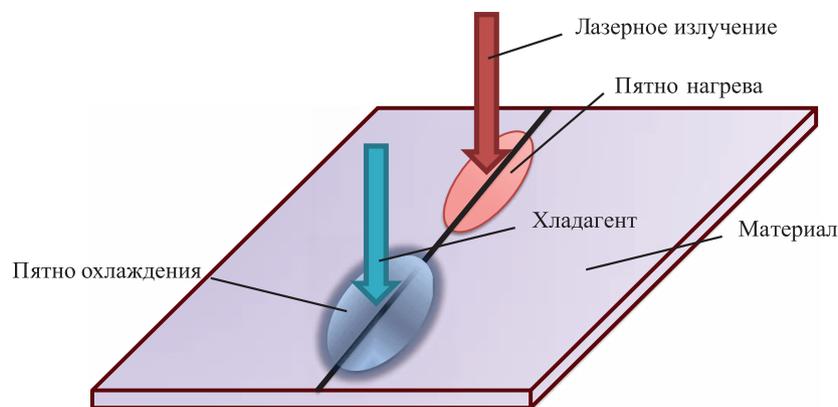


Рис. 3. Схема процесса управляемого лазерного термораскалывания алмаза
Fig. 3. Scheme of the process of controlled laser thermal cleavage of diamond

В результате анализа данных, полученных в процессе компьютерного моделирования, установлено, что термоиндуцированное микромеханическое напряжение σ_{33} достигает максимального значения не на поверхности пластины, где оно в силу граничных условий равно нулю, а на определенной глубине (0,5–0,8 мм), что приводит к формированию необходимой для начала разделения материала локализованной области КТМ. Данные моделирования использовались при подборе технологических режимов формирования зоны КТМ с целью получения направленного профиля исходной области управляемого раскалывания при высокой скорости обработки.

Экспериментальные исследования проводились на модернизированной лазером с диодной накачкой RL10Q установке ЭМ-260, предназначенной для обточки и распиловки алмазного сырья. Входящий в состав установки твердотельный лазер квазинепрерывного действия RL10Q представляет собой источник лазерного излучения с длиной волны 1064 нм, работающий в режиме модуляции добротности резонатора, состоящий из источника питания и управления и излучателя. Номинально лазер работает в режиме генерации основной поперечной моды (TEM₀₀) при частоте повторения импульсов 0–20 кГц. Поляризация выходного излучения – линейная, вертикальная, 100:1. Диаметр пучка на выходном зеркале (по уровню 0,1 мощности излучения) – 0,6 мм, расходимость – не более 2,6 мрад. Средняя мощность лазерного излучения при частоте следования импульсов 5 кГц – 7,5 Вт. Длительность импульса лазерного излучения при частоте следования импульсов 5 кГц – 3 мкс. Потребляемая мощность – не более 600 Вт. Глубина обработки составляла ~250 мкм. Опытным путем был подобран параметр $\beta/2 = 0,210$ рад – наклон поверхности стенки реза относительно вертикали, позволяющий сформировать ширину реза на поверхности от 100 до 250 мкм. Значение параметра «минимум кривых» (количество контуров в последнем слое обработки) было установлено равным единице для формирования V-образного профиля реза.

Формирование локализованной области КТМ в кристаллах алмаза СТМ «Алмазот» с применением модернизированной установки ЭМ-260 (использующей лазерный источник с диодной накачкой) позволяет при достаточной глубине получать исходную микротрещину с линейными размерами до 100 мкм.

Заключение

1. Выполнено численное моделирование процесса термической лазерной сепарации лазерного термораскалывания кристаллов алмаза излучением с длиной волны 1064 нм. Результаты моделирования верифицированы экспериментально для следующих технологических режимов: частота следования лазерных импульсов 1–15 Гц, энергия в импульсе 10–20 мДж, длительность импульса – до 15 нс. Время лазерной обработки при указанных условиях составляло 10–120 с.

2. Анизотропия теплофизических и механических свойств кристаллов алмаза позволяет производить его обработку методом термической лазерной сепарации в разных кристаллографических направлениях с различной эффективностью. Это может быть использовано для расширения номенклатуры изделий электронной техники.

Список литературы

1. Синтетические алмазы СТМ «Алмазот» – результаты исследований и некоторые применения / Н. М. Казючич [и др.] // *Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию каф. физики полупроводников и наноэлектроники, г. Минск, 12–13 окт. 2016 г.* Минск: Изд. центр Бел. гос. ун-та, 2016. С. 62–67.
2. Изнашивание монокристаллов алмаза / А. М. Бочаров [и др.]. Минск: Беларуская навука, 1996.
3. Коваленко, В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. Киев: Техника, 1987.
4. Митягин, А. Ю. Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной электроники / А. Ю. Митягин, А. А. Алтухов, А. Ю. Митягина // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* 2009. № 1. С. 53–58.
5. *Advances in Thermal Laser Separation: Process Monitoring in a Kerf-Free Laser-Based Cutting Technology to Ensure High Yield* / М. С. Baretto [et al.] // *Procedia CIRP* 74. 2018. P. 645–648.
6. Шкадов, А. И. Физические основы лазерной обработки алмазов / А. И. Шкадов. Смоленск, 1997.
7. Назаров, С. А. Критерий Гриффитса для трещины отрыва с нелинейными эффектами в концевых зонах / С. А. Назаренко, О. Р. Полякова // *Доклады Академии наук.* 1994. Т. 335, № 2. С. 182–184.
8. Решение уравнения теплопроводности цилиндрического стержня / Т. Ж. Мазаков [и др.] // *Вестник Казахского университета технологии и бизнеса.* 2020. № 1. С. 13–21.
9. Оптимизация параметров лазерной обработки алмазов / В. А. Емельянов [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники.* 2022. Т. 53, № 4. С. 30–36.
10. Изучение влияния примесей на процессы формообразования синтетического алмаза в зоне термического влияния лазерного излучения / В. А. Емельянов [и др.] // *Известия Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. Естественные науки.* 2022. Т. 132, № 3. С. 117–120.
11. Дьяконов, В. П. MATLAB. Полный самоучитель / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2012.
12. Ненахов, Е. В. Оценки температурных напряжений в моделях динамической термоупругости / Е. В. Ненахов, Э. М. Карташов // *Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Естественные науки.* 2022. № 1. С. 88–106.

Поступила 05.02.2025

Принята в печать 06.03.2025

References

1. Kazyuchits N. M., Rusetsky M. S., Naumchik E. V., Kazyuchits V. N. (2016) Synthetic diamonds STM “Almazot” – Research Results and Some Applications. *Materials and Structures of Modern Electronics: Collection of Scientific Papers of the VII International Scientific Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Department of Physics of Semiconductors and Nanoelectronics, Minsk, Oct. 12–13.* Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University. 62–67 (in Russian)
2. Bocharov A. M., Klimovich A. F., Starovoytov A. S., Snezhkov V. V. (1996) *Wear of Diamond Single Crystals.* Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. (in Russian).
3. Kovalenko V. S., Romanenko V. V., Oleshchuk L. M. (1987) *Low-Waste Laser Beam Cutting Processes.* Kiev, Technics Publ. (in Russian).

4. Mityagin A. Yu., Altukhov A. A., Mityagina A. Yu. (2009) Technology and Equipment for Processing Diamond Materials of Modern Electronics. *Technology and Design in Electronic Equipment*. (1), 53–58 (in Russian).
5. Barreto M. C., Roedera G., Steinhoffa M., Schellenbergera M., Bauer A. (2018) Advances in Thermal Laser Separation: Process Monitoring in a Kerf-Free Laser-Based Cutting Technology to Ensure High Yield. *Procedia CIRP* 74. 645–648.
6. Shkadov A. I. (1997) *Physical Principles of Laser Processing of Diamonds*. Smolensk (in Russian).
7. Nazarov S. A., Polyakova O. R. (1994) Griffiths Criterion for a Tensile Crack with Nonlinear Effects in the End Zones. *Reports of the Academy of Sciences*. 335 (2), 182–184 (in Russian).
8. Mazakov T. Zh., Dzhomartova Sh. A., Ziyatbekova G. Z., Toykenov G. Ch., Arshidinova M. T., Mazakova A. T. (2020) Solution of the Heat Conduction Equation of a Cylindrical rod. *Bulletin of the Kazakh University of Technology and Business*. (1), 13–21 (in Russian).
9. Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Nikitjuk Y. V., Sokolov S. I., Aushev I. Y. (2022) Optimization of Laser Processing of Diamonds. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 53 (4), 30–36 (in Russian).
10. Emelyanov V. A., Shershnev E. B., Kupo A. N., Sokolov S. I. (2022) Study of the Influence of Impurities on the Processes of Formation of Synthetic Diamond in the Zone of Thermal Influence of Laser Radiation. *News of the Francisk Skorina Gomel State University. Natural Sciences*. 132 (3), 117–120 (in Russian).
11. Dyakonov V. P. (2012) *MATLAB. A Complete Tutorial*. Moscow, DMK Press Publ. (in Russian).
12. Nenakhov E. V., Kartashov E. M. (2022) Estimates of Temperature Stresses in Models of Dynamic Thermoelasticity. *Bauman Moscow State Technical University Bulletin. Natural Sciences*. (1), 88–106 (in Russian).

Received: 5 February 2025

Accepted: 6 March 2025

Сведения об авторе

Шершнеv Е. Б., д-р техн. наук, доц., зав. каф. общей физики, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

Адрес для корреспонденции

246019, Республика Беларусь,
Гомель, ул. Советская, 102, кор. 5
Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины
Тел.: +375 0232 50-38-17
E-mail: esherhnev@gsu.by
Шершнеv Евгений Борисович

Information about the author

Shershnev E. B., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of General Physics, Francisk Skorina Gomel State University

Address for correspondence

246019, Republic of Belarus,
Gomel, Sovetskaya St., 102, Bld. 5
Francisk Skorina
Gomel State University
Tel.: +375 0232 50-38-17
E-mail: esherhnev@gsu.by
Shershnev Evgeny Borisovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-84-91>

УДК 519.17

ПОСТРОЕНИЕ ПОРОЖДАЮЩИХ ДОПУСТИМЫХ ПОДМНОЖЕСТВ В ЗАДАЧЕ О РАНЦЕ

С. В. ЧЕБАКОВ¹, Л. В. СЕРЕБРЯНАЯ^{2,3}

¹*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)*

²*Белорусский государственный экономический университет (Минск, Республика Беларусь)*

³*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Разработан метод построения группы порождающих допустимых подмножеств в задаче о ранце при условии, что величина глубины недоминирования заданного паретовского слоя больше нуля. Метод основывается на многокритериальной математической модели решения задачи о ранце при двух критериях качества и разбиении множества начальных данных задачи о ранце на отдельные паретовские слои. Предложены различные способы построения порождающих допустимых подмножеств в зависимости от соотношения между координатами элементов заданных паретовских слоев и объемом ранца. Определена структура паретовских слоев, представляющих собой группу недоминирования заданного отдельного паретовского слоя. Показано, что существует паретовский слой, начиная с которого не требуется при построении допустимых подмножеств рассматривать элементы этого слоя и всех последующих. Это следует из упорядоченности элементов множества начальных данных задачи о ранце по приоритету их вхождения в формируемые допустимые подмножества.

Ключевые слова: задача о ранце, многокритериальная математическая модель, множество Парето, паретовский слой, допустимые подмножества, глубина недоминирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Чебаков, С. В. Построение порождающих допустимых подмножеств в задаче о ранце / С. В. Чебаков, Л. В. Серебряная // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-84-91>.

CONSTRUCTION OF GENERATING FEASIBLE SUBSETS IN THE KNAPSACK PROBLEM

SERGEY V. CHEBAKOV¹, LIYA V. SEREBRYANAYA^{2,3}

¹*United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

²*Belarus State Economic University (Minsk, Republic of Belarus)*

³*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. A method for constructing a group of generating feasible subsets in the knapsack problem under the condition that the non-dominance depth of a given Pareto layer is greater than zero is developed. The method is based on a multicriterial mathematical model for solving the knapsack problem with two quality criteria and partitioning the initial data set of the knapsack problem into separate Pareto layers. Various methods for constructing generating feasible subsets are proposed depending on the relationship between the coordinates of the elements of the given Pareto layers and the knapsack volume. The structure of the Pareto layers, which are a non-dominance group of a given individual Pareto layer, is determined. It is shown that there is a Pareto layer, starting from which it is not necessary to consider the elements of this layer and all subsequent ones when constructing feasible subsets. This follows from the ordering of the elements of the initial data set of the knapsack problem according to the priority of their inclusion in the feasible subsets.

Keywords: knapsack problem, multicriterial mathematical model, Pareto set, Pareto layer, feasible subsets, non-dominance depth.

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

For citation. Chebakov S. V., Serebryanaya L. V. (2025) Construction of Generating Feasible Subsets in the Knapsack Problem. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-84-91> (in Russian).

Введение

В статье рассмотрено построение порождающих допустимых подмножеств в задаче о ранце с множеством объектов N и объемом ранца T . Любому элементу n_i из множества начальных данных соответствуют две характеристики: величина используемого ресурса t_i и вес w_i . Допустимым будет такое подмножество элементов из N , чья суммарная величина ресурса не превосходит объем ранца T . Кроме того, при добавлении в подмножество любого элемента из N суммарная величина ресурса станет больше T . Методы решения указанной оптимизационной задачи представлены в [1, 2].

В [3–5] рассмотрены различные аспекты создания двухкритериальной модели решения задачи о ранце, в [5] дано определение глубины недоминирования отдельного паретовского слоя, а в [6] представлен алгоритм построения допустимых подмножеств при глубине недоминирования паретовского слоя, равной нулю. В данной статье предложен алгоритм решения задачи о ранце на основе двухкритериальной математической модели при глубине недоминирования больше нуля. Рассмотрено формирование порождающих допустимых подмножеств, которые являются основой для нахождения всего набора таких подмножеств.

Определение структуры заданной группы паретовских слоев

В [3] на множестве начальных данных N введено двухкритериальное пространство предпочтений, где координатами каждого элемента n_i из N являются его ресурс t_i и вес w_i . Между любыми двумя элементами $n_1 = (t_1, w_1)$ и $n_2 = (t_2, w_2)$ из N введены следующие транзитивные отношения доминирования.

Определение 1. Элемент n_1 доминирует элемент n_2 тогда и только тогда, когда $t_1 \leq t_2$, $w_1 \geq w_2$, $(t_1, w_1) \neq (t_2, w_2)$. Все недоминируемые элементы из N представляют собой множество Парето на множестве начальных данных N во введенном двухкритериальном пространстве.

Определение 2. Паретовский слой с номером j , обозначим его P_j , представляет собой совокупность недоминируемых элементов на множестве $N^{j-1} = N \setminus \bigcup_{i=1}^{j-1} P_i$, где $P_i = (t_i, w_i)$ – паретовский слой с номером i . Множество Парето, определенное в N , является первым паретовским слоем. Из Определения 2 следует, что для каждого элемента, входящего во второй и в последующие паретовские слои, существует хотя бы один элемент из предыдущего слоя, который его доминирует. В [5] представлена структура оптимального подмножества в задаче о ранце, имеющая следующий вид:

$$Q = \bigcup_{j=1}^i P_j \cup Q_{i+1}. \quad (1)$$

Для нахождения оптимального подмножества требуется определить решение Q_{i+1} задачи о ранце Z_{i+1} с объемом ранца T_{ocm} и множеством начальных данных N_s , включающее в себя элементы всех паретовских слоев, начиная со слоя S с номером $i + 1$. Слой S представляет собой множество Парето на множестве N_s . Объем ранца T_{ocm} в задаче Z_{i+1} равен разности между величиной всего ресурса T и суммой ресурса всех элементов первых паретовских слоев.

Далее будем использовать введенное в [5] понятие глубины недоминирования паретовского слоя S , показывающей число f последующих слоев $S + 1, \dots, S + f$, которые содержат элементы, находящиеся в паретовском отношении хотя бы с одним элементом слоя S . Паретовские слои $S + 1, \dots, S + f$ назовем группой недоминирования слоя S . В постановке задачи о ранце Z_{i+1} предполагается, что $U \geq T_{ocm}$ при любом значении глубины недоминирования слоя S [5]. Величина U

равна сумме координаты t_i всех элементов паретовских слоев $S + 1, \dots, S + f$. Пусть значение f слоя S больше нуля. При выполнении условия $U \geq T_{ocm}$ величина T_{ocm} может быть меньше либо равна сумме координат t_i произвольного числа элементов слоев из этой группы. Следовательно, может существовать такое число $f > m \geq 0$, что выполняется следующее соотношение:

$$Y_j = \sum_{i=0}^j O_i \geq T_{ocm}, \quad (2)$$

где $j = f - 1, \dots, m$; O_i – сумма ресурса t_i элементов слоя с номером $S + i$; O_0 – сумма ресурса элементов слоя S .

Пусть S_m – слой с наименьшим номером m в группе слоев недоминирования $S + 1, \dots, S + f$, для которого выполняется условие (2). Это означает, что величина Y_j для слоя с номером $j = m - 1$, если слой принадлежит рассматриваемой группе, меньше T_{ocm} . Если $m = 0$, то сумма ресурса t элементов слоя $S \geq T_{ocm}$. Обозначим Y_m для слоя S_m через F . Если число m не существует, то величина F по заданному первоначальному условию равна Y_j при $j = f$.

В [4] показано, что существует группа допустимых подмножеств, обозначим ее W , которая включает в себя оптимальное подмножество задач Z_{i+1} . При построении любого подмножества H_j из $W, j = 1, 2, \dots, h$ (где h – число допустимых подмножеств в W), выполняется следующее условие. На каждом очередном k -м шаге построения H_j выбор очередного его элемента должен осуществляться из паретовского множества $X_{j,k}$, которое представляет собой множество Парето на наборе начальных данных $N'_s = N_s \setminus D$, где D – набор уже включенных в H_j элементов из N_s . Первый элемент каждого из допустимых подмножеств H_j принадлежит слою S . Получаем, что:

$$W = \sum_{i=1}^s R_i, \quad (3)$$

где s – число элементов в слое S ; R_i – множество допустимых подмножеств, у каждого из которых первым членом является i -й элемент слоя S .

Определение порождающего допустимого подмножества

Формирование любого допустимого подмножества задачи Z_{i+1} с некоторого элемента r_i слоя S возможно только в том случае, когда значение его координаты $t_i \leq T_{ocm}$. Пусть $S_m = S$. Покажем справедливость следующего соотношения. Если слой S состоит из единственного элемента, то глубина недоминирования этого слоя равна нулю.

По определению паретовского слоя, каждый элемент следующего за S слоя доминируется хотя бы одним его элементом. Если S содержит только один элемент r_1 , то он доминирует все элементы последующих паретовских слоев. Тогда на множестве начальных данных N_s не существует элементов, находящихся с r_1 в отношении Парето и, следовательно, глубина недоминирования слоя S равна нулю.

Рассмотрим случай, когда глубина недоминирования слоя S больше нуля. Следовательно, слой не может состоять из единственного элемента, и число элементов в этом слое должно быть больше единицы. Сформируем последовательность G , упорядочивая элементы r_i слоя S по убыванию ресурса t . Рассмотрим первый элемент r_1 последовательности G . Пусть r_1 включается в формируемое начальное порождающее допустимое подмножество $H_{1,1}$, и определяется величина $T_1 = T_{ocm} - t_1$. Первый индекс в обозначении допустимого подмножества указывает, что оно относится к группе подмножеств, у которых первым является элемент r_1 . Второй индекс показывает порядковый номер формируемых подмножеств внутри данной группы. Выбор второго элемента подмножества $H_{1,1}$ осуществляется из упорядоченного множества $X_{1,2}^1$, представляющего собой паретовские элементы на множестве начальных данных $N_s \setminus \{r_1\}$. Второй нижний индекс указывает номер шага, который требуется совершить при формировании конкретного подмножества. Верхний индекс совпадает с первым индексом формируемых подмножеств.

По условию, глубина недоминирования слоя S больше нуля. В соответствии с ее определением в $X_{1,2}^1$ могут быть включены элементы последующих слоев $S + 1, \dots, S + f$. Элемент h из слоя

$S + 1$ включается в соответствующее $X_{1,2}^1$ в случае, если он доминируется только элементом r_1 слоя S , а с остальными элементами слоя S находится в отношении Парето. Назовем такие элементы дополнительными членами множества $X_{1,2}^1$.

Утверждение 1. Пусть глубина недоминирования слоя S равна f , и в слое $S + f$ элемент g_f находится в отношении Парето с некоторым элементом A_1 из слоя S . Тогда все доминирующие его элементы из слоев $S + 1, \dots, S + f - 1$ находятся в отношении Парето с A_1 .

Доказательство. Согласно условию, по одному из двух критериев элемент g_f доминирует A_1 слоя S . По определению паретовских слоев, для g_f в предыдущих слоях $S + i, S < i < f$ существует хотя бы один элемент g' , который его доминирует. Тогда по транзитивности введенного отношения предпочтения элемент g' доминирует по одному из двух критериев элемент A_1 . Следовательно, g' , как и элемент g_f , находится в отношении Парето с A_1 из слоя S .

Из Утверждения 1 следует, что дополнительные элементы из слоев $S + 1, \dots, S + f$ последовательно включаются в допустимое подмножество $H_{1,1}$. В каждом из слоев $S + 1, \dots, S + f$ существует хотя бы один элемент, который находится в отношении Парето хотя бы с одним элементом из слоя S . При построении $H_{1,1}$ элемент g_{f-1} и доминируемый им g_f не могут находиться в одном паретовском множестве $X_{1,j}^1$. Тогда сначала из слоя с меньшим номером при выполнении заданных условий включается элемент в $X_{1,j}^1$. Затем на последующих шагах построения допустимого подмножества в очередной элемент $X_{1,j}^1$ может включаться g_f . Условием его занесения в $X_{1,j}^1$ является включение всех доминирующих его элементов в формируемое допустимое подмножество.

После включения в $H_{1,1}$ первого элемента r_1 определяется величина $T_1 = T_{ocm} - t_1$. Если ресурс второго элемента r_2 последовательности G имеет значение, меньшее либо равное T_1 , то он включается в $H_{1,1}$, после чего определяется новое значение $T_2 = T_1 - t_2$. Множество $X_{1,3}^1$ на данном шаге содержит все элементы последовательности G , начиная с третьего элемента r_3 , и возможные дополнительные элементы. Выбирается следующий элемент r_3 и, если его ресурс меньше либо равен T_2 , то элемент включается в формируемое подмножество. Построение допустимого подмножества $H_{1,1}$ продолжается до тех пор, пока не исчерпается величина T_{ocm} . По условию, величина $F \geq T_{ocm}$. На каждом шаге требуется проверять наличие дополнительных элементов в слоях $S + 1, \dots, S + f$, которые могут включаться в очередное множество $X_{1,j}^1$. При этом все дополнительные элементы из группы слоев недоминирования $S + 1, \dots, S + f$ имеют значение ресурса t меньше, чем ресурс последнего элемента последовательности r_n .

Утверждение 2. При последовательном включении элементов G в $H_{1,1}$ на некотором шаге формирование допустимого подмножества будет закончено. Последним его элементом является либо некоторый элемент слоя S , отличный от последнего элемента r_n , последовательности G , либо некоторый дополнительный элемент.

Доказательство

1. Пусть в $H_{1,1}$ не вошел ни один дополнительный элемент. По предположению, сумма ресурса элементов $G \geq T_{ocm}$. Если $G = T_{ocm}$, то после включения в $H_{1,1}$ последнего элемента r_n его построение закончено. При $G > T_{ocm}$ объем ранца T_{ocm} на некотором шаге будет исчерпан, поскольку следующий элемент, обозначим его g_c , окажется больше величины очередного T_i . Все остальные элементы слоя S и возможные дополнительные элементы не войдут в $H_{1,1}$, так как имеют большее либо равное элементу g_c значение ресурса. Рассмотрим элемент g_{oc} из группы слоев недоминирования $S + 1, \dots, S + f$. По определению паретовских слоев, он доминируется каким-либо элементом слоя S . Следовательно, g_{oc} доминируется либо элементом из $H_{1,1}$, либо элементами последовательности G , расположенными после элемента g_{c-1} . Значит, g_{oc} не может войти в $H_{1,1}$. Элементы всех слоев, находящихся после слоя $S + f$, также являются доминируемыми и не могут войти в $H_{1,1}$.

2. Пусть в $H_{1,1}$ вошли дополнительные элементы. Все они имеют номера в паретовских множествах $X_{1,j}^1$ меньше, чем последний элемент r_n последовательности G . Следовательно, они могут войти в $H_{1,1}$ ранее, чем r_n . По условию, величина $F \geq T_{ocm}$. Тогда сумма ресурса элементов последовательности G вместе с дополнительными элементами больше T_{ocm} . Величина объема ранца T_{ocm} на некотором шаге будет исчерпана, поскольку следующий элемент g_c множества $X_{1,j}^1$ окажется

больше величины очередного T_i . Последний элемент слоя S не может войти в $H_{1,1}$ вследствие наличия дополнительных элементов. Все остальные элементы слоя S и дополнительные элементы с номерами, больше g_c , в упорядоченном множестве $X_{1,j}^1$ имеют значение ресурса большее либо равное g_c , и не войдут в $H_{1,1}$. Рассмотрим какой-либо элемент g_{oc} из слоев $S+1, \dots, S+f$. По определению паретовских слоев, он доминируется каким-либо элементом слоя S , не вошедшим в число дополнительных элементов. Тогда среди элементов слоя S из $X_{1,j}^1$, начинающихся с g_c , есть элемент, доминирующий g_{oc} . Таким образом, значение ресурса элемента $g_{oc} \geq g_c$, и g_{oc} не войдет в $H_{1,1}$. Значение ресурса любого элемента слоев с номерами, большими, чем у $S+f$, равно или превосходит значение ресурса элемента g_c . Тогда никакой из оставшихся элементов множества начальных данных N_s не может войти в подмножество $H_{1,1}$, и его построение закончено. Утверждение 2 доказано.

Варианты порождающих допустимых подмножеств

Пусть сформировано допустимое подмножество $H_{1,1}$, у которого первым элементом является r_1 . При этом предполагается, что слой S_m совпадает со слоем S . Предположим, существует группа элементов M_1 последовательности G , начиная с r_3 , каждый из которых не превосходит величину $T_1 = T_{ocm} - t_1$. Осуществляется построение всех допустимых порождающих подмножеств $H_{1,j}$, $j = 1, u_1$, где u_1 – число элементов в группе M_1 , у которых начальным членом является первый элемент последовательности G . Любой представитель группы M_1 может быть выбран в качестве второго элемента нового допустимого подмножества. Пусть элементы из группы M_1 рассматриваются в формируемых допустимых подмножествах $H_{1,g}$ в порядке их следования в G . Предположим, что при построении допустимого подмножества $H_{1,k}$ сформировано паретовское множество $X_{k,i}^1$. Его элементы имеют номера как большие, так и меньшие, чем последний включенный в подмножество $H_{1,j}$ элемент. Определенной цепочкой рассуждений можно показать, что на каждом i -м шаге построения допустимых подмножеств $H_{1,j}$ требуется рассматривать только элементы с номерами, большими, чем последний включенный элемент в $H_{1,j}$.

По условию, сумма элементов слоя $S \geq T_{ocm}$. Пусть в некоторое подмножество $H_{1,j}$ на очередном шаге включен последний элемент из G , и при этом $T_i > 0$. Тогда при последовательном включении элементов в $H_{1,j}$ добавление последнего элемента из G возможно в случае, когда существуют элементы слоя S , которые не вошли в $H_{1,j}$. Множество всех элементов слоя S , не вошедших в формируемое подмножество, обозначим через H_1 . После включения последнего элемента G в подмножество $H_{1,j}$ выбор следующего элемента должен осуществляться из множества $X_{j,i}^1$, которое формируется следующим образом. В него включаются элементы из H_1 , а также элементы из слоя $S+1$, которые находятся с ними в отношении Парето, если такие элементы существуют. Обозначим их через H_2 . Упорядочим элементы множества $X_{j,i}^1$ по неубыванию ресурса. В множество H_1 входят элементы последовательности G , начиная с r_1 до r_s , где r_s – элемент в G , предшествующий элементу из группы M_1 , выбранному при построении допустимого подмножества $H_{1,j}$. По предположению, все допустимые подмножества, содержащие элементы из H_1 , уже сформированы. Следовательно, для продолжения построения $H_{1,j}$ будем рассматривать первый элемент из H_2 . Если значение его ресурса больше T_i , то построение $H_{1,j}$ закончено. Сформированное подмножество является допустимым, поскольку вследствие упорядоченности элементов множества $X_{j,i}^1$ все его элементы, а также элементы всех остальных паретовских слоев, больше величины T_i . Если значение его ресурса меньше либо равно T_i , данный элемент включается в формируемое подмножество и определяется новое значение величины T_i . Если $T_i > 0$, то определяется следующее паретовское множество $X_{j,i}^1$, при необходимости корректируется группа H_2 и рассматривается очередной элемент из этой группы.

Пусть все элементы из группы слоев недоминирования слоя S , которые находятся в отношении Парето с элементами группы H_1 , включены в $H_{1,j}$. Тогда все остальные элементы из данной группы слоев доминируются любым элементом из H_1 . Это означает, что они не могут входить в одно паретовское множество $X_{j,i}^1$ с элементами из H_1 . Следовательно, очередное паретовское множество $X_{j,i}^1$ состоит только из элементов H_1 . Однако включение их в $H_{1,j}$ не позволяет построить новые допустимые подмножества. Тогда продолжение построения $H_{1,j}$ проводится при помощи элементов, которые доминируются элементами из H_1 . Однако при подобном вклю-

чении, вследствие определения отношения предпочтения, доминируемый элемент после включения может быть заменен доминирующим элементом. Вновь полученное допустимое подмножество будет иметь большее или равное суммарное значение веса, чем то, которое было до замены. Это означает, что включение в подмножества элементов, которые доминируются членами из H_1 , не влияет на нахождение решения задачи о ранце. Определим паретовский слой, все элементы которого доминируются элементами из H_1 . Это слой с номером $S + f + 1$, поскольку все его элементы доминируются элементами из S .

Таким образом, для случая, когда сумма элементов слоя $S \geq T_{ocm}$, сформирована группа порождающих допустимых подмножеств $H_{1,j}$ в задаче Z_{i+1} , представляющей собой подмножество из W . Первым элементом данных подмножеств является r_1 из последовательности G , вторым – элемент из группы M_1 . Оставшиеся части подмножеств $H_{1,j}$ формируются включением элементов из паретовских множеств $X_{j,i}^1$. При этом элементы слоя $S + f + 1$ не требуется использовать при построении допустимых подмножеств $X_{j,i}^1$.

Пусть слой S_m не совпадает со слоем S . Предположим, что при последовательном включении элементов из G в $H_{1,1}$ после вхождения ее последнего элемента значение очередного $T_i > 0$. При этом в $H_{1,1}$ могут включаться дополнительные элементы из слоев $S + 1, \dots, S + f$. Находим паретовское множество $X_{j,i}^1$ на множестве $N_s \setminus C$, где C – набор всех элементов, вошедших в $H_{1,1}$. Оно содержит элементы слоя $S + 1$, которые доминируются последним элементом G . К ним могут добавиться члены из слоев, составляющих группу недоминирования $S + 1$, которые находятся с указанными элементами в отношении Парето. В результате упорядочивания элементов $X_{j,i}^1$ по неубыванию ресурса t получаем последовательность G_1 .

Утверждение 3. Если ресурс первого элемента из G_1 превосходит значение T_i , полученное после включения в $H_{1,1}$ последнего элемента из G , то никакой элемент из G_1 не может быть включен в это подмножество, и его построение закончено. Справедливость Утверждения 3 следует из упорядоченности последовательности G_1 и того факта, что все остальные элементы множества N_s доминируются хотя бы одним элементом из последовательности G_1 .

Пусть условие Утверждения 3 не выполняется, и существуют элементы в последующих слоях, которые могут войти в $H_{1,1}$. Выполняем формирование подмножества $H_{1,1}$ последовательным включением элементов G_1 до тех пор, пока значение T_i не станет меньше либо равно нулю. В этом случае построение подмножества $H_{1,1}$ закончено. Предположим, что в $H_{1,1}$ включен последний элемент из G_1 , и $T_i > 0$. Формируется новое паретовское множество $X_{1,i}^1$, состоящее из элементов слоя $S + 2$ и элементов последующих слоев, которые находятся с ними в отношении Парето. Упорядочивая элементы этого паретовского множества, получаем последовательность G_2 .

При невыполнении условия Утверждения 3 для первого элемента последовательности G_2 ее элементы включаются в подмножество $H_{1,1}$ до тех пор, пока величина T_i не станет меньше либо равной нулю. Если $T_i > 0$, продолжается процесс построения новых паретовских множеств $X_{1,i}^1$ и упорядоченных последовательностей G_i . По определению слоя S_m , сумма ресурса всех элементов слоев $S, \dots, S_m > T_{ocm}$. Тогда существует последовательность G_k , включающая в себя элементы слоя S_m , сумма ресурса элементов которой будет больше значения последней величины T_i . Проверяется выполнение условий Утверждения 3 для первого элемента последовательности G_k . При их выполнении построение допустимого подмножества закончено, а элементы слоя S_m не используются при формировании допустимого подмножества $H_{1,1}$. При невыполнении условий Утверждения 3 включаем элементы G_k в $H_{1,1}$. На некотором шаге элемент из G_k будет больше нового значения T_i , и формирование $H_{1,1}$ закончено.

Выполним построение всех допустимых подмножеств $H_{1,j}$, у которых начальным элементом является первый элемент последовательности G . Создаем некоторое подмножество $H_{1,j}$, вторым элементом которого является j -й член последовательности G . Тогда на каждом i -м шаге построения подмножеств $H_{1,j}$ требуется выбирать элементы из множеств $X_{j,i}^1$ с номерами, большими, чем последний включенный в $H_{1,j}$ элемент из G . На каждом i -м шаге вычисляется величина $T_i = T_{i-1} - t_i$, где t_i – ресурс последнего включенного элемента.

Пусть последний элемент слоя S включен в некоторое подмножество $H_{1,j}$. Множество всех элементов S , не включенных в формируемое подмножество, обозначим через H_1 . Допустим,

в группе недоминирования слоя S существуют элементы, которые находятся в отношении Парето со всеми элементами из множества H_1 . Обозначим эту группу H_2 . Ее элементы составят последовательность G_1 . При выполнении условий Утверждения 3 построение $H_{1,j}$ закончено. Предположим, что условия Утверждения 3 не выполняются. Тогда элементы группы H_2 последовательно включаются в формируемое подмножество. Если на некотором шаге $T_i \leq 0$, то построение допустимого подмножества закончено.

Пусть в $H_{1,j}$ включены все элементы из G_1 , и значение последней величины T_i больше нуля. Очередное паретовское множество $X_{j,i}^1$ содержит только элементы группы H_1 . Ее элементы упорядочиваются по неубыванию ресурса, и получается последовательность G_2 . Элементы G_2 включаются в $H_{1,j}$ до тех пор, пока величина очередного T_i не станет меньше либо равной нулю. Предположим, что при включении последнего элемента из H_1 в $H_{1,j}$ величина $T_i > 0$. Тогда при необходимости формируются новые $X_{j,i}^1$ и соответствующие им последовательности G_k , где k – номер последовательности. Элементы G_k включаются в $H_{1,j}$ до тех пор, пока величина T_i не станет меньше либо равной нулю.

Обозначим через S_{md} слой с номером $S_m + n + 1$. Можно провести цепочку рассуждений, в результате которых будет показано, что элементы S_{md} не требуются при построении порождающих допустимых подмножеств. Для нахождения всех порождающих допустимых подмножеств в задаче о ранце Z_{i+1} требуется построить подмножества $H_{n,j}$ (где $n = 2, \dots, s$; s – количество элементов в последовательности G). Первыми элементами подмножеств $H_{n,j}$ являются элементы r_2, \dots, r_s . Нахождение всего набора допустимых подмножеств требует разработки алгоритмов формирования подзадач о ранце, которые будут рассматриваться в следующих статьях.

Заключение

1. На основе многокритериальной математической модели при двух критериях качества разработан метод построения набора порождающих допустимых подмножеств в задаче о ранце при значении величины глубины недоминирования заданного паретовского слоя больше нуля.

2. Определена структура паретовских слоев, представляющих собой группу слоев недоминирования.

3. Существует паретовский слой, элементы которого, как и элементы всех последующих слоев, на которые разбивается множество начальных данных, не требуется рассматривать при построении данного набора порождающих допустимых подмножеств.

Список литературы

1. Martello, S. Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations / S. Martello, P. Toth. NY: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
2. Посыпкин, М. А. Комбинированный параллельный алгоритм решения задачи о ранце / М. А. Посыпкин // Параллельные вычисления и задачи управления: тр. 4-й Междунар. конф. М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2008. С. 177–189.
3. Чебаков, С. В. Двухкритериальная модель построения оптимального подмножества альтернатив с максимальной суммарной вероятностью достижения цели / С. В. Чебаков // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. 2005. № 2. С. 112–118.
4. Чебаков, С. В. Определение структуры оптимального подмножества в задаче о ранце / С. В. Чебаков, Л. В. Серебряная // Доклады БГУИР. 2019. № 6. С. 72–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-72-79>.
5. Чебаков, С. В. Алгоритм нахождения структуры оптимального подмножества на основе паретовских слоев в задаче о ранце / С. В. Чебаков, Л. В. Серебряная // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. 2020. № 2. С. 97–104.
6. Чебаков, С. В. Алгоритм решения задачи о ранце при определенных свойствах паретовских слоев / С. В. Чебаков, Л. В. Серебряная // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. 2022. № 3. С. 54–66.

Поступила 12.12.2024

Принята в печать 17.03.2025

References

1. Martello S., Toth P. (1990) *Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations*. NY, John Wiley & Sons Inc.

2. Posypkin M. A. (2008) Combined Parallel Algorithm for Solving the Knapsack Problem. *Parallel Computing and Control Problems, Proceedings of the 4th International Conference*. Moscow, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. 177–189 (in Russian).
3. Chebakov S. V. (2005) Two-Criteria Model for Constructing an Optimal Subset of Alternatives with the Maximum Total Probability of Achieving the Goal. *News of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical and Mathematical Sciences*. (2), 112–118 (in Russian).
4. Chebakov S. V., Serebryanaya L. V. (2019) Finding of Optimal Subset Structure in the Knapsack Problem. *Doklady BGUIR*. (6), 72–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-72-79> (in Russian).
5. Chebakov S. V., Serebryanaya L. V. (2020) Finding Algorithm of Optimal Subset Structure Based on the Pareto Layers in the Knapsack Problem. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*. (2), 97–104 (in Russian).
6. Chebakov S. V., Serebryanaya L. V. (2022) Algorithm for Solving the Knapsack Problem with Certain Properties of Pareto Layers. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*. (3), 54–66 (in Russian).

Received: 12 December 2024

Accepted: 17 March 2025

Вклад авторов

Чебаков С. В. сформулировал постановку задачи для проведения исследования, предложил многокритериальную модель оптимизации.

Серебряная Л. В. разработала структуру заданной группы паретовских слоев и алгоритм построения допустимых подмножеств.

Authors' contribution

Chebakov S. V. formulated a problem statement for the study, proposed a multicriteria optimization model and a selection procedure.

Serebryanaya L. V. developed a selection procedure and an algorithm for finding the optimal path on a graph model.

Информация об авторах

Чебаков С. В., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси

Серебряная Л. В., канд. техн. наук, доц. каф. программного обеспечения информационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, зав. каф. экономической информатики Белорусского государственного экономического университета

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 773-95-09
E-mail: l_silver@mail.ru
Серебряная Лия Валентиновна

Information about the authors

Chebakov S. V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, United Institute of Informatics Problems National Academy of Sciences of Belarus

Serebryanaya L. V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor at the Department of Software for Information Technology, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Head of the Department of Economic Informatics at the Belarus State Economic University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 773-95-09
E-mail: l_silver@mail.ru
Serebryanaya Liya Valentinovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-92-100>

УДК 004.33.054

ПОСТРОЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕСТОВ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ТЕСТОВЫХ НАБОРОВ

В. Н. ЯРМОЛИК¹, В. В. ПЕТРОВСКАЯ¹, Н. А. ШЕВЧЕНКО²

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

²Дармштадтский технический университет (Дармштадт, Германия)

Аннотация. Рассмотрены вопросы тестирования вычислительных систем и их составных компонентов. Выделен и исследован класс управляемых вероятностных тестов с малым числом тестовых наборов. Представлен метод построения управляемых вероятностных тестов с заданным расстоянием Хэмминга, основой которого является одномерное масштабирование шаблонов, представляющих собой тесты малой разрядности. Предложено применение исчерпывающих и псевдоисчерпывающих тестов в качестве шаблонов для получения управляемых вероятностных тестов. Исследованы свойства формируемых тестов и подходы по их использованию в качестве альтернативы вероятностным тестам. Эффективность метода построения управляемых вероятностных тестов экспериментально проанализирована и подтверждена для случая тестирования запоминающих устройств на наличие в них сложных кодочувствительных неисправностей.

Ключевые слова: вероятностный тест, исчерпывающие и псевдоисчерпывающие тесты, тестовый набор, мера различия, расстояние Хэмминга.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ярмолик, В. Н. Построение управляемых вероятностных тестов с малым числом тестовых наборов / В. Н. Ярмолик, В. В. Петровская, Н. А. Шевченко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 92–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-92-100>

CONSTRUCTING CONTROLLED RANDOM TESTS WITH A SMALL NUMBER OF TEST PATTERNS

VYACHESLAV N. YARMOLIK¹, VITA V. PETROVSKAYA¹, MIKALAI A. SHAUCHENKA²

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

²Darmstadt Technical University (Darmstadt, Germany)

Abstract. The article considers the issues of testing computing systems and their components. A class of controlled probabilistic tests with a small number of tests patterns is identified and studied. A method for constructing controlled probabilistic tests with a given Hamming distance is presented, the basis of which is one-dimensional scaling of templates representing tests of small bit depth. It is proposed to use exhaustive and pseudo-exhaustive tests as templates for obtaining controlled probabilistic tests. The properties of the generated tests and approaches to their use as an alternative to probabilistic tests are studied. The efficiency of the method for constructing controlled probabilistic tests is experimentally analyzed and confirmed for the case of testing memory devices for the presence of complex code-sensitive faults.

Keywords: probabilistic test, exhaustive and pseudo-exhaustive tests, test set, dissimilarity measure, Hamming distance.

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

For citation. Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Shauchenka M. A. (2025) Constructing Controlled Random Tests with a Small Number of Test Patterns. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 92–100. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-92-100> (in Russian).

Введение

Под управляемым вероятностным тестом (Controlled Random Test) понимают случайную тестовую последовательность, в которой очередной тестовый набор формируется случайным образом, но с учетом сгенерированных ранее предыдущих наборов. Таким образом, отличием управляемого формирования случайных тестовых наборов от процедуры построения вероятностных тестов (Random Test) [1, 2] является информация, извлекаемая в виде некоторых характеристик (метрик) из ранее сгенерированных тестовых наборов и используемая для получения очередного тестового набора [3, 4]. Для всех разновидностей управляемых вероятностных тестов, применяемых для тестового диагностирования цифровых устройств и программных приложений с n входами и пространством входных наборов, состоящим из 2^n двоичных наборов (векторов), справедливо следующее определение [2–4].

Определение 1. Управляемым вероятностным тестом $CRT = \{T_0, T_1, T_2, \dots, T_{q-1}\}$ является тест, состоящий из сгенерированных случайным образом тестовых наборов $T_i = t_{i,0}, t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,n-1}$ (где $t_{i,l} \in \{0, 1\}$, $l \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$, $i \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\}$) – таких, что характеристика/характеристики набора T_i удовлетворяют некоторому критерию/критериям по отношению к предыдущим наборам $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$ формируемого CRT теста.

В качестве критериев отличия тестового набора T_i от ранее сформированных наборов $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$ чаще всего используется расстояние Хэмминга (Hamming Distance) $HD(T_i, T_j)$ и декартово расстояние (Cortesian Distance) $CD(T_i, T_j)$ [2–5]. Идея синтеза тестов с заданным значением расстояния Хэмминга берет свое начало от первых публикаций по данной тематике, когда из вероятностного теста RT формировался управляемый вероятностный тест CRT . В пионерских работах констатировалось, что простейшим CRT является вероятностный тест, в котором исключено повторение одинаковых тестовых наборов [5]. В терминах расстояния Хэмминга это означает, что минимальное значение расстояния Хэмминга для такого теста равняется единице, т. е. $\min HD(T_i, T_j) = 1$. Таким образом, управляемый вероятностный тест приближается к исчерпывающему тесту (Exhaustive Test), в котором всевозможные тестовые наборы присутствуют в тестовой последовательности без их повторения [2, 6, 7]. Просматривается взаимосвязь вероятностных RT и исчерпывающих (ExT) тестов, промежуточное положение между которыми занимают CRT тесты.

Как уже отмечалось, $ExT(2^n)$ характеризуется отсутствием повторяющихся наборов, более того, он содержит всевозможные наборы, количество которых для двоичного случая равняется 2^n . Подобный тест можно представить как $CRT(q, h, n) = CRT(2^n, 1, n)$, состоящий из $q = 2^n$ тестовых наборов, представленных n двоичными символами, который характеризуется минимальным значением $h = \min HD(T_i, T_j)$, равным 1. Невозможность генерирования для реальных значений n всех 2^n наборов предопределила применение вероятностных тестов как эффективную аппроксимацию исчерпывающих тестов. Однако для RT присущ определяющий недостаток, связанный с большой временной сложностью, зависящей от количества тестовых наборов. Попытки уменьшения сложности RT предопределили появление большого числа методов генерирования CRT , в том числе на базе ExT [2, 8].

Синтез управляемых вероятностных тестов на базе исчерпывающих тестов

Идея применения ExT для синтеза $CRT(q, h, n)$ заключается в том, что тестовые наборы T_i разрядностью n бит управляемого вероятностного теста строятся на базе $ExT(2^r) = CRT(2^r, 1, r)$ меньшей разрядности ($r < n$), число которых определяется соотношением $Q_{ExT} = 2^r!$ [8]. Количество разрядов r используемого исчерпывающего теста определяет две весьма значимые характеристики формируемого CRT : во-первых, количество тестовых наборов q , равное 2^r , и, во-вторых, минимальное расстояние Хэмминга $h = \min HD(T_i, T_j) = \lfloor n/r \rfloor$ между двумя произвольными тестовыми наборами T_i и T_j управляемого вероятностного теста. Процедура построения $CRT(g, h, n)$ на базе исчерпывающих тестов для произвольной разрядности n двоичных тестовых наборов T_i и требуемого значения $\min HD(T_i, T_j)$ включает следующие этапы.

1. Вычисляется максимальное значение $r \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$, для которого выполняется неравенство $\min HD(T_i, T_j) \leq \lfloor n/r \rfloor$, соответственно, количество q наборов в формируемом CRT будет равняться 2^r , а $HD(T_i, T_j) \geq \lfloor n/r \rfloor$ для всех $i \neq j \in \{0, 1, 2, \dots, 2^r - 1\}$.

2. Значения каждого блока из произвольных непересекающихся r бит тестовых наборов $T_0, T_1, T_2, \dots, T_{q-1}$ формируемого CRT устанавливаются равными двоичным кодам одного из $Q_{ExT} = 2^r!$ исчерпывающих тестов $ExT(2^r)$. Количество блоков определяется величиной $\lfloor n/r \rfloor$, а содержимое каждого блока будет соответствовать одному из $ExT(2^r)$.

3. Значения оставшихся $n - \lfloor n/r \rfloor r$ разрядов, которые не вошли в блоки по r бит, формируются случайным образом.

Приведем пример применения рассмотренной процедуры для синтеза управляемого вероятностного теста для $n = 16$ и $\min HD(T_i, T_j) = 5$.

1. На основании неравенства $\min HD(T_i, T_j) = 5 \leq \lfloor n/r \rfloor = \lfloor 16/r \rfloor$ определяется значение $r = 3$, так как оно является максимальным значением для r из множества $\{1, 2, 3, \dots, 16\}$, при котором выполняется это неравенство. Соответственно формируемый тест будет состоять из $2^r = 2^3 = 8$ наборов и описываться как $CRT(8, 5, 16)$.

2. Величина $r = 3$ определяет количество наборов $ExT(2^r)$, равное $2^r = 8$, их разрядность ($r = 3$), а также число блоков $\lfloor n/r \rfloor = \lfloor 16/3 \rfloor = 5$ формируемого теста. Пять блоков, состоящих из непересекающихся разрядов тестовых наборов синтезируемого теста, объединяют, например, следующие их разряды: $t_{i,0}, t_{i,3}, t_{i,6}; t_{i,1}, t_{i,5}, t_{i,7}; t_{i,2}, t_{i,14}, t_{i,15}; t_{i,4}, t_{i,10}, t_{i,11}$ и $t_{i,8}, t_{i,9}, t_{i,13}$. Для каждого блока применяется один из исчерпывающих тестов $ExT(2^3)$, который задает значения соответствующих разрядов тестовых наборов формируемого теста. Значения разрядов $t_{i,0}, t_{i,3}$ и $t_{i,6}$ первого блока тестовых наборов $T_0, T_1, T_2, \dots, T_7$ устанавливаются равными двоичным кодам 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111, соответствующим наборам исчерпывающего теста $ExT(2^3)$, состоящего из последовательности восьмеричных чисел 0, 1, 2, ..., 7. Для блока $t_{i,1}, t_{i,5}$ и $t_{i,7}$ использовалась обратная последовательность восьмеричных чисел. Для двух последующих блоков $t_{i,2}, t_{i,14}, t_{i,15}$ и $t_{i,4}, t_{i,10}, t_{i,11}$ применена последовательность кода Грея и такая же последовательность с обратным порядком наборов [2]. Пятый блок $t_{i,8}, t_{i,9}, t_{i,13}$ сформирован на базе значений последовательности Соболя [2].

3. Оставшийся $n - \lfloor n/r \rfloor r = 16 - \lfloor 16/3 \rfloor \cdot 3 = 1$ разряд, не вошедший в блоки из трех разрядов, индекс которого 12, задается случайным образом.

Результат синтеза управляемого вероятностного теста приведен в табл. 1, где для удобства визуального анализа каждый из блоков по три разряда представлен различными шрифтами.

Таблица 1. Управляемый вероятностный тест $CRT(8, 5, 16)$ с $\min HD(T_i, T_j) = 5$ и $n = 16$
Table 1. Controlled random test $CRT(8, 5, 16)$ with $\min HD(T_i, T_j) = 5$ and $n = 16$

T_i	$t_{i,0}$	$t_{i,1}$	$t_{i,2}$	$t_{i,3}$	$t_{i,4}$	$t_{i,5}$	$t_{i,6}$	$t_{i,7}$	$t_{i,8}$	$t_{i,9}$	$t_{i,10}$	$t_{i,11}$	$t_{i,12}$	$t_{i,13}$	$t_{i,14}$	$t_{i,15}$
T_0	0	1	0	0	I	1	0	1	<u>0</u>	<u>0</u>	0	0	<u>0</u>	<u>0</u>	0	0
T_1	0	1	0	0	I	1	1	0	<u>1</u>	<u>0</u>	0	1	<u>0</u>	<u>0</u>	0	1
T_2	0	1	0	1	I	0	0	1	<u>0</u>	<u>1</u>	1	1	<u>1</u>	<u>0</u>	1	1
T_3	0	1	0	1	I	0	1	0	<u>1</u>	<u>1</u>	1	0	<u>1</u>	<u>0</u>	1	0
T_4	1	0	1	0	0	1	0	1	<u>0</u>	<u>0</u>	1	0	<u>1</u>	<u>1</u>	1	0
T_5	1	0	1	0	0	1	1	0	<u>1</u>	<u>0</u>	1	1	<u>0</u>	<u>1</u>	1	1
T_6	1	0	1	1	0	0	0	1	<u>0</u>	<u>1</u>	0	1	<u>1</u>	<u>1</u>	0	1
T_7	1	0	1	1	0	0	1	0	<u>1</u>	<u>1</u>	0	0	<u>0</u>	<u>1</u>	0	0

Приведенная процедура и пример ее применения показывают, что результирующий CRT состоит из множества исчерпывающих тестов $ExT(2^r)$, каждый из которых определяет значения r разрядов его тестовых наборов. Рассмотренная процедура построения управляемых вероятностных тестов произвольной разрядности n двоичных наборов на базе $ExT(2^r) = CRT(2^r, 1, r)$ позволяет сформировать один из подобных тестов, общее количество которых определяется соотношением:

$$Q_{CRT} = (2^r!)^{\lfloor n/r \rfloor}. \quad (1)$$

В (1) не учтены вариации значений $n - \lfloor n/r \rfloor r$ разрядов, не вошедших в блоки по r разрядов и задаваемых случайным образом, значения которых не определяют основные характеристики генерируемого теста. Независимо от соотношения величин r и n количество синтезируемых $CRT(2^r, \lfloor n/r \rfloor, n)$ достаточно велико. Действительно, предположив, что $r = n$, число тестов

для этого случая будет равняться $Q_{CRT} = 2^{n1}$, а количество тестовых наборов q в таких тестах, описываемых как $CRT(2^n, 1, n)$, принимает большие значения, равные 2^n . Для второго крайнего случая, когда $r = 1$, общее количество $CRT(2^1, n, n)$ также велико и равняется 2^n , а сами тесты состоят только из двух наборов. Следует отметить, что для двух рассмотренных полярных случаев величина $h = \min HD(T_i, T_j)$ принимает диаметрально отличные значения 1 и n .

Управляемые вероятностные тесты на основе псевдоисчерпывающих тестов

Под псевдоисчерпывающими тестами $PEXT(k, r)$ для r -разрядных двоичных тестовых наборов понимают тесты, соответствующие следующему определению [2, 6, 9, 10].

Определение 2. Псевдоисчерпывающий тест $PEXT(k, r)$, где $k < r$, представляет собой множество двоичных наборов $T(k, r)$, обеспечивающих всевозможные 2^k двоичные комбинации на любых k из r разрядах его тестовых наборов.

$PEXT(k, r)$ появились как альтернатива $EXT(2^r)$ в силу высокой временной сложности последних для реальных значений r . Подобные тесты характеризуются весьма важным свойством, которое, в отличие от тестов, построенных на основании ортогональных массивов, вместо ограничения точно один раз (exactly once) использует ограничение не менее одного раза (at least once) [2, 6, 9]. В результате было сформулировано понятие так называемых покрывающих массивов (covering arrays), применение которых гарантировало формирование на произвольных k из r разрядах всевозможных 2^k двоичных комбинаций не менее одного раза [2, 6, 9]. Одним из решений задачи синтеза так называемых универсальных псевдоисчерпывающих тестов является метод, основанный на применении тестовых наборов (векторов) заданного веса [10]. Традиционно под весом w двоичного набора понимают количество в нем единичных значений. Указанный метод основан на следующем утверждении [2, 10].

Утверждение 1. Множество r разрядных двоичных тестовых наборов $T(k, r)$ псевдоисчерпывающего теста $PEXT_c(k, r)$ позволяет обеспечить всевозможные 2^k двоичные комбинации на любых $k < r$ из r произвольных разрядах наборов, если оно содержит все r разрядные наборы весом $w \leq r$ таким, что $w = c \pmod{r - k + 1}$ для целого c , удовлетворяющего неравенству $0 \leq c \leq r - k$.

Важным следствием данного утверждения является существование $(r - k + 1)$ решений задачи построения псевдоисчерпывающего теста $PEXT(k, r)$ [2, 10].

Пример 1. Рассмотрим случай, когда $r = 4$, а $k = 2$, что соответствует тесту $PEXT(2, 4)$. Согласно Утверждению 1, значение c изменяется в пределах от 0 до $r - k = 4 - 2 = 2$. Это означает, что существует три решения задачи построения псевдоисчерпывающего теста $PEXT(2, 4)$, которые определяются значениями 0, 1 и 2 константы c . Для $c = 0$, согласно Утверждению 1, тест $PEXT_0(2, 4)$ содержит наборы, веса w которых удовлетворяют следующему линейному сравнению: $w = 0 \pmod{3}$, где $w \leq 3$. Решением приведенного сравнения являются значения $w = 0$ и $w = 3$, что свидетельствует о необходимости использования в тесте $PEXT_0(2, 4)$ двоичных наборов весом 0 и наборов, имеющих вес 3. В результате тест $PEXT_0(2, 4)$ для $c = 0$ будет включать набор 0000 и четыре набора 0111, 1011, 1101, 1110 с $w = 3$ (табл. 2).

Таблица 2. Примеры псевдоисчерпывающих тестов $PEXT_c(2, 4)$

Table 2. Examples of pseudo-exhaustive tests $PEXT_c(2, 4)$

T_i	$c = 0$				$c = 1$				$c = 2$			
	$PEXT_0(2, 4)$				$PEXT_1(2, 4)$				$PEXT_2(2, 4)$			
	$t_{i,0}$	$t_{i,1}$	$t_{i,2}$	$t_{i,3}$	$t_{i,0}$	$t_{i,1}$	$t_{i,2}$	$t_{i,3}$	$t_{i,0}$	$t_{i,1}$	$t_{i,2}$	$t_{i,3}$
T_0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
T_1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
T_2	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1
T_3	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
T_4	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1
T_5	–	–	–	–	–	–	–	–	1	0	0	1

Как видно из табл. 2, в зависимости от значения константы c псевдоисчерпывающие тесты имеют различное количество тестовых наборов, при этом основное свойство теста, а именно формирование на произвольных двух разрядах теста всех четырех двоичных комбинаций,

сохраняется. Более того, для этих тестов выполняется важное условие, заключающееся в том, что для всех трех из них выполняется равенство $\min HD(T_i, T_j) = 2$.

Основываясь на приведенном примере, рассмотрим обобщение псевдоисчерпывающих тестов $PExT(2, 4)$ на случай тестов $PExT(2, r)$ произвольной разрядности $r > 2$. В соответствии с Утверждением 1 для $k = 2$ и произвольной разрядности $r > 2$ количество псевдоисчерпывающих тестов определяется числом значений константы c , принадлежащих диапазону, задаваемому неравенством $0 \leq c \leq r - 2$. Соответственно для $k = 2$ можно синтезировать $r - 1$ тест $PExT_c(2, r)$ для различных значений константы c . Основой для построения каждого из указанных тестов являются веса w тестовых наборов, определяемых для каждого значения $c \in \{0, 1, 2, \dots, r - 2\}$, которые соответствуют решениям линейного сравнения $w = c \pmod{r - 1}$. Соответственно $PExT_0(2, r)$ будет включать один набор, состоящий из r нулей, вес w которого равен нулю, и r наборов, для каждого из которых $w = r - 1$. В качестве примера в табл. 2 приведен тест $PExT_0(2, r)$ для $r = 4$. Следующее решение линейного сравнения для $c = 1$ определяет два значения веса w , а именно $w = 1$ и $w = r$, которые определяют веса наборов для теста $PExT_1(2, r)$, пример которого для $r = 4$ приведен в табл. 2. Последующие $r - 3$ тесты (конкретно $PExT_2(2, r); PExT_3(2, r); \dots; PExT_{r-2}(2, r)$) задаются полным множеством наборов, вес которых определяется значением константы c и соответствует индексу теста. Для того же примера тест $PExT_2(2, 4)$ с индексом 2, синтезированный для $c = 2$, состоит из всего множества наборов с весом 2 (табл. 2). Количественно тесты $PExT_0(2, r)$ и $PExT_1(2, r)$ состоят из $r + 1$ наборов каждый, а все последующие тесты включают такое количество наборов, которое определяется числом сочетаний из n по c , например, количество сочетаний из 4 по 2 определяет число наборов, равное 6, для теста $PExT_2(2, 4)$, приведенного в табл. 2. Для любого псевдоисчерпывающего теста $PExT_c(2, r)$, $c \in \{0, 1, 2, \dots, r - 2\}$, выполняется весьма важное свойство, сформулированное в Утверждении 2.

Утверждение 2. Для произвольного целого $r > 2$ и любого значения константы $c \in \{0, 1, 2, \dots, r - 2\}$ псевдоисчерпывающий тест $PExT_c(2, r)$ имеет значение $\min HD(T_i, T_j) = 2$.

Доказательство. Первоначально рассмотрим случай, когда $c = 0$. Используя терминологию технической диагностики, тест $PExT_0(2, r)$ можно описать как тест, состоящий из r -разрядного двоичного набора T_0 , представленного нулевыми значениями, и как тест «бегущий ноль», включающий наборы $T_1, T_2, T_3, \dots, T_r$. Каждый из наборов теста «бегущий ноль» включает $r - 1$ единичных значений и одно нулевое, как это видно на примере теста $PExT_0(2, 4)$, приведенного в табл. 2. Учитывая, что $r > 2$, расстояние Хэмминга $HD(T_0, T_j)$, где $j \in \{1, 2, 3, \dots, r\}$, между нулевым набором T_0 и произвольным набором T_j теста «бегущий ноль» составит $r - 1 \geq 2$. Значение $HD(T_i, T_j)$, $i \neq j \in \{1, 2, 3, \dots, r\}$, между любыми двумя наборами теста «бегущий ноль» равняется двум, так как два их разряда с нулевыми значениями не совпадают. Таким образом, можно заключить, что при $c = 0$ для теста $PExT_0(2, r)$ выполняется равенство $\min HD(T_i, T_j) = 2$.

Для следующего значения константы $c = 1$ псевдоисчерпывающий тест $PExT_1(2, r)$ состоит из набора $T_0 = 111\dots 1$ и теста «бегущая единица», представленного наборами $T_1, T_2, T_3, \dots, T_r$. Очевидно, что указанный тест состоит из инверсных значений наборов теста $PExT_0(2, r)$. Соответственно, используя свойство расстояния Хэмминга $HD(T_i, T_j) = HD(\bar{T}_i, \bar{T}_j)$, можно заключить, что и для $PExT_1(2, r)$ значение $\min HD(T_i, T_j)$ равняется 2. Все последующие тесты $PExT_2(2, r), PExT_3(2, r), \dots, PExT_{r-2}(2, r)$ включают наборы одного неизменного веса $w = c$, который определяется индексами 2, 3, ..., $r - 2$ теста. Например, тест $PExT_2(2, r)$ состоит из всевозможных наборов, вес w которых равен 2. Поскольку $c \leq r - 2$, в любом из указанных тестов будут присутствовать тестовые наборы, содержащие не менее двух нулевых значений, а их количество, так же, как и количество единичных, во всех наборах конкретного теста одинаково. Для отличающихся тестовых наборов $T_i \neq T_j$ одинакового веса, принадлежащего диапазону $2 \leq w \leq r - 2$, расстояние Хэмминга $HD(T_i, T_j) \neq 0$ в силу их отличия. Кроме того, $HD(T_i, T_j) \neq 1$, так как для двух наборов $T_i \neq T_j$ с одинаковым количеством единичных значений и не менее двух нулевых значений наборы T_i и T_j отличаются друг от друга как минимум в двух разрядах. Соответственно расстояние Хэмминга $HD(T_i, T_j) \geq 2$. Таким образом, для псевдоисчерпывающих тестов $PExT_2(2, r), PExT_3(2, r), \dots, PExT_{r-2}(2, r)$, как и для тестов $PExT_0(2, r), PExT_1(2, r)$, справедливо $\min HD(T_i, T_j) = 2$. Что и требовалось доказать.

Для общего случая тесты $PExT_c(2, r)$ можно рассматривать как шаблоны $CRT(q_c, 2, r)$ для построения управляемых вероятностных тестов $CRT(q_c, 2 \cdot \lfloor n/r \rfloor, n)$, согласно методике,

рассмотренной в предыдущем разделе статьи [8, 11]. Единственным отличием является вариативность количества q_c тестовых наборов в зависимости не только от разрядности r шаблона, но и от выбранного в качестве шаблона теста $PExT_c(2, r)$. Соответственно результирующий тест $CRT(q_c, 2 \cdot \lfloor n/r \rfloor, n)$ будет состоять из такого же количества наборов q_c , как и шаблон, использованный для его построения. Количество q_c вычисляется согласно соотношению:

$$q_c = \begin{cases} r + 1, & \text{для } c = 0, c = 1; \\ \binom{r}{c}, & \text{для } c = 2, 3, \dots, r - 2. \end{cases} \quad (2)$$

В качестве примера использования псевдоисчерпывающих тестов $PExT_c(2, r)$ как шаблонов рассмотрим случай, когда $r = 6$. В табл. 3 приведены примеры шаблонов $CRT(q_c, 2, 6)$ для указанного значения r .

Таблица 3. Примеры шаблонов на базе псевдоисчерпывающих тестов $PExT_c(2, 6)$
Table 3. Examples of templates based on pseudo-exhaustive tests $PExT_c(2, 6)$

$CRT(7, 2, 6) = PExT_0(2, 6)$		$CRT(7, 2, 6) = PExT_1(2, 6)$		$CRT(15, 2, 6) = PExT_2(2, 6) = PExT_4(2, 6)$				$CRT(20, 2, 6) = PExT_3(2, 6)$			
T_0	000000	T_0	100000	T_0	110000	T_{10}	001010	T_0	111000	T_{10}	011100
T_1	011111	T_1	010000	T_1	101000	T_{11}	001001	T_1	110100	T_{11}	011010
T_2	101111	T_2	001000	T_2	100100	T_{12}	000110	T_2	110010	T_{12}	011001
T_3	110111	T_3	000100	T_3	100010	T_{13}	000101	T_3	110001	T_{13}	010110
T_4	111011	T_4	000010	T_4	100001	T_{14}	000011	T_4	101100	T_{14}	010101
T_5	111101	T_5	000001	T_5	011000			T_5	101010	T_{15}	010011
T_6	111110	T_6	111111	T_6	010100			T_6	101001	T_{16}	001110
				T_7	010010			T_7	100110	T_{17}	001101
				T_8	010001			T_8	100101	T_{18}	001011
				T_9	001100			T_9	100011	T_{19}	000111

Как видно из табл. 3, примеры шаблонов характеризуются различным количеством тестовых наборов q_c , число которых соответствует соотношению (2). Действительно, согласно (2), управляемый вероятностный тест $CRT(15, 2, 6)$, соответствующий псевдоисчерпывающим тестам $PExT_2(2, 6)$ и $PExT_4(2, 6)$, будет содержать $q_c = 15$ тестовых наборов, в то время как тесты, построенные на $PExT_0(2, 6)$ и $PExT_1(2, 6)$, состоят из 7 наборов. Данное обстоятельство так же, как и содержание шаблонов, состоящих из наборов с фиксированными весами, сопряжено с ограничениями при синтезе управляемых вероятностных тестов. Возможны две крайние ситуации. Первая – построение тестов $CRT(q_c, 2 \cdot \lfloor n/r \rfloor, n)$ с максимальным количеством тестовых наборов q_c , которые достигаются для $c = r/2$, если r четно, а также для $c = \lfloor r/2 \rfloor$ и $c = \lceil r/2 \rceil$ для нечетных r . Однако в этом случае структура тестовых наборов, а именно их неизменные веса, может существенно сказаться на обнаруживающей способности таких тестов. Вторая ситуация заключается в формировании $CRT(q_c, 2 \cdot \lfloor n/r \rfloor, n)$ с минимальным количеством тестовых наборов $q_c = r + 1$. В данном случае возможно построение теста, состоящего из наборов, веса которых принимают различные значения. Это достигается тем, что результирующий управляемый вероятностный тест $CRT(q_c, 2 \cdot \lfloor n/r \rfloor, n)$ строится с использованием шаблонов $CRT(q_c, 2, r)$ либо их фрагментов, состоящих из $r + 1$ наборов, для разных значений константы c . Здесь процедура построения управляемых вероятностных тестов $CRT(q_c, 2 \cdot \lfloor n/r \rfloor, n)$ на базе псевдоисчерпывающих тестов $PExT_c(2, r)$ для произвольной разрядности n двоичных наборов позволяет сформировать один из подобных тестов, общее количество которых определяется соотношением:

$$Q_{CRT} = \begin{cases} (2 \cdot (r + 1)!)^{\lfloor n/r \rfloor}, & r = 3; \\ \left(\left(2 + \sum_{c=2}^{r-2} \binom{r}{c} \right) \cdot (r + 1)! \right)^{\lfloor n/r \rfloor}, & r > 3. \end{cases} \quad (3)$$

Как видно из (3), число управляемых вероятностных тестов, построенных на основании $PExT_c(2, r)$, велико. Пример одного из таких тестов для случая $n = 12$ и $r = 4$, построенного на основании тестов $PExT_c(2, 4)$ при c , равном 0, 1 и 2 (табл. 2), представлен в табл. 4.

Таблица 4. Управляемый вероятностный тест $CRT(5, 6, 12)$
Table 4. Controlled random test $CRT(5, 6, 12)$

$CRT(q_c, 2 \cdot \lfloor n/r \rfloor, n) = CRT(5, 6, 12)$												
T_0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1
T_1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
T_2	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
T_3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0
T_4	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0

Основываясь на минимальном количестве $q_c = 5$ наборов, первые четыре разряда теста $CRT(5, 6, 12)$ формируем путем перестановки наборов $PExT_0(2, 4)$, а последующие четыре генерируем с использованием $PExT_1(2, 4)$ (табл. 4). Остальные наборы определены пятью из шести наборов теста $PExT_2(2, 4)$, веса w которых равняются 2. Как видно из табл. 4, $\min HD(T_i, T_j)$ для теста $CRT(5, 6, 12)$ равняется 6.

Оценка эффективности применения управляемых вероятностных тестов

Эффективность управляемых вероятностных тестов традиционно принято сравнивать с эффективностью вероятностных тестов, состоящих из такого же количества тестовых наборов [2, 3]. Для запоминающих устройств (ЗУ) применение вероятностных тестов, состоящих из l наборов, позволяет достичь полноты покрытия $FC_{Test}(Fault, l)$ их неисправностей $Fault$, оцениваемой выражением из [8, 12]. В случае ЗУ случайный тестовый набор применяется в качестве начального состояния его ячеек, а под сложными их неисправностями понимаются кодочувствительные неисправности $PNPSFk$, где k обозначает количество произвольных ячеек, участвующих в неисправном поведении ЗУ емкостью n бит [2, 8, 12]. Известно, что независимо от первоначального состояния ЗУ полнота покрытия маршевого теста, например, $MATS++$, $FC_{MATS++}(PNPSFk, l)$, определяемая как отношение обнаруженных неисправностей к их общему числу, принимает постоянное значение. Для $PNPSF3$ это значение – $FC_{MATS++}(PNPSF3) = 25\%$ [2, 8, 12]. Проанализирована способность l -кратного теста $MATS++$ обнаруживать неисправности $PNPSFk$ при использовании случайных состояний ячеек ЗУ (Random) и состояний, определяемых тестами $CRT(13, 2, 12)$, $CRT(7, 4, 12)$, $CRT(5, 6, 12)$. Указанные тесты являются результатом применения предлагаемой авторами статьи методики, рассмотренной в предыдущем разделе, и описываются как $CRT(13, 2, 12) = PExT_0(2, 12)$, $CRT(7, 4, 12) = PExT_0(2, 6) + PExT_1(2, 6)$, $CRT(5, 6, 12) = PExT_0(2, 4) + PExT_1(2, 4) + PExT_2(2, 4)$. Тест $CRT(5, 6, 12)$, состоящий из пяти тестовых наборов, представлен в табл. 5.

Таблица 5. Полнота покрытия $FC_{MATS++}(PNPSF3, l)$ (%) неисправностей $PNPSF3$
Table 5. The faults coverage $FC_{MATS++}(PNPSF3, l)$ (%) of $PNPSF3$ faults

T_i	T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	...	T_{11}	T_{12}
Random	25	43,75	57,81	68,35	76,27	82,20	86,65	89,98	...	96,83	97,62
$CRT(13, 2, 12)$	25	32,95	37,50	41,67	45,83	50,00	54,17	58,33	...	75,00	100,00
$CRT(7, 4, 12)$	25	39,39	48,86	56,82	64,77	72,73	95,45	–	...	–	–
$CRT(5, 6, 12)$	25	44,32	59,09	72,35	90,15	–	–	–	...	–	–

Приведенные в табл. 5 результаты подтверждают гипотезу о существенном преимуществе управляемых вероятностных тестов над вероятностными тестами, заключающемся в большей эффективности обнаружения сложных неисправностей ЗУ, таких как $PNPSF3$. При сравнении рассматривается суммарная полнота покрытия для одинаковой длины q сравниваемых тестов. Заметно большая покрывающая способность наблюдается для малых значений r , когда q принимает небольшие величины. Например, как это видно из табл. 5, для построения теста $CRT(5, 6, 12)$, представленного в табл. 4, использовались псевдоисчерпывающие тесты для $r = 4$. В случае $CRT(7, 4, 12)$ $r = 6$, а для $CRT(13, 2, 12)$ – $r = 12$.

Заключение

1. Представлен метод построения управляемых вероятностных тестов на базе исчерпывающих и псевдоисчерпывающих тестов путем масштабирования исходных шаблонов до требуемой разрядности тестовых наборов.

2. На примере оперативного запоминающего устройства показана эффективность управляемых вероятностных тестов, построенных с применением подхода, предложенного авторами, по сравнению с вероятностными тестами.

3. Дальнейшие исследования целесообразно расширить в части свойств предложенного метода и его использования для различных задач тестового диагностирования вычислительных систем и их компонентов. Наиболее интересным представляется применение рассмотренного метода формирования управляемых вероятностных тестов для тестирования программного обеспечения.

Список литературы

1. Arcuri, A. Random Testing: Theoretical Results and Practical Implications / A. Arcuri, M. Z. Iqbal, L. Briand // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2011. Vol. 38, No 2. P. 258–277.
2. Ярмолик, В. Н. Контроль и диагностика вычислительных систем / В. Н. Ярмолик. Минск: Бестпринт, 2019.
3. A Survey on Adaptive Random Testing / R. Huang [et al.] // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2021. Vol. 47, No 10. P. 2052–2083.
4. Ярмолик, В. Н. Мера различия для управляемых вероятностных тестов / В. Н. Ярмолик, В. В. Петровская, Н. А. Шевченко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 76–83. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-76-83>.
5. Malaiya, Y. K. Antirandom Testing: Getting the Most Out of Black-Box Testing / Y. K. Malaiya // *Proc. of International Symposium on Software Reliability Engineering*. Toulouse, France, Oct. 24–27, 1995. P. 86–95.
6. Hartman, A. Problems and Algorithms for Covering Arrays / A. Hartman, L. Raskin // *Discrete Mathematics*. 2004. Vol. 284, No 1–3. P. 149–156.
7. Ярмолик, С. В. Итеративные почти псевдоисчерпывающие вероятностные тесты / С. В. Ярмолик, В. Н. Ярмолик // *Информатика*. 2010. Т. 26, № 2. С. 66–75.
8. Построение управляемых вероятностных тестов с заданным расстоянием Хэмминга / В. Н. Ярмолик [и др.] // *Цифровая трансформация*. 2024. Т. 30, № 4. С. 62–72. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-4-62-72>.
9. The Combinatorial Design Approach to Automatic Test Generation / D. M. Cohen [et al.] // *IEEE Software*. 1996. Vol. 13, No 5. P. 83–88.
10. Tang, D. T. Exhaustive Test Pattern Generation with Constant Weight Vectors / D. T. Tang, L. S. Woo // *IEEE Transactions on Computers*. 1983. Vol. C–32, No 12. P. 1145–1150.
11. Управляемые вероятностные тесты с фиксированным минимальным значением расстояния Хэмминга / В. Н. Ярмолик [и др.] // *Информатика*. 2025. Т. 22, № 1. С. 7–26.
12. Построение и применение маршевых тестов для обнаружения кодочувствительных неисправностей запоминающих устройств / В. Н. Ярмолик [и др.] // *Информатика*. 2021. Т. 18, № 1. С. 25–42. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-25-42>.

Поступила 26.01.2025

Принята в печать 24.02.2025

References

1. Arcuri A., Iqbal M. Z., Briand L. (2011) Random Testing: Theoretical Results and Practical Implications. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 38 (2), 258–277.
2. Yarmolik V. N. (2019) *Computer Systems Testing and Diagnoses*. Minsk, Bestprint (in Russian).
3. Huang R., Sun W., Xu Y., Chen H., Towey D., Xia X. (2021) A Survey on Adaptive Random Testing. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 47 (10), 2052–2083.
4. Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Shauchenka M. A. (2024) Difference Measure for Controlled Random Tests. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 76–83. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-76-83> (in Russian).
5. Malaiya Y. K. (1995) Antirandom Testing: Getting the Most Out of Black-Box Testing. *Proceedings of International Symposium on Software Reliability Engineering, Toulouse, France, Oct. 24–27*. 86–95.
6. Hartman A., Raskin L. (2004) Problems and Algorithms for Covering Arrays. *Discrete Mathematics*. 284 (1–3), 149–156.

7. Yarmolik S. V., Yarmolik V. N. (2010) Iterative Near Pseudoexhaustive Random Tests. *Informatics*. 26 (2), 66–75 (in Russian).
8. Yarmolik V. N., Demenkovets D. V., Levantsevich V. A., Petrovskaya V. V. (2024) Design of Controlled Random Tests with the Given Hamming Distance. *Digital Transformation*. 30 (4), 62–72. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-4-62-72> (in Russian).
9. Cohen D., Dalal S. R., Parelius J., Patton G. C. (1996) The Combinatorial Design Approach to Automatic Test Generation. *IEEE Software*. 13 (5), 83–88.
10. Tang D. T., Woo L. S. (1983) Exhaustive Test Pattern Generation with Constant Weight Vectors. *IEEE Transactions on Computers*. C-32 (12), 1145–1150.
11. Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Demenkovets D. V., Levantsevich V. A. (2025) Controlled Random Tests with Fixed Minimal Hamming Distance. *Informatics*. 22 (1), 7–26 (in Russian).
12. Yarmolik V. N., Levantsevich V. A., Demenkovets D. V., Mrozek I. (2021) Construction and Application of March Tests for Pattern Sensitive Memory Faults Detection. *Informatics*. 18 (1), 25–42. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-25-42> (in Russian).

Received: 26 January 2025

Accepted: 24 February 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Ярмолик В. Н., д-р техн. наук, проф., проф. каф. программного обеспечения информационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Петровская В. В., магистр техн. наук каф. программного обеспечения информационных технологий, БГУИР

Шевченко Н. А., студ., Дармштадтский технический университет

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 769-96-77
E-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Ярмолик Вячеслав Николаевич

Information about the authors

Yarmolik V. N., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Information Technology Software, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Petrovskaya V. V., Master Sci. (Tech.) at the Department of Information Technology Software, BSUIR

Shauchenka M. A., Student, Darmstadt Technical University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 769-96-77
E-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Yarmolik Vyacheslav Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-101-108>

УДК 004.021

ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРЯМОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РУКОПИСНЫХ ЦИФР НА БАЗЕ FPGA

Е. А. КРИВАЛЬЦЕВИЧ, М. И. ВАШКЕВИЧ

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

Аннотация. Разработана аппаратная реализация на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа Field Programmable Gate Array однослойной нейронной сети прямого распространения для распознавания рукописных цифр. Исследовано влияние разрядности коэффициентов сети на точность распознавания и на аппаратные затраты ПЛИС. Обучение нейронной сети выполнялось с помощью базы рукописных цифр MNIST. Прототип нейронной сети был реализован в виде IP-ядра на отладочной плате ZYBO Z7. Разработанный прототип использовался для выполнения экспериментов с различной разрядностью представления коэффициентов нейронной сети. Построены графики точности распознавания и количества аппаратных ресурсов ПЛИС в зависимости от разрядности представления коэффициентов нейронной сети. Выполнен анализ полученных в результате обучения нейронной сети коэффициентов с использованием разложения на битовые плоскости. Показано, что для представления коэффициентов нейронной сети достаточно 5 разрядов, поскольку они содержат основную, усвоенную сетью, информацию, обеспечивая экономное расходование ресурсов ПЛИС и высокую точность распознавания (92,4 %).

Ключевые слова: нейронная сеть, распознавание рукописных цифр, полносвязный слой, MNIST, FPGA, битовые плоскости.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кривальцевич, Е. А. Исследование аппаратной реализации нейронной сети прямого распространения для распознавания рукописных цифр на базе FPGA / Е. А. Кривальцевич, М. И. Вашкевич // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 101–108. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-101-108>.

INVESTIGATION OF HARDWARE IMPLEMENTATION OF A FEEDFORWARD NEURAL NETWORK FOR HANDWRITTEN DIGIT RECOGNITION BASED ON FPGA

EGOR A. KRIVALCEVICH, MAXIM I. VASHKEVICH

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

Abstract. A hardware implementation based on Field Programmable Gate Array (FPGA) of a single-layer feedforward neural network for handwritten digit recognition has been developed. The effect of the network coefficient bit depth on the recognition accuracy and FPGA hardware costs has been studied. The neural network was trained using the MNIST handwritten digit database. The neural network prototype was implemented as an IP core on the ZYBO Z7 debug board. The developed prototype was used to perform experiments with different bit depths of neural network coefficient representation. Graphs of recognition accuracy and the amount of FPGA hardware resources depending on the bit depth of neural network coefficient representation have been constructed. The coefficients obtained as a result of neural network training have been analyzed using decomposition into bit planes. It has been shown that 5 bits are sufficient to represent neural network coefficients, since they contain the main information learned by the network, ensuring economical use of FPGA resources and high recognition accuracy (92.4 %).

Keywords: neural network, handwritten digit recognition, fully connected layer, MNIST, FPGA, bit planes.

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

For citation. Krivalcevich E. A., Vashkevich M. I. (2025) Investigation of Hardware Implementation of a Feed-forward Neural Network for Handwritten Digit Recognition Based on FPGA. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 101–108. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-101-108> (in Russian).

Введение

Нейронные сети (НС) играют ключевую роль в развитии информационных технологий, особенно в таких областях, как компьютерное зрение и искусственный интеллект [1]. Широкое распространение НС приводит к тому, что появляется необходимость создания специальных аппаратных акселераторов, позволяющих повысить производительность приложений, основанных на нейросетевых технологиях. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) типа FPGA (Field Programmable Gate Array) представляют собой реконфигурируемые вычислительные платформы, имеющие невысокое энергопотребление. По этой причине ПЛИС часто выбирают в качестве вычислительной среды для реализации НС, особенно в тех случаях, когда производительности процессоров общего назначения недостаточно, а высокое энергопотребление графических процессоров неприемлемо. Это особенно актуально в контексте разработки встраиваемых систем и роботизированных платформ [1–3].

К преимуществам аппаратной реализации НС на базе ПЛИС относится возможность изменять пользовательские типы данных, позволяющие контролировать точность представления параметров нейросетевой модели [2]. Причем выбор точности представления напрямую будет влиять на аппаратные затраты ПЛИС, необходимые для обеспечения выполнения операций над данными.

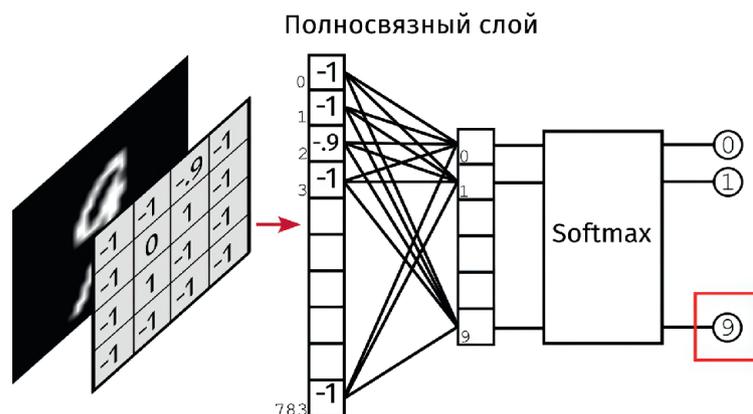
Цель исследований авторов – разработка аппаратной реализации однослойной НС прямого распространения для распознавания рукописных цифр, а также изучение влияния разрядности коэффициентов НС на точность распознавания и на аппаратные затраты ПЛИС. Для обучения НС использовалась база изображений рукописных цифр MNIST, которая является наиболее доступной и удобной для исследовательской задачи.

Процесс разработки и исследование аппаратной реализации НС разбивался на несколько этапов. На первом выполнялись разработка и обучение модели с использованием языка Python и библиотеки PyTorch. На втором этапе разрабатывались архитектура и описание IP-блока НС с применением языка SystemVerilog. На третьем проводилось прототипирование НС на отладочной плате ZYBO Z7. На заключительном этапе выполнялись эксперимент и анализ полученных результатов.

Разработка программной модели нейронной сети

Рассматривалась задача распознавания рукописных цифр по изображениям из набора данных MNIST, который содержал 70 тыс. полутоновых изображений размерами 28×28 пикселей рукописных цифр – от 0 до 9 [4]. Набор разбит на две части выборки: тренировочная и тестовая – 60 тыс. и 10 тыс. изображений соответственно. Использовалась однослойная НС прямого распространения, состоящая из полносвязного слоя с выходной функцией активации softmax [5]. Структура НС представлена на рис. 1.

Рис. 1. Структура нейронной сети
Fig. 1. Structure of a neural network



На входе имеется $784 = 28 \times 28$ нейрона, каждый подключен к одному из пикселей изображения. На выходе получается слой с десятью нейронами по одному на каждую цифру. Каждый из 10 выходов формируется как линейная комбинация 784 входов:

$$y_i = \text{softmax} \left(\sum_{j=0}^{783} w_{ij} x_j + b_i \right), \quad (1)$$

где y_i – вероятность того, что поданное на вход изображение относится к классу i ; w_{ij} – весовой коэффициент, определяющий влияние j -го пикселя входного изображения на вероятность отнесения входного изображения к i -му классу; x_j – j -й пиксель изображения; b_i – смещение (свободный член), $i = 0, \dots, 9$.

Матрицу размерами 10×784 , составленную из весовых коэффициентов w_{ij} , будем называть матрицей весов и обозначать через W . В процессе обучения НС использовался метод стохастического градиентного спуска [5, 6], который имеет два настроечных параметра: скорость обучения α и параметр инерции γ :

$$v_t = \gamma v_{t-1} + \alpha \nabla L; \quad (2)$$

$$W_t = W_{t-1} - v_t, \quad (3)$$

где v_t – скорректированный градиент с учетом параметра инерции; ∇L – градиент функции потерь; W_t – матрица весов НС на текущем шаге t .

В качестве функции потерь использовалась перекрестная энтропия

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{i=0}^9 t_i^{(n)} \log(y_i^{(n)}), \quad (4)$$

где $t_i^{(n)}$ – i -я компонента метки n -го изображения, представленной в унитарном коде; N – количество изображений в базе.

Для обучения НС входные данные нормировались таким образом, чтобы среднеквадратическое отклонение равнялось 0,5. Масштабирование данных улучшает производительность и ускоряет процесс обучения НС. Обучение выполнялось на 10 тыс. эпохах, параметр скорости обучения α устанавливался равным 0,003, а инерции – $\gamma = 0,9$, что позволило ускорить сходимость процесса и избежать застревания в локальных минимумах функции потерь. На рис. 2 изображен график функции потерь, который показывает, что процесс оптимизации параметров НС сошелся и дальнейших итераций обучения не требуется.



Рис. 2. Результаты обучения нейронной сети
Fig. 2. Neural network training results

Аппаратная реализация нейронной сети на FPGA

На начальном этапе была разработана структура IP-блока НС, показанная на рис. 3. Вычислительной основой разработанного устройства являлись десять МАС (Multiply-Accumulate Operation) ядер, выполняющих умножение вектора изображения на матрицу весов НС и объединенных в общий блок полносвязного слоя. Выбор именно десяти МАС-ядер определяется числом распознаваемых классов изображения, в общем случае расчет выходных значений полносвязного слоя может быть выполнен с использованием произвольного числа МАС-ядер. Однако выбор десяти МАС-ядер позволяет существенно упростить устройство управления. Для реализации умножителя МАС-ядра была выбрана матричная структура. IP-блок использовался как компонент системы на кристалле. Прием/передача данных и управление устройством осуществлялись посредством регистрового файла, который имеет uP-интерфейс.

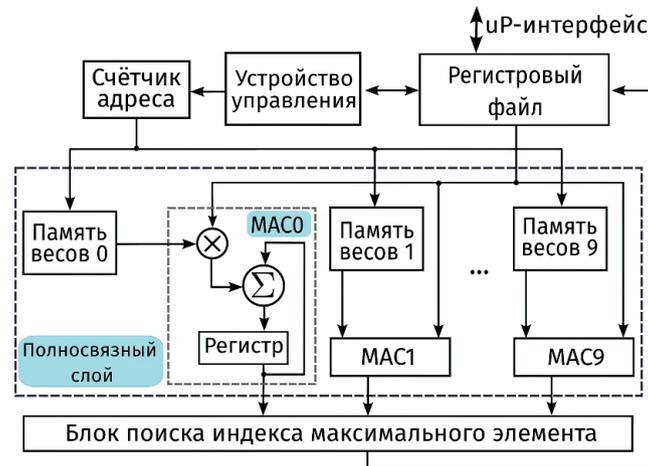


Рис. 3. Структура IP-блока нейронной сети
Fig. 3. Structure of the IP block of the neural network

По uP-интерфейсу от процессорной системы (ПС) в IP-блок последовательно поступают пиксели изображения. Значение очередного пикселя изображения подается на входы всех MAC-ядер, одновременно с этим устройство управления увеличивает значение счетчика, который указывает адрес текущего коэффициента НС, хранящегося в памяти. Каждое MAC-ядро производит 784 операции умножения значения пикселя на соответствующий весовой коэффициент НС. В результате расчета формируется массив из десяти элементов, представляющий выходные данные слоя. Далее полученный массив поступает на вход блока поиска индекса максимального элемента (на рис. 4 обозначен как «Индекс макс.»). В данном блоке происходит сравнение всех входных значений и осуществляется выбор наибольшего элемента массива, индекс которого передается на выход в качестве результата распознавания. Найденное число передается обратно в ПС, используя uP-интерфейс. Общая структура разработанной системы для распознавания рукописных цифр на базе отладочной платы Zybo Z7 представлена на рис. 4.

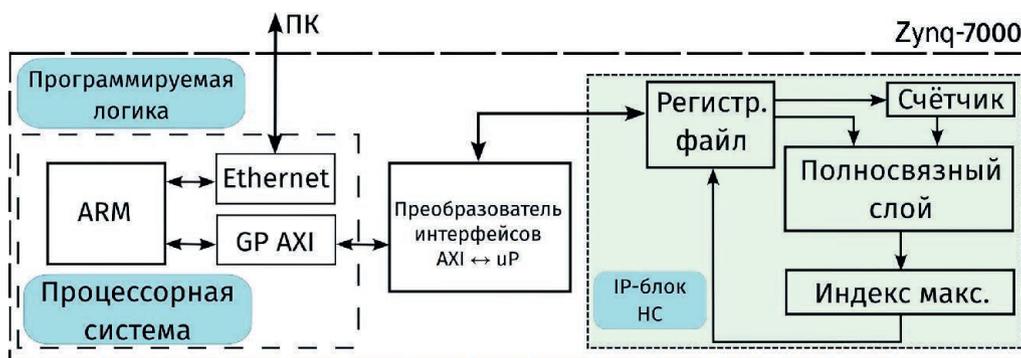


Рис. 4. Структура системы для распознавания рукописных цифр на базе отладочной платы Zybo Z7
Fig. 4. Structure of the system for handwritten digit recognition based on the Zybo Z7 debug board

Процессорная система состоит из процессора ARM Cortex-A9, контролера Ethernet для связи с персональным компьютером (ПК) и блока GP AXI для соединения по AXI-интерфейсам с другими блоками, расположенными в области программируемой логики кристалла Zynq-7000. Для соединения ПС с разработанным IP-блоком использовался преобразователь интерфейса uP в AXI4-Lite. ПС работает под управлением операционной системы Linux (PYNQ), на которой запущено ядро Jupyter Notebook. Python-библиотека PYNQ позволяет получить доступ к адресному пространству процессорной системы, на которое отображены регистры разработанного IP-блока. Таким образом, в представленном прототипе есть возможность подавать тестовые изображения непосредственно на аппаратный блок из блокнота Jupyter, что дает большую гибкость при отладке и тестировании проекта.

Экспериментальные исследования и их результаты

На этапе тестирования исследовалось влияние разрядности весовых коэффициентов на точность распознавания цифр и на аппаратные затраты FPGA. Разрядность коэффициентов НС изменялась от 2 до 16 бит. Для каждой разрядности производилась подача на НС всех 10 тыс. тестовых изображений базы MNIST. Для анализа полученных результатов выполнялось построение матрицы ошибок, которая показывает точность определения цифр в процентном соотношении. На рис. 5 представлен пример матрицы ошибок.

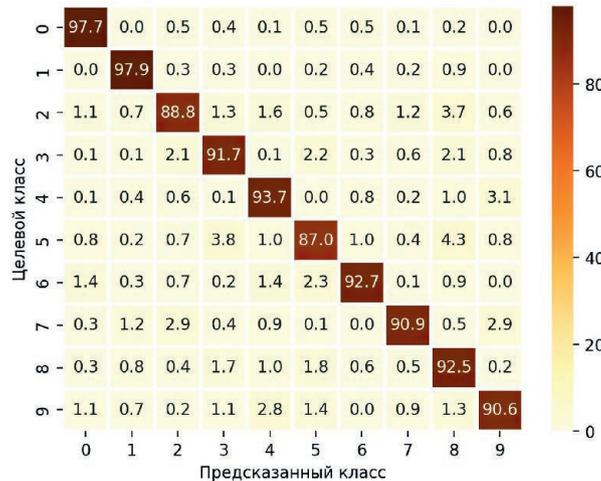


Рис. 5. Матрица ошибок для 5-разрядного представления весов нейронной сети
Fig. 5. Confusion matrix for 5-bit representation of neural network weights

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что цифра 1 распознается НС лучше всего (точность – 97,9%), хуже всего происходит распознавание цифры 5 (точность – 87,0%), чаще всего НС путает цифру пять с восьмеркой (4,3 %) и тройкой (3,8 %). Общая точность распознавания – 92,4 %, что на 2,0 % больше, чем в [3], где рассматривалась FPGA-реализация сверточной НС.

Исследование аппаратных затрат осуществлялось на основе отчетов о размещении проекта на FPGA, полученных в среде Xilinx Vivado. Анализ аппаратных затрат при различной разрядности весовых коэффициентов НС показал, что при уменьшении разрядности уменьшается число требуемых для реализации НС блоков LUT (Look-Up Tables) и FF (триггеров). Полученные результаты экспериментов представлены на рис. 6, где показаны точность распознавания, количество использованных элементов LUT и FF в зависимости от разрядности коэффициентов НС.

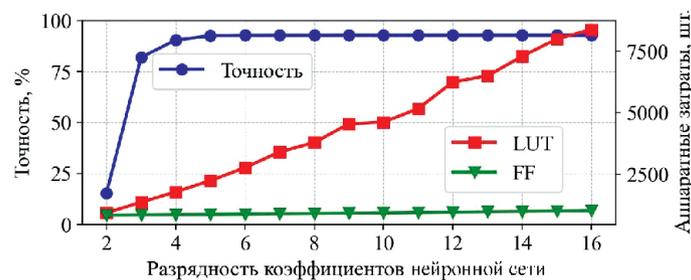


Рис. 6. Точность и аппаратные затраты на реализацию нейронной сети в зависимости от разрядности коэффициентов нейронной сети
Fig. 6. Accuracy and hardware costs for the implementation of a neural network depending on the bit depth of the neural network coefficients

Из рис. 6 видно, что с двухразрядного до пятиразрядного представления весовых коэффициентов наблюдается скачкообразный прирост в точности. Начиная с разрядности 5 и до разрядности 16 график точности принимает линейный вид, что свидетельствует об отсутствии значительных изменений в точности. График зависимости количества используемых триггеров FF от разрядности коэффициентов НС имеет вид практически горизонтальной прямой, что свидетельствует о незначительном влиянии разрядности на их количество. График зависимости ко-

личества блоков LUT постоянно растет с увеличением разрядности, что связано с увеличением размера умножителя и сумматора, которые используются в MAC-ядрах.

Затраты для платы Zybo Z7 из семейства FPGA Xilinx Zynq-7000 и пятиразрядного представления весовых коэффициентов НС приведены в табл. 1.

Таблица 1. Аппаратные затраты на реализацию нейронной сети на FPGA Zybo Z7
Table 1. Hardware costs for implementing a neural network on FPGA Zybo Z7

Вариант блока	Количество блоков, шт.		Использование, %
	использованное	доступное	
Общие затраты			
LUT как логика	2180	17 600	12,39
LUT как память	60	6000	1,00
Триггеры	862	35 200	2,45
Блочная память	10	120	8,33
Затраты на MAC-ядро			
LUT как логика	155	17 600	0,88
Триггеры	11	35 200	0,03
Индекс макс.			
LUT как логика	276	17 600	1,57
Полносвязный слой			
LUT как логика	1685	17 600	9,57
Триггеры	126	35 200	0,36
Блочная память	10	120	8,33

Для того чтобы объяснить феномен сохранения точности распознавания при уменьшении разрядности коэффициентов (рис. 6), выполняли анализ матрицы весов НС с использованием разложения шаблонов, полученных нейронной сетью в результате обучения, на битовые плоскости. Для этого каждая строка матрицы весов преобразовывалась в изображение размерами 28×28 и каждый пиксель переводился к типу uint8. Затем изображение раскладывалось на битовые плоскости. В данном случае битовая плоскость – это двоичное изображение, сформированное из набора битов, занимающих одинаковую позицию в двоичном представлении значений пикселей изображения.

Обозначим через P_3 шаблон для цифры три, полученный из четвертой строки матрицы весов W . На рис. 7, a показан пример такого разложения шаблона P_3 , на рис. 7, b – вид шаблона P_3 , если в нем сохранить 1, 2 и т. д. значимых разрядов, используя операцию логического «И» с соответствующей битовой маской.

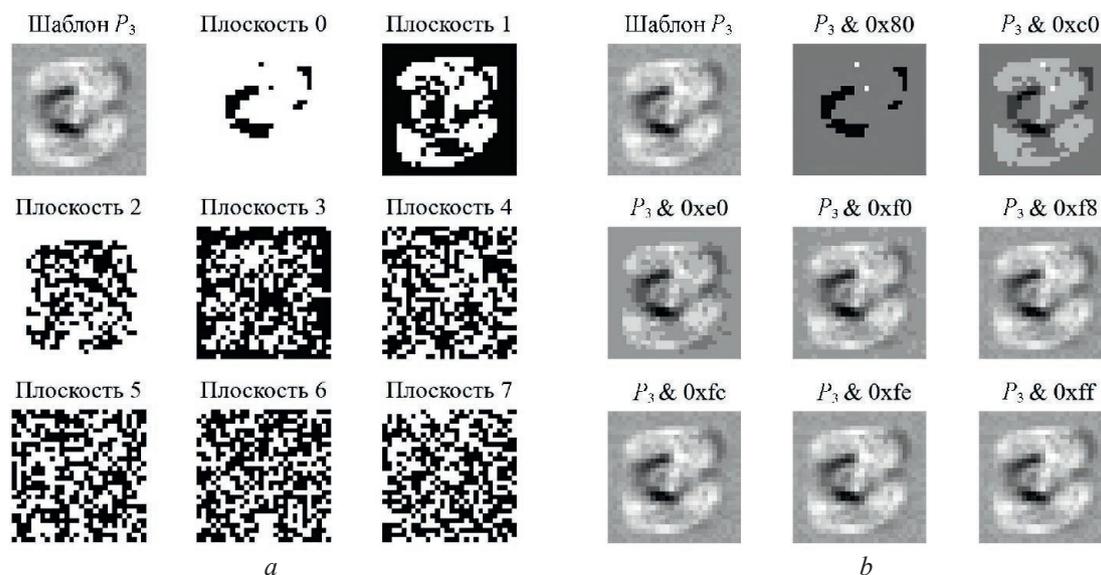


Рис. 7. Разложение весового ряда для цифры 3: a – на битовые плоскости; b – результат зануления части битовых плоскостей

Fig. 7. Decomposition of the weight series for the number 3: a – into bit planes; b – the result of zeroing out part of the bit planes

Из разложения, приведенного на рис. 7, видно, что основная информация об изображении находится в пяти первых битовых плоскостях, так как при добавлении остальных плоскостей существенные изменения на изображении не наблюдаются. Это указывает на то, что более высокая точность весовых коэффициентов будет избыточной, поскольку не несет дополнительной информации. Таким образом, наиболее оптимальной разрядностью, которая позволяет с высокой вероятностью правильно распознать цифры на изображении и не использовать избыточные аппаратные ресурсы FPGA, будет пять бит.

Заключение

1. Разработана структура IP-блока, реализующего нейронную сеть прямого распространения для распознавания рукописных цифр. Исследовано влияние разрядности весовых коэффициентов нейронной сети на точность распознавания цифр с использованием разработанного прототипа нейронной сети на базе отладочной платы Zybo Z7.

2. Для наглядной демонстрации объема информации, хранящейся в коэффициентах, использовали разложение весовых коэффициентов нейронной сети на битовые плоскости. Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что шестая и последующие битовые плоскости не несут полезной информации и не влияют на точность распознавания.

3. Получены зависимости аппаратных затрат FPGA от разрядности представления коэффициентов нейронной сети. Предлагается использовать пять бит для представления весовых коэффициентов нейронной сети при реализации на базе FPGA, поскольку такая разрядность, с одной стороны, позволяет понизить аппаратные затраты, а с другой – обеспечить высокую точность распознавания.

4. Исследование выполнено в рамках работы над научным проектом в лаборатории YADRO-БГУИР в 2024/2025 учебном году.

Список литературы

1. Mittal, S. A Survey of FPGA-Based Accelerators for Convolutional Neural Networks / S. Mittal // *Neural Computing and Applications*. 2020. Vol. 32, No 4. P. 1109–1139.
2. Ahmad, A. FFConv: An FPGA-Based Accelerator for Fast Convolution Layers in Convolutional Neural Networks / A. Ahmad, M. A. Pasha // *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*. 2020. Vol. 19, Iss. 2. P. 1–24.
3. FPGA Implementation of Hand-Written Number Recognition Based on CNN / D. Giardino [et al.] // *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2019. Vol. 9, No 1. P. 167–171.
4. Common Visual Data Foundation [Electronic Resource]. Mode of access: <https://github.com/cvdfoundation/mnist>.
5. Николенко, С. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадурин, Е. Архангельская. СПб.: Питер, 2019.
6. Samaragh, M. Customizing Neural Networks for Efficient FPGA Implementation / M. Samaragh, M. Ghasemzadeh, F. Koushanfar // *IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*. USA: California, 2017. P. 85–92.

Поступила 23.11.2024

Принята в печать 09.01.2025

References

1. Mittal S. (2020) A Survey of FPGA-Based Accelerators for Convolutional Neural Networks. *Neural Computing and Applications*. 32 (4), 1109–1139.
2. Ahmad A., Pasha M. A. (2020) FFConv: An FPGA-Based Accelerator for Fast Convolution Layers in Convolutional Neural Networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*. 19 (2), 1–24.
3. Giardino D., Matta M., Silvestri F., Spano S., Trobiani V. (2019) FPGA Implementation of Hand- Written Number Recognition Based on CNN. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 9 (1), 167–171.
4. Common Visual Data Foundation. Available: <https://github.com/cvdfoundation/mnist>.
5. Nikolenko S. I., Kadurin A. A., Arkhangelskaya E. V. (2019) *Deep Learning. A Dive Into the World of Networks*. Saint Petersburg, Peter Publishing House (in Russian).

6. Samaragh M., Ghasemzadeh M., Koushanfar F. (2017) Customizing Neural Networks for Efficient FPGA Implementation. *IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*. USA, California. 85–92.

Received: 23 November 2024

Accepted: 9 January 2025

Вклад авторов

Кривальцевич Е. А. реализовал и обучил нейронную сеть, выполнил аппаратную реализацию нейронной сети, провел экспериментальные исследования, подготовил рукопись статьи.

Вашкевич М. И. определил задачи, которые следовало решить в ходе проведения исследований, принимал участие в аппаратной реализации нейронной сети и тестировании на FPGA, участвовал в проведении экспериментальных исследований и интерпретации результатов эксперимента. Выполнил редактирование текста статьи.

Authors' contribution

Krivaltsevich E. A. implemented and trained the neural network, performed hardware implementation of the neural network, conducted experimental studies, prepared the manuscript of the article.

Vashkevich M. I. defined the tasks that had to be solved during the research, participated in the hardware implementation of the neural network and testing on FPGA, participated in conducting experimental studies and interpreting the experimental results. Edited the text of the article.

Сведения об авторах

Кривальцевич Е. А., студент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Вашкевич М. И., д-р техн. наук, проф. каф. электронных вычислительных средств, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-20
E-mail: vashkevich@bsuir.by
Вашкевич Максим Иосифович

Information about the authors

Krivaltsevich E. A., Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Vashkevich M. I., Dr. Sci. (Tech.), Professor at the Electronic Computing Facilities Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-20
E-mail: vashkevich@bsuir.by
Vashkevich Maxim Iosifovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-109-116>

УДК 004.056, 007.51

МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ УЧРЕЖДЕНИЙ ОБЩЕГО СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

В. А. ГЕРАСИМОВ¹, М. А. ГЕРАСИМОВА², А. П. КУЗНЕЦОВ³

¹Научно-исследовательский институт технической защиты информации (Минск, Республика Беларусь)

²Государственное учреждение образования «Средняя школа № 42 г. Минска»
(Минск, Республика Беларусь)

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Обоснована целесообразность внедрения системы электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры в систему общего среднего образования как средства цифровой трансформации этой системы и повышения эффективности образовательных процессов. Приведены результаты анализа процессов в системе общего среднего образования, в ходе реализации которых выполняется подписание документов. Описаны технологии, с помощью которых возможна отказоустойчивая и безопасная работа такой системы. Разработана схема интеграции системы электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры в информационную систему учреждения общего среднего образования. Обозначены проблемные вопросы, которые необходимо разрешать в ходе внедрения и использования схемы в системе общего среднего образования.

Ключевые слова: цифровая трансформация, облачная электронная цифровая подпись, система общего среднего образования, кибербезопасность.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Герасимов, В. А. Методика реализации системы электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры в информационных системах учреждений общего среднего образования / В. А. Герасимов, М. А. Герасимова, А. П. Кузнецов // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 109–116. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-109-116>.

THE METHODOLOGY OF IMPLEMENTING AN ELECTRONIC DIGITAL SIGNATURE SYSTEM BASED ON A VIRTUAL INFRASTRUCTURE IN THE INFORMATION SYSTEMS OF GENERAL SECONDARY EDUCATION INSTITUTIONS

VIACHESLAV A. GERASIMOV¹, MARYIA A. GERASIMOVA², ALEXANDR P. KUZNEZOV³

¹Research Institute for Technical Protection of Information (Minsk, Republic of Belarus)

²State Educational Institution “Secondary School No 42 of Minsk” (Minsk, Republic of Belarus)

³Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article substantiates the feasibility of implementing an electronic digital signature system based on a virtual infrastructure in the general secondary education system as a means of digital transformation of this system and increasing the efficiency of educational processes. The article presents the results of the analysis of processes in the general secondary education system, during the implementation of which documents are signed. The article describes the technologies that make fault-tolerant and secure operation of such a system possible. A scheme for integrating an electronic digital signature system based on a virtual infrastructure into the information

system of a general secondary education institution has been developed. The article identifies problematic issues that need to be resolved during the implementation and use of the scheme in the general secondary education system.

Keywords: digital transformation, cloud-based electronic digital signature, general secondary education system, cybersecurity.

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

For citation. Gerasimov V. A., Gerasimova M. A., Kuznezov A. P. (2025) The Methodology of Implementing an Electronic Digital Signature System Based on a Virtual Infrastructure in the Information Systems of General Secondary Education Institutions. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 109–116. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-109-116> (in Russian).

Введение

В современном мире цифровая трансформация охватывает преобладающее количество сфер жизни человека, включая все ступени системы образования. Этот процесс предполагает внедрение технологий, которые изменяют как методы обучения, так и организацию образовательного процесса [1]. В условиях глобализации и быстрого развития информационных технологий учреждения образования стремятся адаптироваться к новым требованиям, предоставляя учащимся и педагогам доступ к информационным ресурсам образовательного характера. Важно отметить, что цифровая трансформация системы образования не только улучшает ее качество, но и открывает новые способы взаимодействия между учащимися, педагогами и родителями, создает динамичную и интерактивную образовательную среду. Однако, с другой стороны, такая трансформация ставит перед учреждениями образования ряд новых, подлежащих обязательному решению, задач, основными из которых являются:

- обеспечение доступности, целостности, подлинности и сохранности информационных ресурсов образовательного характера;
- обеспечение конфиденциальности персональных данных учащихся, педагогов и администрации учреждений образования.

Обязательность решения перечисленных задач обусловлена тем, что следствием нарушения доступности, целостности, подлинности и сохранности информационных ресурсов образовательного характера является снижение эффективности образовательного процесса, а следствием нарушения конфиденциальности персональных данных учащихся, педагогов и администрации учреждений образования – возникновение угрозы их личной безопасности. С учетом результатов исследований, представленных в [2–4], стоит отметить, что один из перспективных подходов к решению вышеперечисленных задач – внедрение и использование системы электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры (ЭЦПВИ) в информационные системы учреждений среднего общего образования.

Цель проводимого исследования состояла в разработке и обосновании механизмов внедрения и использования ЭЦПВИ в информационных системах учреждений общего среднего образования. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ процессов в системе общего среднего образования, в ходе реализации которых выполняется подписание документов с использованием ЭЦПВИ;
- разработана схема интеграции ЭЦПВИ в информационные системы учреждений общего среднего образования;
- создан алгоритм реализации образовательных процессов с использованием ЭЦПВИ (на примере проведения олимпиады по учебным предметам);
- выполнен анализ проблем, которые могут возникнуть при внедрении и использовании ЭЦПВИ в информационных системах учреждений общего среднего образования, а также обозначены пути решения этих проблем.

Применение ЭЦПВИ в системе среднего образования

Цифровая трансформация сферы среднего образования становится все более актуальной по мере того, как образовательные учреждения стремятся повысить эффективность своей работы и упростить административные процессы. Преимуществами ЭЦПВИ являются ее простота в использовании и отсутствие необходимости в специальном оборудовании. В случае примене-

ния традиционной электронной цифровой подписи (ЭЦП) участники образовательного процесса (администрация, бухгалтерия, отдел кадров, педагоги, учащиеся, родители) вынуждены иметь персональный компьютер, специальное программное обеспечение для работы с USB-носителем ключевой информации или ID-картой, сам USB-носитель, на котором хранится личный ключ. Это не только требует дополнительной заботы о сохранности носителя, но и ограничивает возможность удаленной работы с документами. ЭЦПВИ, в свою очередь, позволяет подписывать документы с любого устройства, подключенного к интернету, что делает процесс более гибким и удобным.

ЭЦПВИ играет значимую роль в подписании административных документов, которые являются неотъемлемой частью работы любого учреждения образования. Педагоги, администрация и другие сотрудники ежедневно сталкиваются с необходимостью подписывать множество документов: от отчетов по закупкам до согласования расписаний занятий и мероприятий. Использование ЭЦПВИ позволяет значительно ускорить эти задачи, так как документы могут подписываться онлайн, без необходимости физического присутствия или передачи бумажных копий. К процессам, в рамках которых реализуется подписание документов (используется собственноручная подпись) и применяется ЭЦПВИ, можно отнести следующие.

Подписание заявлений родителями. При использовании ЭЦПВИ для родителей также становятся доступны новые возможности по удаленному подписанию заявлений или согласия на участие детей в различных мероприятиях, отсутствие детей на занятиях по определенным причинам, при этом исключается необходимость личного визита в учреждение. Это особенно актуально в условиях современной жизни, когда у родителей часто нет возможности оперативно приехать для подписания документов. ЭЦПВИ позволяет им сделать это онлайн, быстро и безопасно.

Подписание обеденного меню. ЭЦПВИ окажет положительный экономический эффект в учреждении среднего образования при подписании обеденного меню. Меню питания в школе должно быть утверждено и подписано ответственными лицами, чтобы гарантировать соответствие нормам и требованиям по питанию детей. Использование ЭЦПВИ для подписи таких документов позволяет не только ускорить процесс их утверждения, но и обеспечивает юридическую силу документа, так как ЭЦПВИ обладает теми же правовыми свойствами, что и традиционная ЭЦП. Это особенно важно в случае проверок со стороны контролирующих органов.

Составление расписания занятий. Использование ЭЦПВИ для составления расписания занятий представляет собой инновационный подход, который значительно упрощает и ускоряет управление учебным процессом. Внедрение облачных технологий позволяет образовательным учреждениям централизованно хранить и обрабатывать данные, что обеспечивает доступ к информации в любое время и из любого места. С помощью собранных данных можно выявлять тенденции, такие как загруженность педагога и учащихся, а также оптимизировать распределение ресурсов. Это, в свою очередь, способствует более эффективному планированию учебного процесса и повышению качества образования. Это особенно актуально в условиях удаленного обучения и гибридных форматов, когда педагоги и администраторы могут работать с расписанием, не находясь физически в школе. Важно отметить, что ЭЦПВИ должна работать в тесной интеграции с автоматизированной системой составления расписания, что позволяет обеспечить синхронизацию данных и упрощает процесс внесения изменений.

Выдача/отправка домашнего задания для учащихся с особенностями развития, которые обучаются на дому. ЭЦПВИ позволяет организовать оперативный и безопасный обмен учебными материалами между педагогами и учащимися. Для учащихся с особыми образовательными потребностями, которые не могут посещать школу, важно обеспечить максимально удобные и доступные условия обучения, и цифровая подпись играет ключевую роль в корректном оформлении и подтверждении факта получения и выполнения заданий. При этом использование ЭЦПВИ гарантирует юридическую значимость всех документов, связанных с образовательным процессом на дому. Педагоги подписывают задания и индивидуальные образовательные планы, а родители или законные представители учащихся подтверждают их получение. Это преимущество важно для учета выполненных заданий и контроля за учебным процессом, поскольку все действия с документами фиксируются и могут быть проверены в случае необходимости.

Передача контрольной работы учащегося на проверку педагогу. Применение ЭЦПВИ при передаче контрольной работы учащегося на проверку педагогу является целесообразным и обеспечивает ряд преимуществ для всех участников образовательного процесса:

– гарантия подлинности переданных документов, что особенно важно в условиях дистанционного обучения, когда физическая передача работы невозможна, а подтверждение того, что контрольная действительно выполнена и отправлена учащимся, может вызывать сомнения;

– упрощение процесса обмена документами между учащимся и педагогом. В традиционной системе могут возникать задержки из-за необходимости физической передачи работы или отправки ее через обычную почту;

– формирование четкого механизма для отслеживания сроков сдачи контрольной работы. Можно точно зафиксировать время отправки документа, что позволяет избежать недоразумений, связанных с нарушением сроков выполнения. Это полезно в случае, если контрольная работа отправляется в последний момент – ЭЦПВИ сохраняет точное время, когда работа была подписана и отправлена, что исключает ошибки в оценке временных рамок выполнения задания.

Подтверждение выставления отметок в электронный дневник/журнал. Электронный дневник/журнал – еще одна сфера, где ЭЦПВИ играет важную роль в цифровой трансформации сферы среднего образования. Использование электронного дневника позволяет родителям и учащимся в реальном времени отслеживать успеваемость, посещаемость и выполнение домашних заданий. Однако важной частью этого процесса является юридическая значимость отметок и комментариев со стороны педагогов. ЭЦПВИ дает возможность официально заверять информацию в дневнике и журнале, исключая любые попытки фальсификации данных. Это повышает доверие между всеми участниками образовательного процесса и, что не менее важно, ускоряет обмен информацией.

Утверждение протоколов проведения олимпиады. После подписания протоколов информация автоматически попадает в централизованную базу данных, что позволяет быстро формировать итоговые рейтинги и сводные отчеты. Это особенно важно для крупных олимпиад, где количество участников и объем данных могут быть значительными, а время для получения подписи для утверждения протокола ограничено.

Механизмы внедрения и реализации ЭЦПВИ

ЭЦПВИ¹ состоит из следующих компонентов:

– системы облачной подписи (СОП), которая используется для формирования электронного документа с ЭЦПВИ;

– системы электронного документооборота (СЭД), с использованием которой предоставляется документ для подписания;

– сервера информационной системы учреждения образования (АИС), являющегося посредником между СОП и СЭД;

– государственной системы управления открытыми ключами² (ГосСУОК), в рамках которой реализуются процессы распространения и хранения сертификатов открытых ключей, атрибутивных сертификатов, списков отозванных сертификатов открытых ключей и списков отозванных атрибутивных сертификатов.

Предполагается, что СОП размещается в каждом районе области Республики Беларусь. Для обеспечения бесперебойной и отказоустойчивой работы ЭЦПВИ целесообразно использовать следующие технологии:

– микросервисную архитектуру³ для создания независимых друг от друга компонентов СОП, которые имеют собственную зону ответственности (один микросервис проверяет аутентификацию, другой формирует подписанные данные и т. п.), позволяют СОП быть более отказоустойчивой (если один из микросервисов вышел из строя, другие будут работать, и часть функционала СОП можно будет использовать до момента полного восстановления);

– Docker⁴ для работы с «упакованными» микросервисами, которые содержат необходимые зависимости и сетевое окружение, что обеспечивает консистентность и предсказуемость разверты-

¹ Подходы к использованию системы облачной электронной цифровой подписи в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/58207>. Дата доступа: 30.11.2024.

² Информация о ГосСУОК [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ncs.by/pki/info/goszakupki/>. Дата доступа: 30.11.2024.

³ Микросервисная архитектура [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.atlassian.com/ru/microservices/microservices-architecture>. Дата доступа: 30.11.2024.

⁴ Как работает Docker: подробный гайд от техлида [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://skillbox.ru/media/code/kak-rabotaet-docker-podrobnyy-gayd-ot-tekhlidera/>. Дата доступа: 30.11.2024.

вания приложений. Каждый компонент СОП является Docker-контейнером, что позволяет не беспокоиться о «железе», об операционной системе, все, что необходимо, уже собрано в одном файле;

- Kubernetes⁵ (k8s) для создания отказоустойчивого и автомасштабируемого кластера с максимальной гарантией доступности. С помощью k8s существует возможность управления Pod, который является объектом k8s, содержащим Docker-контейнер. Для достижения высокой степени отказоустойчивости необходимо настроить кластер с использованием двух рабочих (work) и трех управляющих (master) узлов. Это позволит обеспечить балансировку нагрузки и распределение запросов между work-узлами, а также гарантирует, что в случае выхода из строя одного из master-узлов, оставшиеся узлы смогут продолжать управлять кластером без потери функциональности;

- Nginx⁶ для маршрутизации запросов к микросервисам. Он выполняет функции обратного прокси-сервера, что позволяет проводить предварительную фильтрацию запросов по заданному критерию, распределять входящие запросы между микросервисами СОП, обеспечивая их доступность и максимальную производительность;

- TLS⁷ с односторонней/двусторонней аутентификацией для защиты передаваемых данных по каналу связи. Односторонняя аутентификация позволяет серверу удостовериться в подлинности клиента, что защищает от несанкционированного доступа. В случае двусторонней аутентификации обе стороны (клиент и сервер) проверяют друг друга, что значительно повышает уровень безопасности. В СОП TLS необходим для доступа к ГосСУОК, для аутентификации СЭД, АИС, клиентских компонентов СОП [3];

- систему управления базами данных (СУБД) PostgreSQL⁸ для хранения и управления данными. СУБД обеспечивает эффективное хранение и обработку больших объемов данных, поддерживает транзакции, что гарантирует целостность данных и позволяет реализовать механизмы отката в случае ошибок.

При генерации Docker-образов и настройки k8s для каждого компонента СОП создается учетная запись в СУБД с определенными привилегиями, позволяющими реализовывать CRUD-операции⁹ только с теми сущностями, которые указаны в учетной записи (микросервис, работающий с документами, может работать только с таблицами, хранящими данные о документах).

Размещение вышеперечисленных компонентов должно осуществляться на серверном оборудовании с эквивалентными характеристиками:

- ОС – Oracle Linux 8.5 и выше с версией ядра 4.18;
- объем накопителя на жестких магнитных дисках «горячей» замены – не менее 4 ТБ;
- объем оперативной памяти с полной буферизацией – не менее 64 ГБ;
- тактовая частота процессора – не менее 2,1 ГГц.

При выработке ЭЦПВИ в рамках информационных систем учреждений общего среднего образования целесообразно реализовывать следующие механизмы защиты информации¹⁰, которые позволяют гарантировать корректное использование личного ключа подписанта, а также обеспечить прозрачное и безопасное функционирование СОП:

- применение одноразового пароля;
- использование PIN для доступа к личному ключу;
- генерация данных активации подписи при выполнении протокола активации подписи;
- оценка целостности цифрового образа¹¹ (представление пользователя в информационной системе, являющееся виртуальным посредником между информационной системой и пользователем при доступе последнего к ресурсам этой системы).

⁵ Kubernetes [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/kubernetes/>. Дата доступа: 30.11.2024.

⁶ Nginx [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nginx.org/ru/>. Дата доступа: 30.11.2024.

⁷ Программа защищенного канала передачи данных [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://niitzi.by/crypto-products/schannel-secure-data-channel-program>. Дата доступа: 30.11.2024.

⁸ PostgreSQL [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/postgresql/>. Дата доступа: 30.11.2024.

⁹ Что такое CRUD [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://orbitsoft.com/ru/blog/crud/>. Дата доступа: 30.11.2024.

¹⁰ Механизмы защиты информации при выработке облачной электронной цифровой подписи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/52449>. Дата доступа: 30.11.2024.

¹¹ Информационные технологии и безопасность. Инфраструктуры аутентификации: СТБ 34.101.87–2022 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://apmi.bsu.by/assets/files/std/bias-spec130.pdf>. Дата доступа: 13.12.2024.

Предлагается алгоритм использования ЭЦПВИ в рамках образовательных процессов, основанный на процессе проведения олимпиады по образовательному предмету.

1. АИС: сбор результатов олимпиады.
2. АИС: формирование документа для подписи.
3. АИС: загрузка сформированного документа в СЭД.
4. АИС: уведомление должностных лиц о том, что документ для подписи сформирован.
5. СЭД: аутентификация членов жюри в СЭД и СОП.
6. СЭД: получение документа для подписи.
7. Члены жюри: предоставление согласия на подпись.
8. СОП: взаимодействие с устройством создания подписи (УСП).
9. УСП: выработка значения ЭЦП и передача в СОП.
10. СОП: формирование подписанного электронного документа.
11. СОП: отправка подписанного членами жюри документа в АИС.
12. АИС: загрузка подписанного документа в СЭД.
13. АИС: уведомление методиста, что документ подписан членами жюри.
14. СЭД: аутентификация методиста в СЭД и СОП.
15. СЭД: получение документа для подписи.
16. Методист: предоставление согласия на подпись.
17. СОП: взаимодействие с УСП.
18. УСП: выработка значения ЭЦП и передача в СОП.
19. СОП: формирование подписанного электронного документа.
20. СОП: отправка подписанного методистом документа в АИС.
21. АИС: загрузка подписанного документа в СЭД.
22. АИС: уведомление всех участников об успешном формировании электронного документа.

Цифровая трансформация системы среднего образования с использованием ЭЦПВИ является перспективным направлением. Однако процесс внедрения и применения ЭЦПВИ в информационных системах общего среднего образования сопряжен с необходимостью решения следующих проблемных вопросов.

1. Высокая стоимость УСП может стать серьезной проблемой для образовательной системы, особенно для небольших учебных заведений и государственных школ с ограниченным бюджетом. Это может привести к неравномерному распределению ресурсов и ограничить доступ к ЭЦП для всех участников образовательного процесса. Для решения этой проблемы можно рассмотреть создание совместных закупок или кооперативных программ, позволяющих учебным заведениям объединять ресурсы для приобретения УСП. Также стоит обратить внимание на государственные субсидии и гранты, направленные на поддержку внедрения технологий ЭЦП.

2. Приобретение серверного оборудования для размещения СОП может вызвать трудности из-за значительных финансовых вложений, а также затрат на обслуживание и обновление. В качестве решения можно рассмотреть аренду серверов, что позволит избежать крупных первоначальных затрат и снизить финансовую нагрузку на учебные заведения. Важно также разработать стратегию оптимизации расходов на обслуживание и обновление оборудования, включая использование виртуализации и других технологий для снижения затрат на инфраструктуру.

3. Обучение и техническая поддержка при эксплуатации СОП и УСП могут стать проблемными из-за необходимости специальных знаний и навыков. Для эффективного управления системой нужно обеспечить достаточную подготовку персонала и предоставить техническую поддержку пользователям. Решением может стать разработка комплексной программы подготовки, включающей теоретические и практические занятия, а также организацию регулярных тренингов и семинаров. Создание доступных обучающих материалов и центра технической поддержки, предоставляющего консультации в реальном времени, повысит уверенность и компетентность сотрудников в работе с новыми системами.

4. Оплата накладных расходов, таких как отправка ОТР, может стать проблемой при больших объемах данных или числе пользователей, что приведет к значительным затратам на обслуживание системы и снижению эффективности использования ЭЦП. Для решения этой проблемы можно внедрить более эффективные методы аутентификации, например, мобильные приложения или биометрические данные, что позволит сократить расходы на SMS и другие уведомления.

5. Обеспечение защищенного канала связи с помощью ГосСУОК для процессов, связанных с сертификатом открытого ключа, может вызвать трудности из-за необходимости соблюдения определенных стандартов безопасности. Важно убедиться, что система соответствует этим требованиям для защиты данных и пользователей от киберугроз. Для решения этой проблемы следует провести аудит существующих систем безопасности и разработать план их улучшения.

6. Интеграция СОП с СЭД может быть затруднена из-за несовместимости форматов и протоколов обмена данными. Необходимо провести тщательное тестирование систем для обеспечения их эффективной работы и избежания проблем с совместимостью. Для решения этой задачи стоит выполнить предварительный анализ совместимости форматов и протоколов, создать рабочую группу из специалистов обеих систем для разработки плана интеграции и тестирования. Регулярное тестирование и обратная связь от пользователей помогут выявить и устранить возможные проблемы на ранних стадиях, что обеспечит бесперебойную работу процессов, связанных с ЭЦП.

Заключение

1. Успешная интеграция электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры в образовательные процессы требует не только технической готовности, но и изменения подходов к реализации этих процессов с учетом необходимости повышения уровня качества образования.

2. Внедрение и использование ЭЦПВИ в информационных системах учреждений общего образования будет способствовать упрощению процессов документооборота, повышению уровня защищенности электронных документов. Однако, несмотря на обозначенные преимущества, существует ряд барьеров для ее внедрения и использования, таких как недостаточная осведомленность пользователей информационных систем учреждений общего среднего образования о возможностях ЭЦПВИ, необходимость повышения квалификации пользователей информационных систем учреждений общего среднего образования. Эти проблемы требуют внимания со стороны образовательных учреждений и государственных органов, чтобы обеспечить плавный переход к цифровым технологиям и минимизировать возможные риски.

3. В последующем исследовании будут направлены на обоснование и разработку систем ЭЦПВИ для других сфер деятельности личности, общества и государства, а также на обоснование путей решения проблем, которые могут возникнуть при внедрении и использовании таких систем. Эти пути состоят в разработке рекомендаций по оптимизации процессов, связанных с использованием ЭЦПВИ, а также в создании обучающих программ для пользователей систем с ЭЦПВИ, в частности, для педагогов и административного персонала учреждений общего среднего образования. Результаты последующих исследований смогут быть применены как в целях повышения качества образовательных услуг, так и для создания более эффективной и безопасной среды для всех участников образовательного процесса. Это подразумевает внедрение современных решений в сфере кибербезопасности, а также регулярное проведение аудитов и обучение сотрудников.

Список литературы

1. Мигалевич, С. А. Влияние современных информационно-коммуникационных технологий на образование / С. А. Мигалевич, О. В. Герман, С. Х. Хабибов // Цифровая трансформация. 2024. Т. 30, № 4. С. 73–76. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-4-73-76>.
2. Герасимов, В. А. Использование системы облачной электронной подписи для организации электронного голосования / В. А. Герасимов, М. А. Казловский // Цифровая трансформация. 2024. Т. 30, № 1. С. 52–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-1-52-62>.
3. Герасимов, В. А. Метод обнаружения событий информационной безопасности в системах облачной подписи / В. А. Герасимов, О. В. Бойправ // Цифровая трансформация. 2024. Т. 30, № 2. С. 77–84. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-2-77-84>.
4. Семенов, Н. С. Теоретико-правовые аспекты регулирования облачных технологий / Н. С. Семенов, С. Р. Семенов // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10, № 7. С. 457–462. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/104/52>.

References

1. Migalevich S. A., German O. V., Habibov S. H. (2024) The Impact of Modern Information and Communication Technologies on Education. *Digital Transformation*. 30 (4), 73–76 <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-4-73-76> (in Russian).
2. Herasimau V. A., Kazlouski M. A. (2024) Using a Cloud-Based Electronic Signature System for Organizing Electronic Voting. *Digital Transformation*. 30 (1), 52–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-1-52-62> (in Russian).
3. Gerasimov V. A., Boyprav O. V. (2024) Method for Information Security Events Detection in a Cloud Signature Systems. *Digital Transformation*. 30 (2), 77–84. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-2-77-84> (in Russian).
4. Semenov N., Semenov S. (2024) Theoretical and Legal Aspects of Regulation of Cloud Technologies. *Bulletin of Science and Practice*. 10 (7), 457–462. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/104/52> (in Russian).

Received: 8 January 2025

Accepted: 18 February 2025

Вклад авторов

Герасимов В. А. разработал и обосновал механизмы внедрения и использования облачной электронной цифровой подписи в информационных системах общего среднего образования.

Герасимова М. А. выполнила анализ процессов в системе общего среднего образования, в ходе реализации которых осуществляется подписание документов.

Кузнецов А. П. участвовал в обсуждении результатов, представленных в статье, а также корректировке рукописи.

Authors' contribution

Gerasimov V. A. developed and substantiated the mechanisms for the implementation and use of cloud-based electronic digital signatures in general secondary education information systems.

Gerasimova M. A. performed an analysis of processes in the general secondary education system, during the implementation of which documents are signed.

Kuznezov A. P. participated in the discussion of the results presented in the article, as well as in the correction of manuscript.

Сведения об авторах

Герасимов В. А., магистр, сотр. Научно-исследовательского института технической защиты информации, асп. каф. защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Герасимова М. А., магистр пед. наук, учитель информатики, Государственное учреждение образования «Средняя школа № 42 г. Минска»

Кузнецов А. П., д-р техн. наук, проф., проф. каф. систем управления, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220088, Республика Беларусь,
Минск, ул. Первомайская, 26, корп. 2
Научно-исследовательский институт
технической защиты информации
Тел.: +375 17 302-81-71
E-mail: vger@niitzi.by
Герасимов Вячеслав Александрович

Information about the authors

Gerasimov V. A., Master, Researcher at the Research Institute for Technical Protection of Information, Post-graduate at the Department of Information Protection, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Gerasimova M. A., Master Sci. (Ped.), Teacher of Computer Science, State Educational Institution “Secondary School No 42 of Minsk”

Kuznezov A. P., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Control Systems, BSUIR

Address for correspondence

220088, Republic of Belarus,
Minsk, Pervomayskaya St., 26, Bld. 2
Research Institute
for Technical Protection of Information
Tel.: +375 17 302-81-71
E-mail: vger@niitzi.by
Gerasimov Viacheslau Alexandrovich