
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор В.А. Богущ

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),
А.Н. Осипов (зам. главного редактора),
Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,
А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднарь,
С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский,
А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов,
С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков,
Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко,
А.А. Хмыль, В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Гурский Л.И., Петров А.В., Голосов Д.А., Киреев П.Н., Каланда Н.А., Ярмолич М.В. Механизмы деградации структуры сегнетоэлектрика $Pb_{1-x}Ba_xZr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$	5
Качан Д.А., Вишняков В.А. Подход и модели применения технологии распределенных реестров для подтверждения достоверности документов в образовании	14
Архипенков Д.В., Забеньков И.И., Солонович С.С. Способы структурно-функциональной реализации сверхширокодиапазонных приемных трактов.....	23
Петкевич М.Н., Титович Е.В., Бельков Г.В. Влияние точности позиционирования онкологических пациентов в положении проведения лучевой терапии с использованием медицинских линейных ускорителей электронов на параметры доставляемого им индивидуального трехмерного дозового распределения	31
Дубовский В.А., Савченко В.В. Подход к организации передачи управления транспортным средством от автоматизированной системы вождения человеку	40
Щербаков С.С., Шемет Л.А., Насань О.А. Компьютерное моделирование объемной повреждаемости в окрестности горной выработки	47
Ловшенко И.Ю., Стемпицкий В.Р., Шандарович В.Т. Моделирование воздействия тяжелой заряженной частицы на электрические характеристики приборной структуры <i>n</i> -МОП-транзистора.....	55

Хорошко В.В., Глинистый Р.В, Глинистый Р.Р, Шнейдеров Е.Н., Королёв А.Г., Король О.М. Эффективность электронных систем пожарной безопасности в зоне горения автомобилей для подземных гаражей-стоянок жилых зданий	63
Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Моделирование процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре с использованием графена и нитрида бора	71
Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А., Яковлев В.П. Моделирование нагрева кремниевых пластин при быстрой термической обработке на установке «УБТО 1801».....	79
Баранова М.С., Проскурова П.А. Электронные свойства квазидвумерных халькогенидов переходных металлов с низкоразмерным магнетизмом	87
<i>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ</i>	
Кураев А.А., Матвеев В.В. Унимодальный электрический двигатель-генератор	96

Корректурa и верстка Л.В. КОНДАКОВА
Компьютерный дизайн О.В. БОЙПРАВ, Т.В. МИРОНЕНКО

Подписано в печать 18.11.2020. Формат 60×84 ¼. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 10,1. Тираж 100 экз. Заказ 235.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2020

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief V. A. Bogush

Address of editorial office: P. Brovka str., 6, room 326, Minsk, 220013, Belarus

Phone number of editorial office: +375-17-293-88-41

Web-site: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Hurski L.I., Petrov A.V., Golosov D.A., Kireev P.N., Kalanda N.A., Yarmolich M.V. Degradation mechanisms of the $Pb_{1-x}Ba_xZr_{0.53}Ti_{0.47}O_{3-\delta}$ ferroelectric structure	5
Kachan D.A., Vishniakou U.A. Approach and models for using distributed ledger technology to authenticate educational documents.....	14
Arkhipenkov D.V., Zabenkov I.I., Salanovich S.S. Methods of structural and functional implementation of ultra-wide range receiving paths.....	23
Piatkevich M.N., Titovich E.V., Belkov G.V. The effect of cancer patients' positioning accuracy during radiation therapy sessions using medical linear electron accelerators on the parameters of their individual 3D dose distribution.....	31
Dubovsky V.A., Savchenko V.V. An approach to organizing the transition of vehicle control from an automated driving system to a person.....	40
Sherbakov S.S., Shemet L.A., Nasan A.A. Computer modeling of volumetric damageability in the mine roadway neighbourhood.....	47
Lovshenko I.Yu., Stempitsky V.R., Shandarovich V.T. Modeling the impacts of heavy charged particles on electrical characteristics of n-MOSFET device structure	55
Khoroshko V.V., Hlinisty R.V., Hlinisty R.R., Shneiderov E.N., Korolev A.G., Korol O.M. Electronic fire safety systems efficiency in the combustion zone of cars for underground parkings of residential buildings.....	63
Muraviev V.V., Mishchenko V.N. Simulation of electron transfer processes in a semiconductor structure using graphene and boron nitride	71
Solovjov J.A., Pilipenko V.A., Yakovlev V.P. Simulation of silicon wafers heating during rapid thermal processing using "UBTO 1801" unit.....	79

Baranava M.S., Praskurava P.A. Electronic properties of quasi two-dimensional transition metals chalcogenides with low-dimensional magnetism.....	87
--	----

SHORT NOTES

Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Unimodal electric motor-generator	96
--	----



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 538.9: 539.264: 548.4

МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА $Pb_{1-x}Ba_xZr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$

ГУРСКИЙ Л.И.¹, ПЕТРОВ А.В.², ГОЛОСОВ Д.А.¹, КИРЕЕВ П.Н.³,
КАЛАНДА Н.А.², ЯРМОЛИЧ М.В.²

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

² ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (г. Минск, Республика Беларусь)

³ ГНУ «Институт порошковой металлургии НАН Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 1 апреля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Настоящая статья посвящена изучению механизмов деградации структуры сегнетоэлектрика состава $Pb_{1-x}Ba_xZr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$. На основании результатов исследований по влиянию температурно-временных режимов синтеза на степень структурного совершенства твердого раствора $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$ установлено, что при его отжиге ($T = 420$ К и $t = 15-100$ ч) наблюдается смещение положения и уширение рентгеновского рефлекса (112), что обусловлено аморфизацией и увеличением упругих напряжений в кристаллической решетке материала в ходе отжига. Показано, что при увеличении температуры отжига до 520 К, во временном интервале 15 – 100 ч, кристаллическая решетка материала деформируется за счет образования в ней дефектов типа V_{Pb} , V_O и $[V_O^{2+} 2Pb_i^-]$, что проявляется в уменьшении соотношения интенсивностей $I(hkl)$ дифракционных рефлексов (112) и (211). Предполагается, что в результате этого отжига на межзеренных границах накапливается избыток свинца, который способствует локальному появлению жидкой фазы. Данная фаза, участвуя в переносе компонентов материала, не только ускоряет взаимодействие реагирующих компонентов, но и снижает устойчивость их кристаллических решеток из-за образования в них точечных дефектов. В этом случае состояние решетки определяется как появлением вакансий по кислороду (V_O), свинца (V_{Pb}), ассоциатов типа $[V_O^{2+} 2Pb_i^-]$, так и возникновением различных упругих напряжений, что способствует ослаблению химических связей между атомами, обусловленных внесенной дефектностью в анионную подрешетку твердого раствора $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$ при десорбции кислорода.

Ключевые слова: цирконат-титанат свинца-бария, твердый раствор $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$, сегнетоэлектрические и диэлектрические свойства, дефекты, вакансии, межзеренные границы, жидкая фаза, рентгено-фазовый анализ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гурский Л.И., Петров А.В., Голосов Д.А., Киреев П.Н., Каланда Н.А., Ярмолич М.В. Механизмы деградации структуры сегнетоэлектрика $Pb_{1-x}Ba_xZr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 5-13.

DEGRADATION MECHANISMS OF THE $\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$ FERROELECTRIC STRUCTURE

LEONID I. HURSKI¹, ALEXANDER V. PETROV², DMITRY A. GOLOSOV¹, PETR N. KIREEV³,
NIKOLAY A. KALANDA², MARTA V. YARMOLICH²

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

² Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

³ Powder Metallurgy Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 1 April 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The present paper is devoted to the study of the structural degradation mechanisms of ferroelectric having $\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$ composition. On the base of investigations of the influence of temperature-time synthesis modes on the structural perfection degree of the $\text{Pb}_{0.85}\text{Ba}_{0.25}\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$ compound, it has been determined, that a shift of the position of the XRD reflex from the plane (112) and its broadening, which is caused by the amorphization and an increase of the elastic stresses in the material crystal lattice during the annealing of the compound. It has been demonstrated that at the increase of the annealing temperature up to 520 K, the crystal lattice of the ferroelectric is deformed by means of a formation of $V_{\text{Pb}}, V_{\text{O}}$ and $[V_{\text{O}}^{\bullet\bullet} 2\text{Pb}_i^{\prime}]$ defects, which is realized in a decrease of the $I(hkl)$ intensity relationship of the XRD reflexes from the planes (112) and (211). It has been supposed that an excess of lead is produced on the grain boundaries as a result of this annealing process, which promotes a local manifestation of the liquid phase. This phase which takes place in the transfer of the material components, not only increases the interaction of the reacting components, but lowers the stability of their crystal lattices due to the formation of point defects, as well. In this case, the lattice state is determined both by the emergence of the oxygen (V_{O}) and lead (V_{Pb}) vacancies, as well as of the associates of the $[V_{\text{O}}^{\bullet\bullet} 2\text{Pb}_i^{\prime}]$ type, and by the emergence of various elastic stresses, which promotes the relaxation of the chemical bonds between atoms, caused by the deficiency introduced into the anionic sublattice of the $\text{Pb}_{0.85}\text{Ba}_{0.25}\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$ solid solution at the oxygen desorption process.

Keywords: lead-barium zirconate-titanate, $\text{Pb}_{0.85}\text{Ba}_{0.25}\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$ solid solution, ferroelectric and dielectric properties, defects, vacancies, grain boundaries, liquid phase, X-ray phase analysis

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

For citation. Hurski L.I., Petrov A.V., Golosov D.A., Kireev P.N., Kalanda N.A., Yarmolich M.V. Degradation mechanisms of the $\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$ ferroelectric structure. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 5-13.

Введение

В последнее время одной из широко обсуждаемых тем явилось наличие увеличения в сегнетоэлектриках $\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$ и, в частности, в сегнетоэлектриках составов $\text{Pb}_{0.85}\text{Ba}_{0.25}\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$ деградиционных эффектов при их эксплуатации. Эти эффекты обуславливают уменьшение переключаемого заряда, искажение формы петель гистерезиса и $C-V$ характеристик, а также увеличение токов утечки и т. п. [1–6]. На сегнетоэлектрические свойства в указанных сегнетоэлектриках влияет ряд параметров, к числу которых относится изменение характеристик межзеренных границ $\text{Pb}_{0.85}\text{Ba}_{0.25}\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$ [7, 8].

При анализе механизмов деградиционных процессов и рассмотрении межзеренных границ сегнетоэлектрика $\text{Pb}_{0.85}\text{Ba}_{0.25}\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$, на границах обнаружено увеличение содержания свинца [2, 3, 5, 9]. Полученные данные позволили предположить, что при многократном использовании перовскитной фазы $\text{Pb}_{0.85}\text{Ba}_{0.25}\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_{3-\delta}$ в качестве активного элемента в его структуре происходит вытеснение катионов свинца из объема соединения

на межзеренные границы с образованием на них слоя, обогащенного свинцом, а также и другими паразитными фазами. При этом в структуре сегнетоэлектрика появляются как вакансии по кислороду V_O , так и вакансии свинца V_{Pb} , приводящие, в свою очередь, к уменьшению структурного совершенства соединения. В то же время при формировании гетерофазной межзеренной границы и последующей сорбции кислорода на ней происходит увеличение концентрации кислорода с образованием оксида свинца.

Увеличение эффективности использования объемных образцов, а также пленок твердых растворов $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$ в сегнетоэлектрических и электрооптических устройствах достигалось путем установления зависимости между структурным совершенством материала и его электрофизическими свойствами. Несмотря на хорошие сегнетоэлектрические характеристики, образцы состава $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$ обладают рядом недостатков, обусловленных деградацией физико-химических свойств из-за образования различного рода структурных дефектов, приводящих к полидоменизации структуры и, соответственно, к локальному изменению электросопротивления, диэлектрической проницаемости и других характеристик материала [2–4]. Что же касается электротранспортных свойств образцов состава $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$, то вопрос образования в них дефектов приобретает особую актуальность. Это обусловлено тем, что дефекты являются одной из причин возникновения дополнительных источников локализации катионов свинца, приводящих к деградации физико-химических свойств данного материала [2–6]. Деградация физико-химических свойств $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$ увеличивает нежелательный при работе приборов на основе данного материала эффект самополяризации, который приводит к закреплению направления поляризации в областях зерен $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$, прилегающих к заряженной межзеренной границе. Это, в свою очередь, обуславливает значительное увеличение значений тангенса угла диэлектрических потерь, уменьшение переключаемого заряда, искажение формы петель гистерезиса и вольт-фарадных характеристик, а также увеличение токов утечки и изменение механизма токопереноса [3, 6].

Несмотря на огромное количество проведенных исследований в данной области, в настоящее время имеется ряд нерешенных проблем, связанных с недостаточно полными знаниями о механизмах деградации структуры в материалах состава $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$.

Настоящая статья посвящена изучению механизмов деградации структуры сегнетоэлектрика состава $Pb_{1-x}Ba_xZr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$.

Методика проведения эксперимента

Оксиды PbO , TiO_2 и ZrO_2 , а также карбонат бария $BaCO_3$ использовались для приготовления твердого раствора $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_3$. Для удаления кристаллизационной влаги карбонат бария содержался в резистивной термоустановке в течение 10 ч в температурном диапазоне 800–1100 К. Помол и перемешивание стехиометрической смеси исходных реагентов проводились в планетарной шаровой мельнице в этиловом спирте в течение 1 ч. Полученная смесь сушилась при температуре 400 К в течение 8 ч для удаления кристаллизационной влаги, а затем прессовалась в виде таблеток диаметром 1 см и толщиной 5 мм. Предварительный отжиг образцов производился на воздухе при температуре 1170 К в течение 30 ч. Далее, производился вторичный помол и перемешивание порошка в планетарной шаровой мельнице в течение 1 ч, после чего порошок снова прессовался в таблетки диаметром 1 см и толщиной 5 мм. Для того чтобы избежать растрескивания образцов, а также из-за большого коррозионного воздействия свинцового компонента на термоустановку, последующие процедуры термообработки производились поэтапно. В процессе первого этапа, в температурном диапазоне 500–1100 К, скорость нагрева составляла 120–140 К/ч, а в процессе второго этапа, в температурном диапазоне 1100–1500 К, скорость нагрева составляла 40–60 К/ч. В итоге, согласно данным рентгенофазового анализа (рис. 1), были получены однофазные образцы состава $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_3$ в виде таблеток диаметром 1 см и толщиной 5 мм. Исследования их микроструктуры производились с помощью сканирующего электронного микроскопа «Jeol JSM 6360».

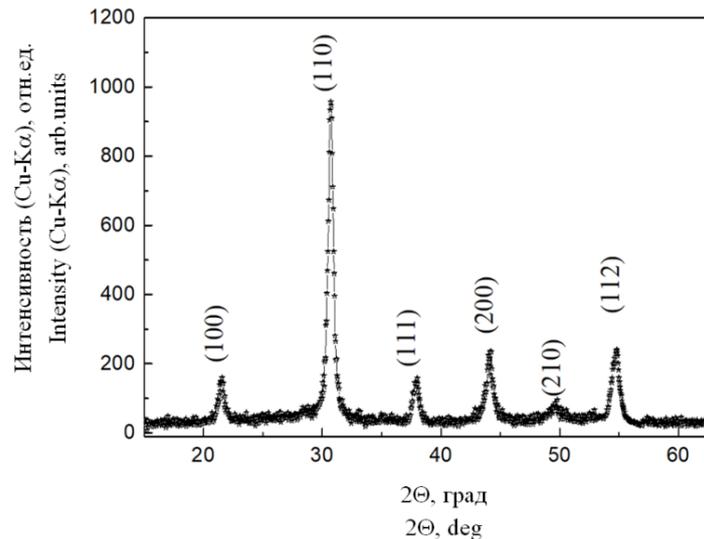


Рис. 1. Рентгенограмма образца состава $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$, синтезированного из стехиометрической смеси оксидов $0,25\text{BaPbTiO}_3 + 0,6\text{PbO} + 0,53\text{ZrO}_2 + 0,22\text{TiO}$ при $p\text{O}_2 = 0,21 \cdot 10^5$ Па в интервале температур 300–1370 К, при скорости нагрева 6 град/мин

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ sample, which was synthesized from the stoichiometric mixture of the oxides $0.25\text{BaPbTiO}_3 + 0.6\text{PbO} + 0.53\text{ZrO}_2 + 0.22\text{TiO}$ at $p\text{O}_2 = 0.21 \cdot 10^5$ Pa in the temperature range 300–1370 K, at the heating rate 6 deg/min

Гидростатическая плотность и пористость экспериментальных образцов исследовались пикнометрическим методом. Процесс измерения считался законченным, если образец терял не более 0,1 % своей массы в течение 1 ч. Для насыщения образцов жидкостью они помещались в специальный сосуд, на решетчатую опору, находящуюся на высоте 10 мм от дна сосуда. Затем сосуд наполнялся дистиллированной водой таким образом, чтобы ее уровень находился на 20 мм выше верхней поверхности образцов. После кипячения в течение двух часов образцы извлекались из сосуда и взвешивались.

Результаты и их обсуждение

Для исследования влияния на структуру сегнетоэлектрика деградационных процессов, протекающих при различных температурно-временных условиях, и установления преимущественного типа дефектов изучались структурные характеристики твердого раствора $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$. Для увеличения скорости протекания деградационных процессов, происходящих в образцах при их использовании в микроэлектронике, образцы состава $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ отжигались в температурном интервале 420–520 К при различном времени выдержки. Согласно данным рентгеноструктурных исследований установлено, что образцы $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ после такой термообработки являются однофазными и обладают структурой перовскита.

Смещение положения и уширение рентгеновского рефлекса (112) твердого раствора $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ свидетельствует о том, что наблюдается эффект аморфизации и увеличения упругих напряжений в кристаллической решетке материала в результате отжига (рис. 2). При увеличении температуры отжига образцов $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ до $T = 520$ К и парциальном давлении кислорода $p\text{O}_2 = 0,21 \cdot 10^5$ Па обнаружено, что с увеличением времени отжига наблюдается изменение ширины профиля отражения рефлекса (112) на полувысоте максимума I и появление дополнительного рефлекса (211). С увеличением времени отжига соотношение интенсивностей рентгеновских рефлексов $\{I(112) / I(211)\}$ уменьшается, что указывает на изменение степени структурного совершенства сегнетоэлектрика (табл. 1).

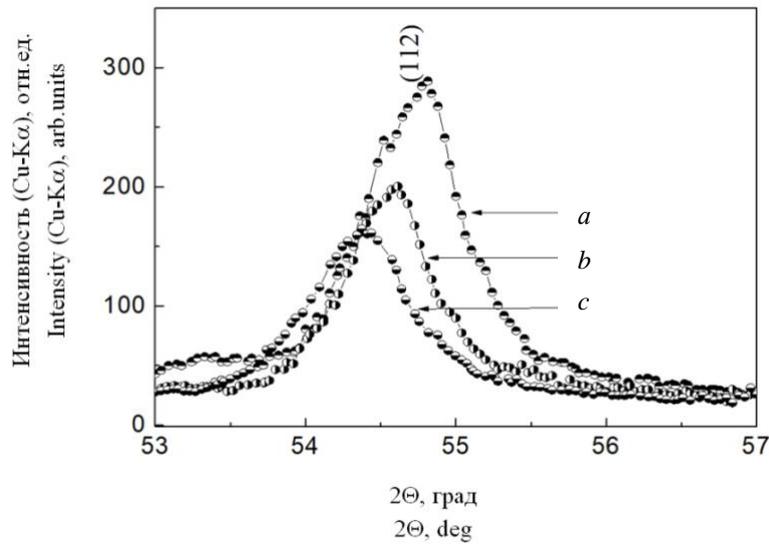


Рис. 2. Фрагмент рентгенограммы образцов состава $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$, дополнительно отожженных при $T = 420$ К и $p_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot 10^5$ Па в течение: 15 ч (a), 50 ч (b), 100 ч (c)

Fig. 2. A fragment of the X-ray diffraction pattern of the $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ samples, which were additionally annealed at $T = 420$ K and $p_{\text{O}_2} = 0.21 \cdot 10^5$ Pa during: 15 h (a), 50 h (b), 100 h (c)

Таблица 1. Параметры рентгеновских рефлексов сегнетоэлектрика состава $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$, дополнительно отожженного при 420 К в течение различных периодов времени

Table 1. Parameters of the X-ray diffraction reflexes of the ferroelectric with the $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ composition, additionally annealed at 420 K during the different time periods

Время отжига, ч Annealing time, h	15	50	100
$I(112) / I(211)$	1,57	1,45	1,37
$\frac{1}{2}\Delta\theta^\circ(112, 211)$	0,663	0,87	0,95

Кроме этого, на ухудшение структурного совершенства твердого раствора $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ при его длительной термообработке указывает и величина $\frac{1}{2}(\Delta\theta^\circ)$ (ширина профилей отражения (112, 211) на полувысоте их максимумов). Это обусловлено тем, что ширина профилей рентгеновских отражений определяется, прежде всего, наличием дефектов, приводящих к формированию упругих напряжений в зернах соединения. Видно, что наибольшей шириной профилей отражений от кристаллоструктурных плоскостей (211) и (112) обладает образец, отожженный при $T = 520$ К в течение 100 ч, а наименьшей – образец, отожженный при $T = 520$ К в течение 15 ч, в то время как образец, отожженный при $T = 520$ К в течение 50 ч, обладает промежуточным значением ширины профиля отражения. Так, при дальнейшем увеличении температуры отжига наблюдается незначительная фазовая трансформация, приводящая к изменению рентгеновского рефлекса фазы в матрице со структурой перовскита (рис. 3).

Присутствие дефектов Pb_i' стимулирует процесс образования кислородных вакансий $V_{\text{O}}^{\bullet\bullet}$, которые, изменяя электронную плотность кристаллической решетки, способны образовывать ассоциаты, имеющие как эффективный заряд $V_{\text{O}}^{\bullet\bullet} + e' \leftrightarrow [V_{\text{O}}^{\bullet\bullet} e']'$, так и нейтральные $V_{\text{O}}^{\bullet\bullet} + 2e' \leftrightarrow [V_{\text{O}}^{\bullet\bullet} 2e']$.

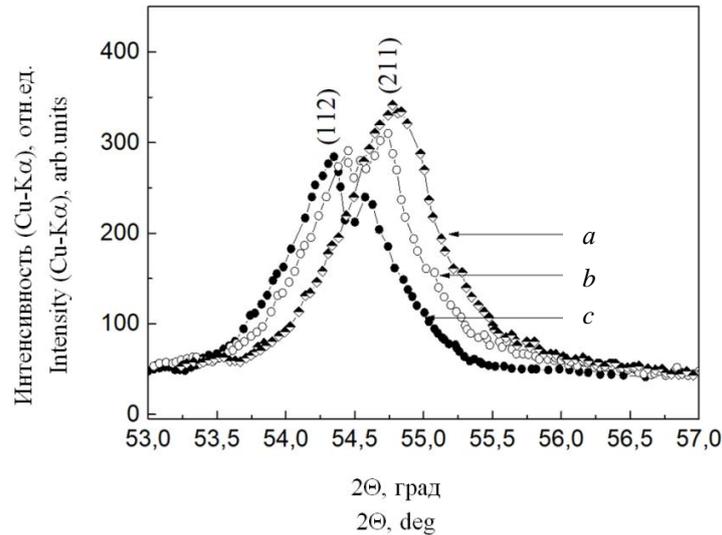


Рис. 3. Фрагмент рентгенограммы образцов состава $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$, дополнительно отожженных при $T = 520$ К и $p\text{O}_2 = 0,21 \cdot 10^5$ Па в течение: 15 ч (a), 50 ч (b), 100 ч (c)

Fig. 3. A fragment of the X-ray diffraction pattern of the $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ samples, which were additionally annealed at $T = 520$ K and $p\text{O}_2 = 0.21 \cdot 10^5$ Pa during: 15 h (a), 50 h (b), 100 h (c)

Междоузельные катионы Pb_i' могут также взаимодействовать с кислородными вакансиями с образованием незаряженных ассоциатов по схеме $2\text{Pb}_i' + V_{\text{O}}'' \leftrightarrow [V_{\text{O}}'' 2\text{Pb}_i']'$, увеличивая структурные искажения. Можно предположить, что в результате отжига при $T = 520$ К и $t = 50\text{--}100$ ч на межзеренных границах накапливается избыток свинца, который способствует локальному появлению жидкой фазы. Возникающая жидкая фаза, участвуя в переносе компонентов материала, не только ускоряет взаимодействие реагирующих компонентов, но и снижает устойчивость их кристаллических решеток из-за образования в них нульмерных дефектов и ассоциатов типа V_{Pb} , V_{O} и $[V_{\text{O}}'' 2\text{Pb}_i']$, что и проявляется в уменьшении соотношения интенсивностей $I(hkl)$ рентгеновских рефлексов (112) и (211).

Из вышесказанного следует, что состояние решетки определяется как появлением ассоциатов $[V_{\text{O}}'' 2\text{Pb}_i']$, вакансий по кислороду V_{O} , свинца V_{Pb} , так и возникновением упругих напряжений, обусловленных этими процессами, что способствует ослаблению химических связей между атомами, обусловленных внесенной дефектностью в анионную подрешетку твердого раствора $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ при десорбции кислорода.

Заключение

Таким образом, на основании результатов исследований по влиянию температурно-временных режимов синтеза на степень структурного совершенства твердого раствора $\text{Pb}_{0,85}\text{Ba}_{0,25}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_{3-\delta}$ установлено, что при его отжиге ($T = 420$ К и $t = 15\text{--}100$ ч) наблюдается смещение положения и уширение рентгеновского рефлекса (112), что обусловлено аморфизацией и увеличением упругих напряжений в кристаллической решетке материала в ходе отжига. Показано, что при увеличении температуры отжига до 520 К во временном интервале 15–100 ч кристаллическая решетка материала деформируется за счет образования в ней дефектов типа V_{Pb} , V_{O} и $[V_{\text{O}}'' 2\text{Pb}_i']$, что проявляется в уменьшении соотношения интенсивностей $I(hkl)$ синглетных дифракционных рефлексов (112) и (211). Предполагается, что в результате этого отжига на межзеренных границах накапливается избыток свинца, который способствует локальному появлению жидкой фазы. Возникающая жидкая фаза, участвуя в переносе компонентов материала, не только ускоряет взаимодействие реагирующих компонентов, но и снижает устойчивость их кристаллических решеток из-за образования в них

точечных дефектов. В этом случае состояние решетки определяется как появлением вакансий по кислороду V_O , свинца V_{Pb} , ассоциатов типа $[V_O^{2-} 2Pb_i^{\prime}]$, так и возникновением различных упругих напряжений, что способствует ослаблению химических связей между атомами, обусловленных внесенной дефектностью в анионную подрешетку твердого раствора $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$ при десорбции кислорода.

Список литературы

1. Окадзак К. *Технология керамических диэлектриков*. Москва: Энергия; 1976.
2. Ротенберг Б.А. *Керамические конденсаторные диэлектрики*. С.-Петербург: НИИ Гириконд; 2000.
3. Balke N., Bdikin I. Kalinin S.V., Kholkin A.L. Electromechanical imaging and spectroscopy of ferroelectric and piezoelectric materials: state of the art and prospects for the future. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009;92(8):1629-1647. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2009.03240.x.
4. Kang M.G., Jung W.S., Kang C.Y., Yoon S.J. Recent progress on PZT based piezoelectric energy harvesting technologies. *Actuators*. 2016;5(1):5-22. DOI:10.3390/act5010005.
5. Gurskii L.I., Macutkevic J., Banys J., Poddubskaya A., Saraseko M.N., Petrov A.V., Kalanda N.A. Synthesis and dielectric properties of $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_3$ compounds with nano-inclusions of Cu and Ni. *Physica Status Solidi (c)*. 2013;10(4):640-645. DOI:10.1002/pssc.201200915.
6. Damjanovic D. Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics. *Reports on Progress in Physics*. 1998;61(9):1267-1324. DOI: 10.1088/0034-4885/61/9/002.
7. Королева Л.И., Заширинский Д.М., Хапаева Т.М., Гурский Л.И., Каланда Н.А., Трухан В.М., Шимчак Р., Крзуманска Б. Влияние дефицита кислорода на магнитные, электрические, магнитоэлектрические и магнитоупругие свойства манганитов $La_{0,9}Sr_{0,1}MnO_{3-y}$. *Физика твердого тела*. 2008;50(12):2201-2205.
8. Королева Л.И., Заширинский Д.М., Хапаева Т.М., Гурский Л.И., Каланда Н.А., Трухан В.М., Шимчак Р., Крзуманска Б. Магнитные, электрические, магнитоэлектрические и магнитоупругие свойства манганитов $La_{0,9}Sr_{0,1}MnO_{3-y}$. *Физика твердого тела*. 2010;52(1):92-96.
9. Гурский Л.И., Каланда Н.А., Демьянов С.Е., Голосов Д.А., Завадский С.Е., Петров А.В., Телеш Е.В., Ковалев Л.В. Влияние условий синтеза на электротранспортные свойства сегнетоэлектрических пленок цирконата-титаната свинца. *Доклады БГУИР*. 2011;3(57):44-49.
10. Rodríguez-Carvajal J. Recent developments of the program FULLPROF. *Commission on powder diffraction (IUCr). Newsletter*. 2001;26:12-19.

References

1. Okadzaki K [Technology of the ceramic dielectrics]. Moscow: Energija; 1976. (In Russ.)
2. Rotenberg B.A. [Ceramic capacitor dielectrics]. St.-Petersburg: NII Girikond, 2000. (In Russ.)
3. Balke N., Bdikin I. Kalinin S.V., Kholkin A.L. Electromechanical imaging and spectroscopy of ferroelectric and piezoelectric materials: state of the art and prospects for the future. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009;92(8):1629-1647. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2009.03240.x.
4. Kang M.G., Jung W.S., Kang C.Y., Yoon S.J. Recent progress on PZT based piezoelectric energy harvesting technologies. *Actuators*. 2016;5(1):5-22. DOI:10.3390/act5010005.
5. Gurskii L.I., Macutkevic J., Banys J., Poddubskaya A., Saraseko M.N., Petrov A.V., Kalanda N.A. Synthesis and dielectric properties of $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_3$ compounds with nano-inclusions of Cu and Ni. *Physica Status Solidi (c)*. 2013;10(4):640-645. DOI:10.1002/pssc.201200915.
6. Damjanovic D. Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics. *Reports on Progress in Physics*. 1998;61(9):1267-1324. DOI: 10.1088/0034-4885/61/9/002.
7. Koroleva L.I., Zashirinskii D.M., Khapaeva T.M., Hurski L.I., Kalanda N.I., Trukhan V.M., Shimchak R., Krzumanska B. [The influence of oxygen on magnetic, electrical, magnetoelectric and magnetoelastic properties of $La_{0,9}Sr_{0,1}MnO_{3-y}$ manganites]. *Fizika tverdogo tela*. 2008;50(12):2201-2205. (In Russ.)
8. Koroleva L.I., Zashirinskii D.M., Khapaeva T.M., Hurski L.I., Kalanda N.I., Trukhan V.M., Shimchak R., Krzumanska B. [Magnetic, electrical, magnetoelectric and magnetoelastic properties of $La_{0,9}Sr_{0,1}MnO_{3-y}$ manganites]. *Fizika tverdogo tela*. 2010;52(1):92-96. (In Russ.)
9. Hurski L.I., Kalanda N.A., Demyanov S.E., Golosov D.A., Zavadskii D.A., Petrov A.V., Telesh E.V., Kovalev L.V. [The influence of synthesis conditions on electrical transport properties of lead zirconium titanate ferroelectric films]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2011;3(57):44-49. (In Russ.)
10. Rodríguez-Carvajal J. Recent developments of the program FULLPROF. *Commission on powder diffraction (IUCr). Newsletter*. 2001;26:12-19.

Вклад авторов

Гурский Л.И. выполнил редактирование и окончательное утверждение рукописи для публикации, ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Петров А.В. осуществил обработку данных, редактирование и оформление статьи для публикации.

Голосов Д.А. выполнил синтез образцов $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$, сбор и обработку экспериментальных данных по фазовому составу.

Киреев П.Н. провел исследования структурных свойств образцов $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$ методом рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии.

Каланда Н.А. определил замысел и дизайн исследования, анализ и интерпретацию данных, подготовку статьи к публикации.

Ярмолич М.В. осуществила анализ и интерпретацию экспериментальных данных.

Authors' contribution

Hurski L.I. edited and delivered the final approval of the manuscript for publication, its critical review in terms of significant intellectual content.

Petrov A.V. implemented treatment of the obtained experimental results and prepared the article for publication.

Golosov D.A. synthesized the $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$ samples, collected and processed the experimental results concerning phase composition.

Kireev P.N. carried out measurements of the structural properties of $Pb_{0,85}Ba_{0,25}Zr_{0,53}Ti_{0,47}O_{3-\delta}$ samples by the X-ray diffraction technique and scanning electron microscopy.

Kalanda N.A. defined the concept and design of the research, took part in the data analysis and interpretation, and prepared the article for publication.

Yarmolich M.V. analyzed and interpreted the data.

Сведения об авторах

Гурский Л.И., д.т.н., чл.-кор. Национальной академии наук Беларуси, профессор, главный научный сотрудник Центра 10.1 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Петров А.В., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела криогенных исследований ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Голосов Д.А., к.т.н., доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Киреев П.Н., к.т.н., заведующий отделением машиностроительных материалов ГНУ «Институт порошковой металлургии НАН Беларуси».

Каланда Н.А., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отдела криогенных исследований ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Ярмолич М.В., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела криогенных исследований ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Information about the authors

Hurski L.I., D.Sci, Corr. mem. of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Main Research Fellow of the Centre 10.1 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Petrov A.V., PhD, Senior Research Fellow of the Division of Cryogenic Research of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Golosov D.A., PhD, Associate Professor of the Department of Electronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kireev P.N., PhD, Head of the Department of engineering materials of the SSI "Powder Metallurgy Institute of the NAS of Belarus".

Kalanda N.A., PhD, Leading Research Fellow of the Division of Cryogenic Research of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Yarmolich M.V., PhD, Senior Research Fellow of the Division of Cryogenic Research of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-85-17;
e-mail: lhur@bsuir.by
Гурский Леонид Ильич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-85-17;
e-mail: lhur@bsuir.by
Hurski Leonid Ilyich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-14-22>

УДК 334.029.3

Оригинальная статья
Original paper

ПОДХОД И МОДЕЛИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РЕЕСТРОВ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ДОКУМЕНТОВ В ОБРАЗОВАНИИ

КАЧАН Д.А., ВИШНЯКОВ В.А.

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

Поступила в редакцию 20 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью данной статьи является анализ методов, подходов, средств технологии распределенных реестров для работы с документами в образовании. Задачами статьи являются анализ проблем с подтверждением достоверности документов об образовании, разработки новых структурных решений с использованием технологии блокчейн, рассмотрение двух моделей, а также оценка возможности их использования для документов об образовании.

Подтверждение документов об образовании осуществляется с использованием государственных реестров, что является сложным и ресурсоемким процессом. В мире наблюдается рост количества поддельных документов, что ставит под сомнение эффективность применяемых современных механизмов. Технология распределенных реестров (блокчейн) является устойчивым технологическим трендом, влияющим на развитие и качество цифровой экономики. Наличие механизма проверки достоверности документов об образовании, устойчивого к злонамеренному манипулированию, является актуальной задачей, выходящей за рамки сферы образования, возможные способы решения которой предложены в данной работе.

В статье приведена краткая характеристика технологии распределенных реестров. Рассмотрен подход применения технологии для подтверждения достоверности документов об образовании, состоящий из двух основных этапов: эмиссия цифрового документа об образовании и проверка. Рассмотрена роль доверенной третьей стороны в процессе эмиссии и проверки. Приводятся модели эмиссии и подтверждения цифрового документа на основе технологии распределенных реестров, которая позволяет устранить ограничения и недостатки существующих подходов, выявлена эффективность подхода на базе предложенных моделей. Сформулированные подходы могут быть применимы в различных социально-экономических сферах и сфере государственного управления для работы с аналогичными документами.

Ключевые слова: технология распределенных реестров, блокчейн, смарт-контракт, информационные технологии в образовании, подтверждение подлинности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Качан Д.А., Вишняков В.А. Подход и модели применения технологии распределенных реестров для подтверждения достоверности документов в образовании. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 14-22.

APPROACH AND MODELS FOR USING DISTRIBUTED LEDGER TECHNOLOGY TO AUTHENTICATE EDUCATIONAL DOCUMENTS

DMITRY A. KACHAN, ULADZIMIR A. VISHNIAKOU

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

Submitted 20 February 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of this article is to analyze methods, approaches, and tools of distributed ledger technology (DLT) for working with documents in education. The objectives of the article are to analyze problems with the authentication of educational documents, develop new structural solutions using block chain technology, consider two models, and evaluate their use for educational documents.

Authentication of educational documents is carried out using state registers, which is a complex and resource-intensive process. There is an increase in the number of forged documents in the world, which calls into question the effectiveness of modern mechanisms. Distributed ledger technology (block chain) is a sustainable technological trend that affects the development and quality of the digital economy. The existence of a mechanism for verifying the authenticity of educational documents that is resistant to malicious manipulation is an urgent task that goes beyond the sphere of education, possible solutions to which are proposed to be considered in this paper.

The article provides a brief description of DLT and considers the approach of using the technology to authenticate educational documents. It consists of two main stages: the issue of a digital educational document and its verification. The role of a trusted third party in the issue and validation process is considered. The paper presents the models for issuing and validating digital documents based on distributed ledger technology, which allows one to eliminate the limitations and shortcomings of existing approaches. The effectiveness of the approach based on the proposed models is revealed. The formulated approaches can be applied in various socio-economic areas and public administration to work with similar documents.

Keywords: distributed ledger technology, blockchain, smart contract, information technologies in education, authentication.

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

For citation. Kachan D.A., Vishniakou U.A. Approach and models for using distributed ledger technology to authenticate educational documents. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 14-22.

Введение

Проблема подтверждения достоверности документов об образовании за последние двадцать лет обострилась. В соответствии с докладом «Global Corruption Report: Education», подготовленным организацией Transparency International в 2018 году, в образовании сложилась устойчивая тенденция лавинообразного роста так называемых «degree mill» – учреждений образования, выдающих поддельные документы об образовании, лицензии и др. [1]. В работе [2] приводятся следующие данные:

- в мире насчитывается более 3300 непризнанных университетов, которые осуществляют выдачу поддельных документов об образовании;

- на счету международного преступного синдиката, территориально расположенного в Европе и на Ближнем Востоке, по всему миру получили распространение более 450 000 поддельных дипломов;

- количество ежегодно полученных степеней PhD в США составляет от 40 000 до 45 000 каждый год, количество поддельных – свыше 50 000.

Другой причиной, определяющей необходимость внедрения универсального механизма подтверждения документов об образовании, является миграция населения. Вынужденная

миграция, обусловленная политическими и экономическими факторами, может сопровождаться полной потерей бумажных носителей, подтверждающих полученные квалификации. Сюда также можно добавить стихийные бедствия, реструктуризацию учреждений, что в ряде случаев делает сложным или невозможным подтверждение полученных квалификаций.

Особенности технологии распределенных реестров

Технология распределенных реестров (ТРР) – блокчейн является одним из прорывных решений в рамках белорусской программы «Цифровая экономика». Благодаря заложенному при создании потенциалу и научному заделу, ТРР имеет широкие границы применения и постоянно совершенствуется, открывая все новые способы использования не только как средства осуществления финансовых транзакций [3], но и как средства оптимизации методик управления, в том числе наиболее сложной его разновидности – информационного управления [4]. В работе [5] выделены основные этапы распространения технологии распределенных реестров:

- ТРР версии 1.0 связана с применением криптовалют для финансовых транзакций;
- ТРР версии 2.0 расширяет применимость до заключения цифровых контрактов, дополняя или заменяя традиционные формы договоренностей;
- ТРР версии 3.0 обозначает расширение применения технологии в нефинансовых институтах – сфера государственного управления, здравоохранения, образования и др.

Консенсус в сети ТРР означает согласие участников с определенным состоянием системы как с истинным состоянием и приводит к тому, что все вычислительные узлы совместно используют одни и те же данные, а изменение общего знания происходит по заданному общепринятому алгоритму [6]. Реализация механизма консенсуса осуществляется различными способами, наиболее популярным из которых является механизм POW (Proof-of-Work), предложенный создателем блокчейн-сети Bitcoin [7]. Критика по предложенному алгоритму достижения консенсуса, ввиду неэффективного использования вычислительных мощностей, привела к развитию усовершенствованных алгоритмов, лишенных большинства недостатков POW. В их числе: POS (Proof-of-Stake), POET (Proof-of-Elapsed Time), SBFT (Simplified Byzantine Fault Tolerance), POA (Proof-of-Authority), IBFT (Istanbul Byzantine Fault Tolerance), DAG (Directed Acyclic Graphs) и др. [6].

Дополнительным понятием, используемым при описании особенностей процессов информационного обмена участников сети ТРР, является криптографический токен – вид внутрисетевой «валюты» [8]. С точки зрения информационных технологий токен – это подтверждение прав на выполнение какой-либо транзакции или управление правами доступа. Криптографический токен, используемый в ТРР, совмещает два принципа: метафорическое понимание традиционного платежного средства, его область влияния и права доступа в сети блокчейн. На начальном пути использования ТРР вошло понятие «майнинга» – процесса добывания криптографических токенов [9] – это вознаграждение участникам за предоставление своих вычислительных мощностей для поддержки работы всей сети, поддерживающей ТРР.

Подходы к подтверждению документов на основе блокчейн

Технологически подтверждение достоверности документов является одной из ключевых характеристик технологии распределенных реестров. Технология ТРР позволяет осуществлять подтверждение достоверности (существования) записи в виде хэш-суммы контролируемого документа. Это позволяет построить сервис, который сравнивает представленный документ с хранимым в сети блокчейн, не нарушая конфиденциальность данных – сами документы в сеть не попадают, сравнение осуществляется только на основе их хэш-значений.

Доказательство существования (Proof of Existence). Для получения возможности использования этого механизма используется функция OP_RETURN, отвечающая

за «уничтожение» криптовалютных токенов (используется в механизме консенсуса Proof-of-Burn – подтверждение уничтожения), которой присваивается хэш-значение документа.

Функция OP_RETURN с 2015 года имеет ограничение на длину данных в 40 байт, что является оптимальным значением ввиду используемого алгоритма вычисления хэш-функции SHA-2 (256 бит) – полученное значение хэш-функции имеет длину в 32 байта [10]. Процедура проверки осуществляется по следующему алгоритму – проверяющей стороной вычисляется хэш-значение электронной версии документа и сравнивается полученное значение со значением, указанным в первой транзакции, когда данные были отправлены в блокчейн. На основании сравнения принимается решение о достоверности документа.

Текущее состояние. Учреждения образования осуществляют выдачу дипломов в бумажном виде. Полученные дипломы на бумажных носителях подвержены уничтожению в случае стихийных бедствий и фальсификации. Необходимо установление отдельных связанных подпроцессов для учреждения образования, определяющих выпуск цифровых документов об образовании с использованием ТРР для хранения цифровых «аналогов» документов, а также определение эффективного механизма проверки достоверности документа без участия третьей стороны. Преимущества: надежность хранения, отсутствие посредников в процессе проверки, достоверность полученных данных.

Ограничения. На текущий момент имеется три ограничения. Отсутствует единый формат цифрового документа, что может решаться в рамках Болонского процесса. Отсутствуют производительные информационные системы, способные обеспечить выполнение алгоритмов выдачи/проверки в автоматическом режиме. Отсутствуют законодательные основы цифрового подтверждения достоверности без участия уполномоченного лица – подтверждение документов об образовании осуществляется путем проставления апостиля на копию либо оригинал документа в соответствии с постановлением Гаагской конвенции 1961 года.

Проблема проверки достоверности. Транзакции, связанные с механизмами подтверждения авторства или достоверности с помощью цифрового аналога документа, применяются для предъявления доказательства одной стороны другой. Проверяющая сторона сверяет хэш-значение, временную метку транзакции и принадлежность записи предъявителя. Механизм для автоматизированного подтверждения достоверности документа на основе использования ТРР охватывает лишь две стороны (предъявитель и проверяющий), что недостаточно в случае официальных документов, эмитент которых обязательно должен присутствовать в модели в качестве доверенной третьей стороны (ДТС). Модель подтверждения должна устанавливать не только принадлежность документа эмитенту, но и подтверждать полномочия эмитента на осуществление данного вида деятельности и дополнительные сведения (например, для сферы образования – перечни специальностей подготовки в определенный период времени в соответствии с лицензией). В результате возникает задача получения достоверных данных о ДТС, что говорит о необходимости наднационального органа (в рамках ЕС), хранящего информацию о ДТС. Возможные сценарии подтверждения достоверности: проверка на основании электронно-цифровой подписи; проверка на основании транзакции в сети блокчейн.

Для обоих сценариев проверяющей стороне необходима информация о достоверности предоставленных публичных ключей (их принадлежность к эмитенту) или о принадлежности эмитенту аккаунтов, с которых были совершены транзакции в сеть блокчейн. В обоих случаях требуется доказать полномочия эмитента, в том числе в заданном временном промежутке.

Для целей проверки достоверности документов об образовании в системе Blockcerts (США, Массачусетский институт технологий) используются собственная модель распределенных цифровых идентификаторов, разработанная на основании уникального универсального идентификатора UUID [11], адаптированная модель связанных данных JSON-LD (Linked Data), собственный метод нормализации документа. В качестве одного из основных цифровых идентификаторов предлагается использование URL учреждения образования, достоверность документа зависит от доступности сетевого ресурса сервиса.

Модели эмиссии и подтверждения цифрового документа

Структурная модель процесса эмиссии и выдачи цифрового документа, выполненная в системе условных обозначений бизнес-процессов BPMN 2.0 по TRP, приведена на рис. 1. В основе модели лежит специализированное используемое пользователем мобильное приложение, имеющее функционал электронного криптовалютного «кошелька».

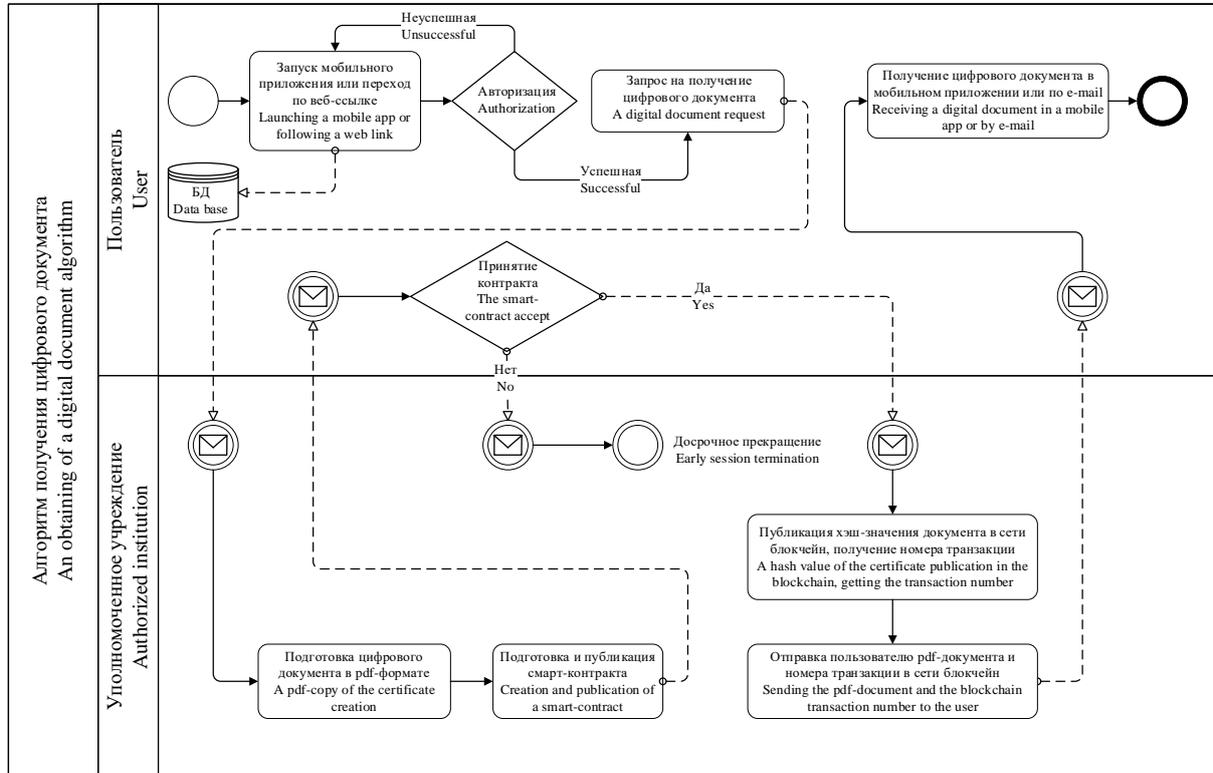


Рис. 1. Модель процесса получения цифрового документа
Fig. 1. Model of the process of obtaining a digital document

Регистрация пользователя (обучающегося) может осуществляться централизованно для лиц, находящихся в процессе обучения, и лиц, данные которых содержатся в базах данных учреждения образования. Для лиц, закончивших обучение и данные которых не содержатся в электронных базах данных, механизм подтверждения может состоять из отправки электронной копии документов об образовании, а также персональных данных для подтверждения регистрации в приложении, установления достоверности документов и последующей подготовки их электронной версии.

После успешной авторизации в приложении пользователь принимает решение об оформлении электронного запроса на получение цифрового документа об образовании. В случае наличия данных пользователя в существующих базах данных дальнейшие шаги осуществляются автоматически на основании заданных в программном обеспечении последовательностей действий: осуществляется проверка более ранних обращений пользователя, при которых процедура подготовки цифрового документа и размещения его хэш-суммы в сети блокчейн уже осуществлялась.

В случае отсутствия записей о ранних обращениях происходит автоматическое формирование цифрового документа в JSON-формате, осуществляется его нормализация (приведение к некому стандартизированному представлению) и происходит публикация смарт-контракта между пользователем и учреждением по выполнению размещения документа в сети блокчейн.

Пользователь получает извещение о предложении заключения смарт-контракта в приложении, и в случае положительного решения происходит следующая последовательность действий: вычисляется значение хэш-функции нормализованного документа JSON-формата с использованием криптографического алгоритма (SHA-2) и формируется сообщение,

состоящее из значения хэш-функции документа, цифровой подписи и номера транзакции в сети блокчейн, необходимое для подтверждения достоверности размещения. Сообщение шифруется асимметричным шифрованием с использованием полученного от пользователя в запросе открытого ключа и передается в приложение пользователя, где расшифровывается закрытым ключом и может быть преобразовано из JSON-формата в вид документа, пригодный к формальному графическому представлению, понятному для человеческого восприятия. В случае если в базе данных содержится информация о предыдущей выдаче запрашиваемого документа об образовании, пакет документов из архива предоставляется пользователю без размещения в сети блокчейн.

Для последующего подтверждения достоверности информация, содержащаяся в реестре ДТС, интегрируется непосредственно в документ, а именно хэш-значение данных о лицензии учреждения, адреса аккаунтов учреждения в сети блокчейн, необходимые номера транзакций, URL для проверки достоверности данных учреждения и др.

Модель подтверждения цифрового документа. Структурная модель процесса подтверждения выданного цифрового документа, без непосредственного участия третьей стороны, выполненная в системе условных обозначений бизнес-процессов BPMN 2.0, приведена на рис. 2. Для подтверждения достоверности проверяющая сторона сверяет данные ДТС с предоставленными данными. Основная решаемая задача на первом этапе проверки – определение достоверности данных об эмитенте. При установлении соответствия происходит второй этап – проверка достоверности документа, а именно его принадлежность эмитенту, достоверность подтверждающей транзакции, хэш-значение и соответствие указанных данных.

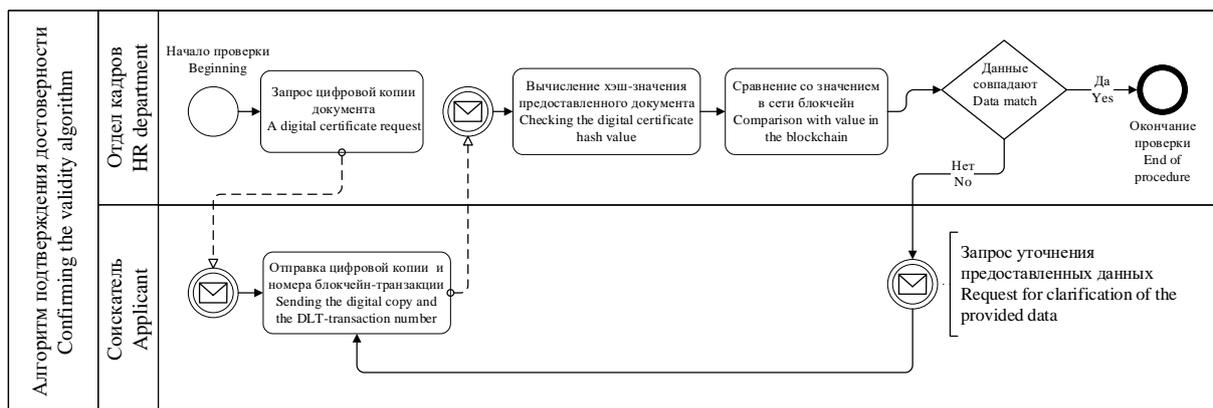


Рис. 2. Модель подтверждения достоверности документа
Fig. 2. Document validation model

Эффективность предложенного метода на основе блокчейн

По сложности итоговой системы подходы на основе цифровой подписи и блокчейн-платформы являются относительно эквивалентными. Оптимальным решением стоит считать сочетание обоих подходов, что даст эффект и повысит надежность системы. Использование блокчейн-платформы в процессах подтверждения достоверности документов предоставляет следующие дополнительные возможности:

- технология распределенных реестров имеет огромный потенциал использования. Наличие ДТС, хранящей данные об электронных аккаунтах учреждений, позволяет построить систему проверки достоверности персональных документов сотрудников и обучающихся, используя схожие механизмы;
- система, построенная на основе блокчейн, практически неуязвима для злонамеренного манипулирования данными;
- использование только электронно-цифровых подписей имеет следующий недостаток: рост вычислительных возможностей делает неустойчивыми ретроспективные данные, а документы об образовании имеют жизненный цикл, значительно превышающий жизненный цикл технологий криптографии;

– криптографическая стойкость сети блокчейн адаптируется в соответствии с вычислительной мощностью вовлеченных участников и находится на постоянно высоком уровне;

– социальные факторы – электронный аккаунт, как подтверждение авторства, адекватно воспринимается пользователями;

– технология распределенных реестров на текущем уровне развития является известным и описанным технологическим трендом и имеет высокий уровень технологической готовности – не ниже TRL9 (технология, прошедшая испытания, имеющая сопроводительную документацию и готовая к промышленному применению) в соответствии с принятой классификацией, предложенной в США (NASA);

– технология прошла пик завышенных ожиданий кривой Гартнера, сохранив достаточный потенциал и доказав свою жизнеспособность [4].

Оценка применимости ТРР. Исходя из особенностей архитектуры, ТРР применима для систем, имеющих следующие признаки:

– необходима общедоступная база данных (база, используемая при подтверждении достоверности документов, не содержит персональных данных) для значительного количества пользователей;

– в течение жизненного цикла системы происходит взаимодействие большого количества участников;

– существуют единые правила для всех сторон, взаимодействующих с системой;

– все процессы в системе прозрачны;

– все процессы, связанные с работой системы, на момент внедрения оцифрованы.

Условия внедрения технологии. Обязательным условием внедрения данных цифровых решений является заверченный процесс информатизации, который предполагает наличие базового информационного слоя – поддерживаемых в актуальном состоянии информационных систем, позволяющих осуществлять автоматизированную обработку данных. Фактически речь идет о «цифровом двойнике» университета – совокупности информационных систем, регистров, баз и банков данных, описывающих его внутренние процессы.

Множество цифровых двойников цифрового университета включает следующие компоненты:

– цифровой двойник обучающегося – реестр, содержащий персонифицированные данные об обучающемся, а также данные о его учебном прогрессе;

– цифровой двойник сотрудника университета – прообраз расширенной кадровой учетной системы, включающий обновляемые данные о научно-исследовательской деятельности, публикационной активности, отдельных индексах, характеризующих эффективность специалиста (индексы цитирования научных статей и др.);

– цифровой двойник инфраструктуры университета – реестр записей о текущем состоянии инфраструктуры, позволяющий осуществлять планирование ее использования, модернизации и развития;

– электронный документооборот.

Заключение

Проведено исследование применимости ТРР для подтверждения достоверности документов. Дано краткое описание ТРР применительно к сфере образования. Приведены подходы к подтверждению документов на основе блокчейн. Разработаны структурные модели эмиссии и подтверждения цифрового документа. Приведены составляющие эффективности от использования подходов и моделей.

В качестве последующей работы необходима программная реализация этих моделей. Базовой платформой для построения определена блокчейн-платформа Microsoft. Требуются моделирование наднациональной ДТС и построение тестовой модели механизма подтверждения достоверности условного документа.

Список литературы

1. Transparency International. Global Corruption Report. *Education*. New York: Routledge; 2013:418-420.
2. Allen E., Bear J. *The Billion-Dollar Industry That Has Sold Over a Million Fake Diplomas*. Updated ed. New York: Prometheus Books; 2019.
3. Качан Д.А. Технологии распределенных реестров и перспективы их использования в системе образования. *Цифровая трансформация*. 2018;4(5):44-55.
4. Вишняков В.А. Использование интеллектуальных и блокчейн технологий в информационном управлении. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2018;1:45-50.
5. Свон М. *Блокчейн: схема новой экономики*. Москва: Олимп-Бизнес; 2017.
6. Клечиков А.В., Пряников М.М., Чугунов А.В. Блокчейн-технологии и их использование в государственной сфере. *Международный журнал открытых информационных технологий*. 2017;5(12):123-129.
7. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. *Coindesk*. 2009;5:9-13.
8. Равал С. *Децентрализованные приложения. Технология Blockchain в действии*. Серия «Бестселлеры О’Reilly». С.-Петербург: Питер; 2017.
9. Rivest R.L., Shamir A. PayWord and MicroMint: Two simple micropayment schemes *Security Protocols*, Springer. 1997;5:69-87.
10. Crespo de Pedro A.S., García L.I.C. Stampery Blockchain Timestamping Architecture (BTA). *Version 6 LTS*. 2017;11:1-21.
11. Leach P., Mealling M., Salz R. *A Universally Unique Identifier (UUID) URN Namespace*. Proposed standard; 2005.

References

1. Transparency International. Global Corruption Report. *Education*. New York: Routledge; 2013:418-420.
2. Allen E., Bear J. *The Billion-Dollar Industry That Has Sold Over a Million Fake Diplomas*. Updated ed. New York: Prometheus Books; 2019.
3. Kachan D.A. [Distributed ledger technologies and prospects of their use in the education system]. *Digital transformation*. 2018;4(5):44-55. (In Russ)
4. Vishnyakou U.A. [Use of intellegent and blockchain technologies in information management]. *System analysis and applied informatics*. 2018;1:45-50. (In Russ)
5. Swan M. [*Blockchain. Scheme new economy*]. Moscow: Olymp-Biznes; 2017. (In Russ)
6. Clechikov A.V., Prianikov M.M., Chugunov A.V. [Blockchain technologies and their use in the public sphere]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2017;5(12):123-129. (In Russ)
7. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. *Coindesk*. 2009;5:9-13.
8. Raval S. [*Decentralized applications. Blockchain technology in action*]. “O’Reilly bestsellers” series. St.-Petersburg: Piter; 2017. (In Russ)
9. Rivest R.L., Shamir A. PayWord and MicroMint: Two simple micropayment schemes *Security Protocols*, Springer. 1997;5:69-87.
10. Crespo de Pedro A.S., García L.I.C. Stampery Blockchain Timestamping Architecture (BTA). *Version 6 LTS*. 2017;11:1-21.
11. Leach P., Mealling M., Salz R. *A Universally Unique Identifier (UUID) URN Namespace*. Proposed standard; 2005.

Вклад авторов

Качан Д.А. выявил проблемы подтверждения документов в образовании и предложил их решения с использованием блокчейн, разработал модели эмиссии и подтверждения цифрового документа.

Вишняков В.А. детализировал построение технологии распределенных реестров в образовании, определил эффективность метода работы с документами в образовании на основе блокчейн.

Authors' contribution

Kachan D.A. identified the problems of document authentication in education and proposed the blockchain-based solutions, developed models of the issue and authentication of a digital document.

Vishniakou U.A. detailed the construction of distributed ledger technology in education and determined the effectiveness of the blockchain-based method to work with educational documents.

Сведения об авторе

Вишняков В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Качан Д.А., соискатель кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Vishniakou U.A., D.Sci, Professor, Professor of Infocommunication Technologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kachan D.A., PhD student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Department of Infocommunication Technologies.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +3750172457569;
e-mail: vish2002@mail.ru
Вишняков Владимир Анатольевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +3750172457569;
e-mail: vish2002@mail.ru
Vishniakou Uladzimir Anatolievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-23-30>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.37

СПОСОБЫ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СВЕРХШИРОКОДИАПАЗОННЫХ ПРИЕМНЫХ ТРАКТОВ

АРХИПЕНКОВ Д.В., ЗАБЕНЬКОВ И.И., СОЛОНОВИЧ С.С.

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

Поступила в редакцию 25 мая 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В настоящее время происходит активное совершенствование систем радиомониторинга в направлении расширения диапазона рабочих частот и ширины спектра обрабатываемых сигналов, что в ряде случаев требует изменения подходов при проектировании их приемных устройств. Целью статьи является обоснование способов и схемотехнических вариантов реализации приемного устройства сверхширокодиапазонной системы радиомониторинга и обоснование последовательности выбора элементной базы и расчета параметров приемного тракта. Показано, что за основу целесообразно выбрать инфрадинную структуру радиоприемного тракта, в которой частота зеркального канала расположена далеко от частоты основного канала, поэтому зеркальный канал легко подавляется простым фильтром нижних частот. Одной из основных проблем, возникающих при проектировании сверхширокодиапазонных радиоприемных устройств, является одновременное обеспечение большого динамического диапазона и низкого коэффициента шума. Для уменьшения коэффициента шума был предложен вариант построения тракта, начиная с малошумящего усилителя с повышенными параметрами нелинейной избирательности, что является допустимым при малой вероятности появления интермодуляционных комбинаций. В статье предложено приемное устройство с рабочим диапазоном частот 0,5–18 ГГц и аналоговым-цифровым преобразователем со скоростью до 10,4 GSPS. Для приемных устройств была подобрана элементная база и произведен расчет основных параметров тракта. На ряде примеров проанализированы способы увеличения динамического диапазона радиоприемного устройства и влияние параметров элементной базы на технические характеристики устройства. Описаны основные технические характеристики радиоприемного устройства для эффективной работы современных комплексов радиомониторинга и способы увеличения его динамического диапазона.

Ключевые слова: сверхширокодиапазонный приемный тракт, коэффициент шума, динамический диапазон, интермодуляция третьего порядка.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Архипенков Д.В., Забеньков И.И., Солонович С.С. Способы структурно-функциональной реализации сверхширокодиапазонных приемных трактов. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 23-30.

METHODS OF STRUCTURAL AND FUNCTIONAL IMPLEMENTATION OF ULTRA-WIDE RANGE RECEIVING PATHS

DMITRY V. ARKHIPENKOV, IGOR I. ZABENKOV, SERGEY S. SALANOVICH

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

Submitted 25 May 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Currently, radio monitoring systems are being actively improved in the direction of expanding the range of operating frequencies and the width of the spectrum of processed signals, which in some cases requires changing approaches to the design of their receiving devices. The purpose of the article is to substantiate the methods and circuit design options for implementing a receiver of an ultra-wide-range radio monitoring system and to justify the sequence of selecting the element base and calculating the parameters of the receiving path. The research proves expedient to choose the infradine structure of the radio receiving path as a basis, in which the frequency of the mirror channel is located far from the frequency of the main channel, so the mirror channel is easily suppressed by a simple low-pass filter. One of the main problems that arise when designing ultra-wide-band radio receivers is the simultaneous provision of a large dynamic range and a low noise figure. To reduce the noise figure, a variant of constructing a path was proposed, starting with a low-noise amplifier with increased parameters of nonlinear selectivity, which is acceptable if there is a low probability of intermodulation combinations. The article suggests a receiver with an operating frequency range of 0.5–18 GHz and an analog-to-digital converter with a speed of up to 10.4 GSPS. The element base was selected for the receiving devices and the main parameters of the path were calculated. A number of examples are used to analyze the ways to increase the dynamic range of a radio receiver and the influence of element base parameters on the device performance. The main technical characteristics of the radio receiver for effective operation of modern radio monitoring systems and the ways to increase the dynamic range thereof are described.

Keywords: ultra-wide-range receiving path, noise coefficient, dynamic range, third-order intermodulation.

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

For citation. Arkhipenkov D.V., Zabenkov I.I., Salanovich S.S. Methods of structural and functional implementation of ultra-wide range receiving paths. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 23-30.

Введение

Классические приемы расширения диапазона частот радиомониторинга путем совершенствования СВЧ-узлов приемников радиосигналов путем наращивания рабочей полосы каналов СВЧ-приемников и увеличения их числа исчерпали себя и не могут обеспечить требуемое расширение рабочего диапазона частот. На сегодняшнем этапе развития радиоэлектроники существенного расширения частотного диапазона радиоприемных устройств с одновременным улучшением их технических и массогабаритных характеристик можно достичь путем использования цифровых технологий обработки радиосигналов [1]. Наибольшее применение в задачах радиомониторинга находят многоканальные и матричные цифровые радиоприемные устройства, представляющие сочетание преобразователя радиосигналов с фиксированной промежуточной частотой (ПЧ) и блока аналогово-цифровой обработки, обеспечивающего параллельную или параллельно-последовательную обработку сигналов в полосе одновременного анализа с необходимым частотным разрешением [2].

Целью статьи является обоснование способов и схемотехнических вариантов реализации приемного устройства сверхширокополосной системы радиомониторинга, а также последовательности выбора элементной базы и расчета параметров приемного тракта.

Основной проблемой, возникающей при создании сверхширокодиапазонного приемного устройства, является одновременное обеспечение большого динамического диапазона (ДД) и низкого коэффициента шума (N) [3].

Системные параметры приемного тракта

В настоящее время происходит активное совершенствование систем радиомониторинга в направлении расширения диапазона рабочих частот и ширины спектра обрабатываемых сигналов. Это требует изменения подходов к проектированию приемных устройств средств радиомониторинга. Нижняя частотная граница диапазона в используемых при радиомониторинге отечественных и зарубежных средствах обычно равна 9 кГц. Верхняя граница диапазона для базового состава радиоприемных устройств составляет 3 ГГц, а с дополнительным оборудованием может составлять 6, 8 или 18 ГГц, причем тенденция повышения верхней граничной частоты остается [2]. В данной статье остановимся на частотном диапазоне 0,5–18 ГГц.

Согласно классификации радиоприемных трактов по структурной схеме можно выделить следующие виды радиоприемных устройств для данного диапазона: супергетеродинные, инфрадинные, прямого усиления, комбинация супергетеродинной и инфрадинной схем.

По способу обзора в широкой полосе можно выделить следующие радиоприемные устройства: сканирующие, многоканальные, матричные.

В статье за основу выбран сканирующий инфрадинный способ построения структуры радиоприемного устройства. Данный выбор характеризуется тем, что в качестве входной избирательной системы можно использовать фильтр нижних частот за счет высокой первой промежуточной частоты. Инфрадинный принцип построения приемных трактов требует выбора величины первой промежуточной частоты больше верхней частоты приемного радиоканала, а частоты гетеродина – еще выше. Это усложняет структуру тракта гетеродина, так как к нему должны быть предъявлены повышенные требования к стабильности частоты [4]. В отличие от инфрадинного способа построения радиотракта, в супергетеродинном необходимо использовать матрицу фильтров, коммутируемых ключами на входе и выходе, что приводит к увеличению коэффициента шума.

Матричный способ организации приема радиосигналов в широком диапазоне частот практически не работоспособен. При расширении полосы свыше 1–2 ГГц [1] из-за множества одновременно работающих источников радиоизлучения (ИРИ) повышается вероятность совмещения сигналов по времени, что при переносе широкой полосы ПЧ приводит к неоднозначному определению частоты. При использовании сканирующего приемника возможен пропуск цели. Вероятность пропуска уменьшается с увеличением скорости перестройки частоты сканирования, однако при этом ухудшается разрешающая способность по частоте и снижается чувствительность. Многоканальный приемник позволяет уменьшить время анализа за счет разбиения диапазона ПЧ. Недостатком данного приемника являются необходимость обеспечения высокой избирательности канальных фильтров, уменьшающей неоднозначность измерений при попадании в тракт мощных сигналов, а также необходимое для обеспечения хорошей точности усложнение аппаратуры, влекущее за собой увеличение массогабаритных показателей [5].

Эффективность работы радиоприемных устройств современных комплексов радиомониторинга определяется в основном следующими техническими характеристиками:

- чувствительность и ДД по интермодуляционным искажениям;
- широкополосность;
- скорость обзора по частоте;
- коэффициент подавления побочных каналов приема и уровень паразитного излучения собственных гетеродинов.

При увеличении широкополосности возникает необходимость сохранения ДД. Для этого существует несколько способов [6]:

1. Установка на входе приемника ограничителя сигналов, который будет нормировать мощность больше определенного уровня к некоторому безопасному уровню для входных каскадов.

2. Использование системы автоматической регулировки усиления (APУ) в тракте радиоприемного устройства.

3. Применение входных малошумящих высокочастотных усилителей с большим ДД.

4. Двойное, тройное преобразование частоты с помощью балансных смесителей с повышенным ДД.

5. Оптимальное распределение усиления по тракту для расширения ДД при заданных коэффициентах шума.

6. Отключение первого усилителя при наличии большого уровня сигнала на входе.

В источнике [7] представлены формулы для расчета основных параметров радиоприемного тракта:

1. Коэффициента шума радиоприемного устройства

$$N = N_1 + \frac{N_2 - 1}{K_{p1}} \cdot \frac{\Delta f_{2p}}{\Delta f_p} \cdot \zeta_{21} + \frac{N_3 - 1}{K_{p1} \cdot K_{p2}} \cdot \frac{\Delta f_{3p}}{\Delta f_p} \cdot \zeta_{32} + \dots + \frac{N_n - 1}{K_{p1} \cdot K_{p2} \cdot \dots \cdot K_{pn-1}} \cdot \frac{\Delta f_{np}}{\Delta f_p} \cdot \zeta_{(n,n-1)}, \quad (1)$$

где N_i – коэффициент шума каскада; K_{pi} – коэффициент усиления каскада; n – количество каскадов; $\zeta_{(n,n-1)}$ – коэффициент согласования n -го каскада с предыдущим; Δf_{np} – полоса пропускания всех каскадов, начиная с номера n и до выхода всей приемной системы; Δf_p – результирующая полоса пропускания всей приемной системы.

2. Интермодуляция третьего порядка для радиоприемного устройства

$$IP3 = \frac{1}{\frac{1}{IP3_1} + \frac{K_{p1}}{IP3_2} + \frac{K_{p1} \cdot K_{p2}}{IP3_3} + \dots + \frac{K_{p1} \cdot K_{p2} \cdot \dots \cdot K_{pn-1}}{IP3_n}}, \quad (2)$$

где $IP3_i$ – интермодуляции третьего порядка i -го каскада.

3. Сквозной коэффициент усиления

$$K = \sum_{i=1}^n K_{pi} (dB). \quad (3)$$

4. Чувствительность

$$P_p = \kappa \cdot T \cdot \Delta f_p \cdot \gamma \cdot N, \quad (4)$$

где κ – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура (300 К или 297 К); γ – отношение сигнал/шум.

5. Динамический диапазон по интермодуляции J порядка

$$DD_J = (IPJ_{BX} / U_{BX.min})^{\frac{J-1}{J}} \text{ (разы)} \text{ или } DD_J = \frac{J-1}{J} (IPJ_{ex} - U_{BX.min}) (dB), \quad (5)$$

где J – порядок, $U_{BX.min}$ – чувствительность радиоприемного устройства, IPJ_{BX} – интермодуляция J порядка по входу.

Обоснование структуры на основе инфрадина

При проектировании радиоприемного тракта главной задачей является выбор и наполнение звеньев структуры конкретными элементами (микросхемами). При выборе элементов ключевыми становятся такие характеристики, как коэффициент усиления элемента (Power Gain), точки однодецибельной компрессии по входу (IP1) и выходу (OP1) элемента, точки пересечения интермодуляционных искажений 2-го и 3-го порядка по входу (IP2, IP3) и выходу (OP2, OP3) элемента, коэффициент шума (Noise Figure), напряжение питания (Voltage)

и ток потребления (Current), стоимость. В настоящей статье рассматривались варианты реализации на современных аналоговых микросхемах обработки сигналов и аналогоцифровых преобразователях ведущих мировых производителей.

На рис. 1 представлен вариант схемотехнической реализации радиоприемного тракта, который состоит из набора полосовых фильтров, усилителей, смесителя с преобразованием частоты «вверх», тракта первой ПЧ, состоящего из полосовых фильтров и усилителей, второго смесителя с переносом частоты «вниз» и тракта второй ПЧ. Тракт обеспечивает полосу пропускания первой ПЧ 1 ГГц, имеет относительно низкую стоимость и может быть использован в средствах радиомониторинга с панорамным обзором.

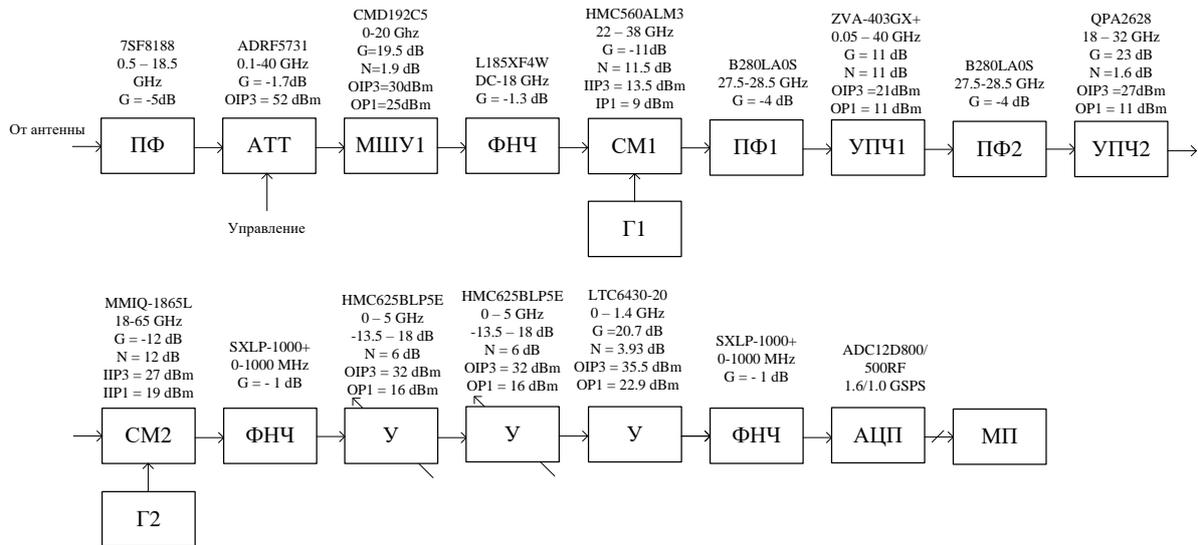


Рис. 1. Структура радиоприемного тракта с полосой пропускания первой ПЧ в 1 ГГц

Fig. 1. Structure of the radio receiving path with the bandwidth of the first IF in 1 GHz

Результаты расчетов параметров для указанного тракта представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов

Table 1. Result of calculation

Коэффициент шума, дБ Noise figure, dB	ПРЗ, дБм IP3, dBm	Сквозной коэффициент усиления, дБ End-to-end gain, dB
11,1	-5,5	45

Основной вклад в общий коэффициент шума радиоприемного устройства вносят первые каскады, а в IP3 – последние каскады, поэтому если есть запас по коэффициенту шума N , то можно увеличить его до максимально требуемого значения, что даст возможность увеличить ДД по интермодуляции третьего порядка. Для уменьшения коэффициента шума можно предложить вариант построения широкополосного приемного тракта, начинающегося не по классическому принципу (с входного фильтра), а с малозумящего усилителя радиосигнала, имеющего большое значение коэффициента усиления и повышенные параметры нелинейной избирательности (OP1 и OIP3). Но при этом стоит учесть, что если первый каскад – усилитель, то коэффициент шума уменьшится, но вероятность появления интермодуляционных комбинаций $2f_1 \pm f_2$ и $2f_2 \mp f_1$ станет выше.

Если в структуре, представленной на рис. 1, поменять местами входной усилитель с фильтром, то при использовании МШУ MAAL-011129 коэффициент шума радиоприемного тракта будет составлять 6,5 дБ, а при использовании VZP120UC1CR с $N = 0,7$ дБ и $K_p = 28$ дБ, OIP3 = 30 дБм коэффициент шума радиоприемного устройства будет равен 3,6 дБ, т. е. выигрыш составит 7,5 дБ.

В качестве показателя эффективности средства радиомониторинга применяется вероятность $p(t_{pm} \leq T_c)$ выполнения соответствующей задачи радиомониторинга за определенный интервал времени. При решении данной задачи эта вероятность в основном

зависит от скорости панорамного спектрального анализа, обеспечиваемой радиоприемным устройством [2].

При использовании синтезатора частот (СЧ) ADF4371, со встроенным генератором управляемым напряжением (ГУН), время сканирования рабочей полосы путем перебора частот гетеродина займет 54 мс. Это основано на расчете количества переключений и технических характеристик СЧ и минимальном времени приема радиосигналов на заданной частоте.

Для увеличения скорости обзора по частоте необходимо увеличивать полосу анализа. Поэтому для увеличения скорости сканирования рабочего диапазона частот заменим аналогово-цифровой преобразователь ADC12D800/500RF с частотой дискретизации 1,6 GSPS на ADC12DJ5200RF с частотой дискретизации 10,4 GSPS. Это позволит расширить мгновенную полосу анализа с 1 до 5 ГГц, а время сканирования уменьшить до 11 мс. Реализация данной структуры представлена на рис. 2.

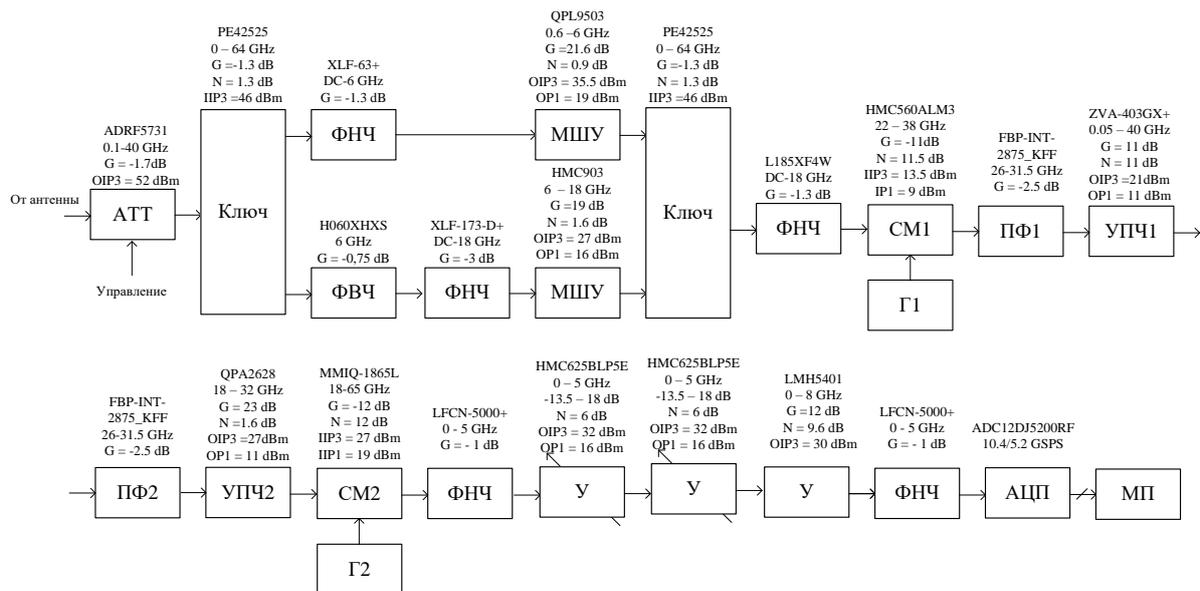


Рис. 2. Структура радиоприемного тракта с полосой пропускания первой ПЧ в 5 ГГц
Fig. 2. Structure of the radio receiving path with the bandwidth of the first IF in 5 GHz

В табл. 2 представлены результаты расчета радиоприемного тракта с элементами, изображенными на рис. 2, где приведен расчет для двух преселекторов: 1–6 ГГц и 6–18 ГГц.

Таблица 2. Результаты расчетов
Table 2. Result of calculation

Диапазон частот, ГГц Frequency range, GHz	Коэффициент шума, дБ Noise figur, dB	ППЗ, дБм IP3, dBm	Сквозной коэффициент усиления, дБ End-to-end gain, dB
1–6	7,52	-17,6	45,7
6–18	11,4	-15,2	44

Заключение

В статье обоснованы способы и варианты схемотехнической реализации приемных трактов, которые могут быть полезны разработчикам сверхширокодиапазонных систем радиомониторинга и других радиотехнических систем, использующих сигналы с большой шириной спектра.

При необходимости обеспечения в устройстве одновременно высокой чувствительности и избирательности можно использовать коммутируемые комбинированные преселекторы, обеспечивающие данные показатели.

Список литературы

1. Карманов Ю.Т., Николаев А.Н., Зеленцова Я.Г., Поваляев С.В., Заляцкая И.И. Применение монобитной цифровой технологии обработки радиосигналов в широкодиапазонных радиоэлектронных системах. *Вестник ЮУрГУ*. 2014;14(3):11-18.
2. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. *Радиомониторинг задачи, методы, средства*. Москва: Горячая линия – Телеком; 2006.
3. Цыпленков Ю.С., Овчинников В.Г. Разработка радиолокационного приемника с большим динамическим диапазоном для обнаружения БПЛА. *Наноиндустрия*. 2019;5(89):439-447. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.439.447.
4. Богданович Б.М., Воронов А.И., Забеньков И.И., Позняк С.С. Инфрадинный прием. *Радиотехника*. 1982;37(9):3-13.
5. Куприянов А.И. *Теоретические основы радиоэлектронной борьбы*. Москва: Вузовская книга; 2007.
6. Цыпленков Ю.А., Овчинников В.Д., Баранов В.Г. Методология разработки радиолокационного приемника с большим динамическим диапазоном и низким коэффициентом шума. *Современная электроника*. 2019;3:44-51.
7. Онищук А.Г., Забеньков И.И., Амелин А.М. *Радиоприемные устройства*. Минск: Новое знание; 2007.

References

1. Karmanov U.T., Nikolaev A.N., Zelecova Y.G., Povalayev S.V. [Application of monobit digital radio signal processing technology in wide-range radio-electronic systems]. *Vestnik UYrGU = Bulletin of the South Ural state university*. 2014;14(3):11-18. (In Russ.)
2. Rembovsky A.M., Ashihmin A.V., Kozmin V.A. [*Radiomonitoring tasks, methods*]. Moscow: Garachay linia –Telekom; 2006. (In Russ.)
3. Tsyplenkov Y.S., Ovchinnikov V.G. [Developing a radar receiver with a large dynamic range for UAV detection]. *Nanoindustria = Nanoidustry*. 2019;5(89):439-447. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.439.447. (In Russ.)
4. Bogdonovich B.M., Voronov, A.I., Zabenkov I.I. [Infradyne receiving]. *Radiotekhnika = Radiotechnics*. 1982;37(9):3-13. (In Russ.)
5. Kyprianov A.I. [*Theoretical foundations of electronic warfare: a tribunal*]. Moscow: Vyzovscay kniga; 2007. (In Russ.)
6. Ciplenkov U.A., Ovchinnikov V.D., Baranov V.G. [Methodology for developing a radar receiver with a large dynamic range and low noise coefficient]. *Sovremennay electronica = Modern electronics*. 2019;3:44-51. (In Russ.)
7. Onishchuk A.G., Zabenkov I.I., Amelin A.M. [*Receivers*]. Minsk: Novie znania; 2007. (In Russ.)

Вклад авторов

Архипенков Д.В. разработал структурно-функциональные схемы радиоприемных трактов, подобрал элементную базу, произвел оптимизацию трактов.

Забеньков И.И. выполнил постановку задачи, научное руководство.

Солонович С.С. подобрал элементную базу, произвел оптимизацию трактов.

Authors' contribution

Arkhipenkov D.V. developed structural and functional schemes of radio receiving paths, selected the element base, and optimized the paths.

Zabenkov I.I. set out the problems and acted as a scientific advisor.

Salanovich S.S. picked up the element base and carried out optimization paths.

Сведения об авторах

Архипенков Д.В., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Забеньков И.И., д.т.н, профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Солонович С.С., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Архипенков Дмитрий Владимирович

Information about the authors

Arkhipenkov D.V., PG student of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zabenkov I.I., D.Sci, Professor, Professor of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Salanovich S.S., PG student of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Arkhipenkov Dmitry Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-31-39>

Оригинальная статья
Original paper

УДК [621.384.64:539.1.089.6]: 615.849.1

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ПАЦИЕНТОВ В ПОЛОЖЕНИИ ПРОВЕДЕНИЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕДИЦИНСКИХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПАРАМЕТРЫ ДОСТАВЛЯЕМОГО ИМ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТРЕХМЕРНОГО ДОЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

ПЕТКЕВИЧ М.Н.¹, ТИТОВИЧ Е.В.², БЕЛЬКОВ Г.В.¹

¹МГЭИ им. А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)

²УП «АДАНИ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 3 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В результате развития лучевой терапии онкологических заболеваний у врачей – радиационных онкологов появилась возможность прецизионно доставлять индивидуальные дозовые распределения в объем опухоли, максимально снизив дозовые нагрузки на критические органы, находящиеся в непосредственной близости к зоне облучения. Однако для корректного применения таких методов терапии необходимо было ужесточить требования, предъявляемые к технико-дозиметрическим параметрам радиотерапевтического оборудования, точности настройки и калибровки его геометрических, механических и радиационных параметров. Цель работы – определение величины возможной ошибки при позиционировании пациента в положении проведения лучевого лечения с использованием медицинских линейных ускорителей электронов путем моделирования воздействия тела пациента на радиотерапевтический стол (РТС). Для определения величин ошибки авторами рассмотрена конструкция и характеристики типовых РТС, разработана модель «среднего» тела пациента, позволяющая изменять нагрузку на терапевтическую поверхность (ТП) РТС с шагом 1 кг. Определены параметры положения ТП для основных локализаций лучевой терапии злокачественных новообразований: опухолей головного мозга и шеи, опухолей грудной клетки и малого таза. Экспериментально установлены численные величины отклонения ТП в изоцентре радиационного поля от предписанного горизонтального положения при нагрузке на нее от 40 до 180 кг для ТП, используемых в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова. На основании полученных экспериментальных данных показана необходимость проведения коррекции условий облучения пациента на этапе моделирования параметров его лечения для обеспечения требуемой протоколами лучевой терапии точности доставки индивидуальных дозовых распределений, для чего следует провести анализ зависимости отклонений в дозе, доставляемой пациентам, от величины отклонения ТП РТС от горизонтального положения для каждого используемого в клинической практике РТС, а также разработать и внедрить механизм, который позволит учитывать эту информацию при выборе параметров сеанса облучения и предписания дозы для любой локализации злокачественных новообразований.

Ключевые слова: линейный ускоритель, радиотерапевтический стол, фантом, величина отклонения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Петкевич М.Н., Титович Е.В., Бельков Г.В. Влияние точности позиционирования онкологических пациентов в положении проведения лучевой терапии с использованием медицинских линейных ускорителей электронов на параметры доставляемого им индивидуального трехмерного дозового распределения. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 31-39.

THE EFFECT OF CANCER PATIENTS' POSITIONING ACCURACY DURING RADIATION THERAPY SESSIONS USING MEDICAL LINEAR ELECTRON ACCELERATORS ON THE PARAMETERS OF THEIR INDIVIDUAL 3D DOSE DISTRIBUTION

MAKSIM N. PIATKEVICH¹, EGOR V. TITOVICH², GEORGE V. BELKOV¹

¹*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

²*Unitary Enterprise "ADANI" (Minsk, Belarus)*

Submitted 3 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Due to the rapid development and further improvement of radiation treatment technologies oncologists have an opportunity to precisely deliver individual dose distributions to the tumor, minimizing the doses obtained by critical organs and healthy structures. For the correct and successful application of these complex methods of radiation therapy, it was necessary to enforce the requirements for the technical and dosimetric parameters of the radiotherapy equipment. The purpose of the research is to determine the magnitude of the possible error for patients' positioning during their radiotherapy treatments using medical linear accelerators by modeling the impact of the patient's body on the treatment couch. To determine the values of a possible error, the authors have considered the design and characteristics of a typical treatment couch, developed a model of the "average" patient's body (phantom), which allowed changing the load to the treatment couch with a step of 1 kg. The position parameters of treatment couches were determined for the main types of localization of radiation therapy for malignant tumors: head and neck tumors, breast tumors and pelvic tumors. Numerical values of the treatment couch deviations from prescribed horizontal position were experimentally established for a load from 40 to 180 kg for a treatment couch used at the N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus. Based on the obtained experimental data, the necessity to correct the patient's treatment conditions at the stage of treatment planning were confirmed in order to ensure the delivery accuracy of individual dose distributions as required by the radiation therapy protocols. Authors stated that an analysis of the dependence of the deviations in the dose delivered to the patients on the deviation of the radiotherapy table from its horizontal position should be carried out for each radiotherapy table used in clinical practice. The development and implementation of a mechanism that will allow considering this information when choosing the parameters of the patient's treatment session and prescribing the dose for any localization of malignant neoplasms is needed.

Keywords: linear accelerator, treatment couch, phantom, patient's treatment position.

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

For citation. Piatkevich M.N., Titovich E.V., Belkov G.V. The effect of cancer patients' positioning accuracy during radiation therapy sessions using medical linear electron accelerators on the parameters of their individual 3D dose distribution. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 31-39.

Введение

Одной из актуальных проблем современного здравоохранения является проблема борьбы с онкологическими заболеваниями, занимающими второе место после сердечно-сосудистых заболеваний по количеству летальных исходов [1, 2]. В комплексе проводимых в онкологии лечебно-профилактических мероприятий одно из ведущих мест принадлежит лучевой терапии, которая достигла значительных успехов и в современных условиях может быть использована при лечении более 60 % онкологических пациентов [3].

Современные линейные ускорители электронов, используемые в Республике Беларусь, позволяют проводить прецизионное облучение опухолей с минимальной дозовой нагрузкой на окружающие здоровые ткани и органы. Такое лечение требует соблюдения высокой точности

в позиционировании пациента во избежание недооблучения опухоли и переоблучения нормальных тканей [4–5].

Система позиционирования пациента, основным элементом которой является радиотерапевтический стол (РТС), входит в состав каждого терапевтического аппарата лучевой терапии (ЛТ). Конструкционные характеристики РТС, такие как размер, диапазон перемещений по каждой из используемых осей, материал терапевтической поверхности (ТП) стола и др., оказывают непосредственное влияние на точность и качество проведения ЛТ [5]. В работе¹ описан способ проверки горизонтальности ТП (деки) РТС, который позволяет оценить прогиб края стола, выдвинутого до положения изоцентра при нагрузке 70–80 кг на расстоянии 20 см от края. Однако не рассмотренными остаются величины нагрузок, при которых возникают отклонения от горизонтальности ТП РТС, которые могут привести к превышению предельно допустимых отклонений в положении пациента, что повлияет на качество проводимых процедур облучения. В частности, известно, что отклонение данного параметра более чем на 5 мм может повлиять на геометрическую и дозиметрическую точность подведения дозы к опухоли при проведении курса ЛТ [5]. Цель работы – определение величины возможной ошибки при позиционировании пациентов в положении проведения лучевого лечения с использованием медицинских линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) путем моделирования воздействия тела пациента на РТС для трех основных видов локализаций злокачественных новообразований: опухолей головного мозга и шеи, опухолей грудной клетки и опухолей малого таза.

Методика проведения эксперимента

В настоящее время все современные коммерческие медицинские ЛУЭ оснащены системой позиционирования пациентов, в состав которой входит РТС, органы управления положениями РТС, индикаторы положений РТС, электронный блок обработки сигналов, система автоматической настройки параметров РТС, система аварийного отключения ЛУЭ и другие механизмы и устройства в зависимости от поколения и назначения ЛУЭ. Структурная схема ЛУЭ представлена на рис. 1.

РТС состоит из ТП с двумя и более направлениями движений для укладки пациента и крепления фиксирующих устройств, подъемного механизма, поворотной платформы и разъемов для подключения необходимых периферийных устройств. ТП представляет собой цельную панель из углеродного волокна без металлических вставок, грузоподъемностью до 227 кг, толщиной от 5 до 7,5 см. Такая конструкция РТС позволяет воспроизводить стабильное положение пациента от сеанса к сеансу для реализации современных методов ЛТ, при которых требуется высокая точность.

Терапевтические поверхности различных моделей РТС имеют конструктивные различия даже у одного производителя в зависимости от поколения ЛУЭ и его назначения. К конструктивным различиям относятся толщина ТП, а также геометрическая форма и расположение опорных рельсов в случае их использования.

На примере РТС «Ехаст IGRT» (рис. 2) рассмотрены типовые характеристики системы позиционирования пациентов. РТС имеет четыре направления движения – продольное, поперечное, вертикальное и вращательное вдоль осевой линии пучка (изоцентрическое вращение). Диапазоны движений определены производителем таким образом, чтобы беспрепятственно и безопасно реализовать возможные положения пациента для облучения большинства локализаций.

¹ Тарутин И.Г., Титович Е.В., Гацкевич Г.В., Жигун А.А. *Методы оценки характеристик лучевого лечения онкологических пациентов при проведении высокотехнологического облучения на медицинских ускорителях электронов*. Инструкция по применению № 037-1-0515. Утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 18.06.2015. Tarutin I.G., Titovich E.V., Gatskevich G.V., Zhigong A.A. [Methods for assessing the characteristics of radiation treatment of cancer patients during high-tech irradiation at medical electron accelerators]. Instructions for use No. 037-1-0515. Approved by the Ministry of Health of the Republic of Belarus 18.06.2015.

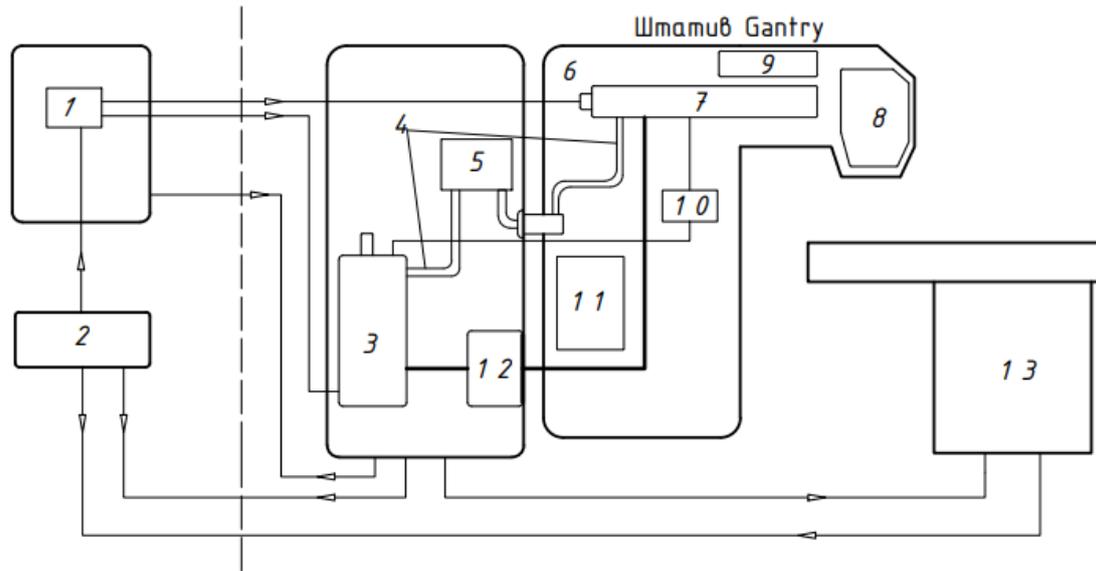


Рис. 1. Структурная схема линейного ускорителя: 1 – модулятор, 2 – консоль управления, 3 – СВЧ генератор или усилитель, 4 – волновод, 5 – циркулятор, 6 – электронная пушка, 7 – ускорительная секция, 8 – поворотный магнит и устройства формирования радиационного пучка, 9 – система поддержания вакуума, 10 – автоматическая система контроля и подстройки частоты, 11 – пневматическая система, 12 – система водного охлаждения, 13 – РТС [5]

Fig. 1. Block diagram of a linear accelerator: 1 – modulator, 2 – control console, 3 – microwave generator or amplifier, 4 – waveguide, 5 – circulator, 6 – electron gun, 7 – accelerator section, 8 – turn magnet and radiation beam forming devices, 9 – vacuum maintenance system, 10 – automatic frequency control and adjustment system, 11 – pneumatic system, 12 – water cooling system, 13 – radiation therapy table [5]

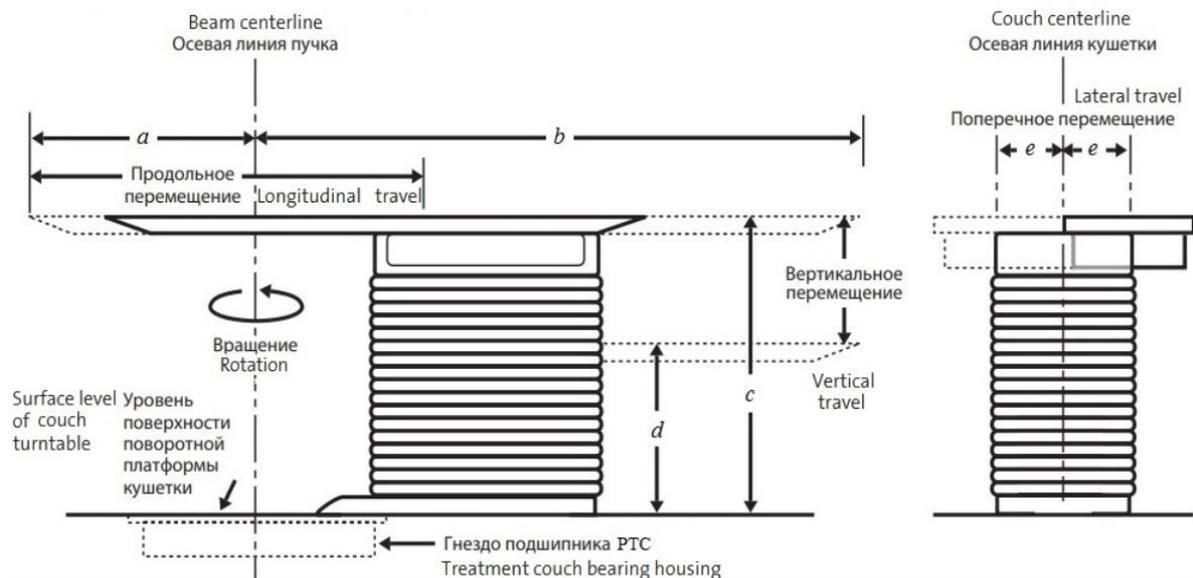


Рис. 2. РТС «Exact IGRT»: a – вперед; b – назад; c – вверх; d – вниз; e – влево/вправо²
Fig. 2. Radiation therapy table “Exact IGRT”: a – in; b – out; c – up, d – down; e – to the left/ to the right²

²Exact IGRT Couch Specification – Varian Medical Systems, Inc., 2007–2009, USA. P. 4.

Разработка модели тела человека

При облучении онкологических пациентов параметры их расположения на поверхности РТС выбираются индивидуально для каждого клинического случая с учетом характеристик плана лучевой терапии. Тем не менее установлено, что при изменении продольного положения РТС для пациентов, имеющих избыточный вес, имеет место отклонение ТП от горизонтального положения (n) [5]. На рис. 3 показано положение пациента на РТС при облучении опухолей, расположенных в области малого таза. В таких случаях ТП выдвигается в крайнее продольное положение или близкое к нему.

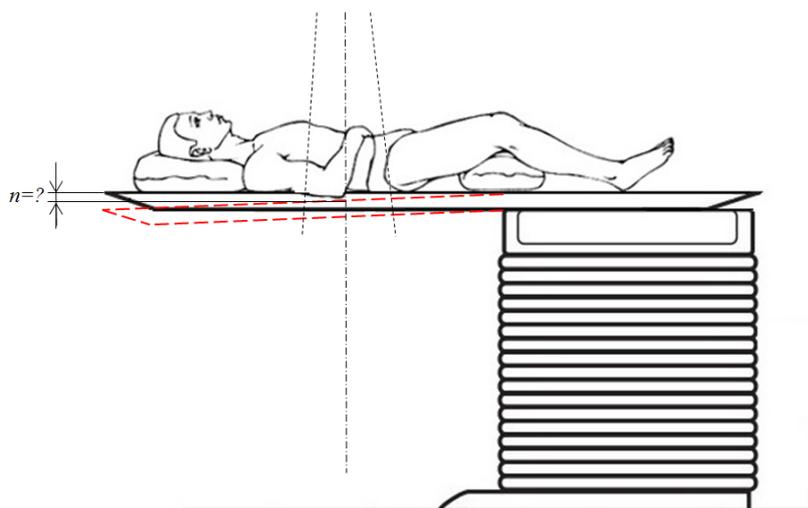


Рис. 3. Отклонение ТП РТС от горизонтального положения при облучении опухолей малого таза (n)
Fig. 3. Deviation of the radiation therapy tabletop from a horizontal position when irradiating pelvic tumors

Для проведения измерений отклонения ТП от горизонтального положения, авторами был разработан фантом, который представляет собой модель тела человека и состоит из пластиковых блоков прямоугольной формы массой 1 кг. Такая конструкция фантома предоставляет возможность изменять и распределять нагрузку на ТП РТС, что позволяет имитировать пациентов разного веса. Для проведения эксперимента авторами предложен фантом длиной 170 см (средний рост человека, проживающего в Республике Беларусь) [6] и массой от 40 до 180 кг (шаг изменения массы – 10 кг).

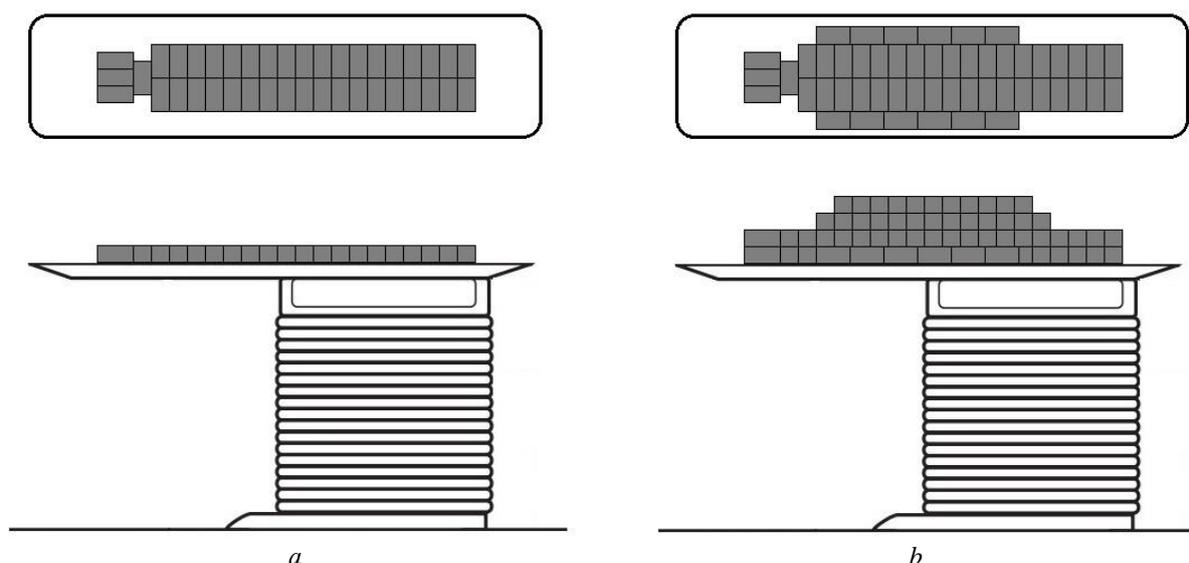


Рис. 4. Примеры распределения эталонных масс по ТП РТС:
 a – фантом массой 40 кг; b – фантом массой 140 кг

Fig. 4. Examples of the distribution of reference masses over the radiation therapy tabletop:
 a – phantom weighing 40 kg; b – phantom weighing 140 kg

Результаты и их обсуждение

На основании анализа более 300 клинических случаев пациентов, прошедших курс лучевой терапии в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова, авторами были установлены геометрические параметры всех осей перемещений РТС для фантома, симулирующего тело пациента и его типовое расположение для трех групп больных (опухоли головного мозга, опухоли грудной клетки и опухоли малого таза) при их облучении (табл. 1). С использованием полученных значений положения изоцентра мишени облучения проведены измерения отклонений в положении осуществления лучевой терапии пациента в изоцентре вращения и радиационного пучка ЛУЭ для двух РТС фирмы Varian «Exact IGRT» и «Exact couch». ТП РТС «Exact IGRT» сконструирована без использования опорных рельс, толщина ТП имеет значения от 5 до 7,5 см (изменяется по длине стола). ТП РТС «Exact couch» имеет постоянную толщину 2,2 см, усиление ТП реализовано с помощью опорных рельсов.

Таблица 1. Средние значения параметров РТС для опухолей головного мозга, грудной клетки и малого таза
Table 1. Average Radiation therapy table parameters for tumors of the brain, chest, and pelvis

Параметр Parameters	Опухоли головного мозга Brain tumor	Опухоли грудной клетки Tumors of the chest	Опухоли малого таза Pelvic Tumors
Поперечное перемещение, см Lateral movement, cm	12,1±1,2	22,80±3,2	12,20±1,3
Продольное перемещение, см Longitudinal movement, cm	107,4±7,8	130,7±4,6	144,06±5,2
Вертикальное перемещение, мм Vertical movement, mm	995,2±2,7	990,60±1,5	998,40±0,8

В результате измерений была установлена практически линейная зависимость величины отклонения ТП РТС для обеих исследуемых поверхностей от веса тела пациента. В ходе анализа полученных данных выявлено, что наибольшее отклонение от горизонтального положения ТП возникает при позиции стола, определенной для опухолей малого таза, и достигает 9 мм при максимальной измеренной нагрузке 180 кг на РТС «Exact couch» и 8,5 мм на РТС «Exact IGRT». Превышение допустимого отклонения 5 мм установлено при нагрузке свыше 100 кг для обеих РТС. В положении ТП для опухолей грудной клетки максимальное отклонение составляет 8,2 и 7,8 мм при нагрузке 180 кг на РТС «Exact couch» и «Exact IGRT» соответственно. Превышение допустимого отклонения 5 мм выявлено при нагрузке свыше 110 кг для «Exact couch» и 117 кг для РТС «Exact IGRT». Наименьшее влияние на горизонтальность ТП оказывает нагрузка в положении для опухолей головного мозга и составляет 5,5 и 6,2 мм при массе фантома 180 кг. Превышение допустимого отклонения 5 мм наблюдалось при нагрузке свыше 150 и 160 кг для РТС «Exact IGRT» и «Exact couch» соответственно. Результаты измерений приведены на рис. 5, 6.

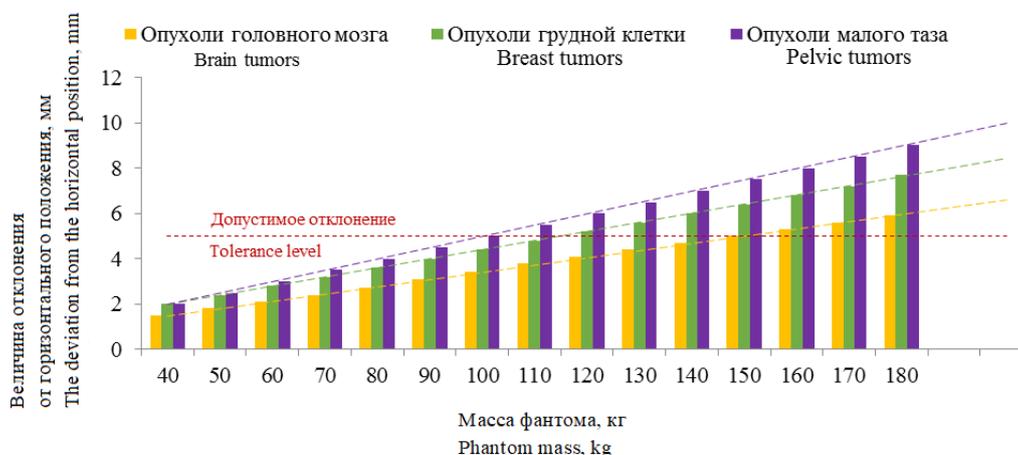


Рис. 5. Величина отклонения ТП РТС «Exact IGRT» от горизонтального положения в зависимости от нагрузки

Fig. 5. The deviation of the radiation therapy table “Exact couch” from the horizontal position depending on the load

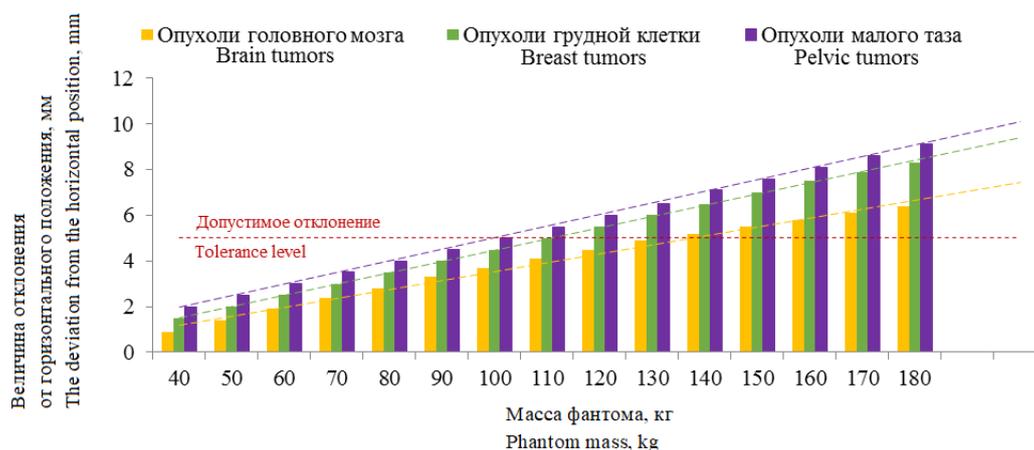


Рис. 6. Величина отклонения ТП РТС «Exact couch» от горизонтального положения в зависимости от нагрузки

Fig. 6. The deviation of the radiation therapy table “Exact IGRT” from the horizontal position depending on the load

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что при изменении продольного положения ТП РТС для пациентов, имеющих избыточный вес, имеют место отклонения ТП от горизонтального положения, значительно превышающие предельно допустимые уровни. В частности, данная величина составила 100 кг для обоих исследуемых РТС в положении типового лечения опухолей малого таза, 117 и 110 кг для РТС «Exact IGRT» и «Exact couch» соответственно в установленном положении для облучения опухолей грудной клетки и 150 и 160 кг для РТС «Exact IGRT» и «Exact couch» соответственно в положении для лучевой терапии опухолей головного мозга. Поскольку максимально допустимый вес пациента, согласно спецификации компании-производителя, составляет 200 и 220 кг соответственно и в связи с тем, что уже при массе пациента, которая значительно меньше данного значения, наблюдаются девиации горизонтального положения ТП более 5 мм для обоих исследуемых моделей терапевтических столов и всех трех рассматриваемых локализаций, что может повлиять на доставку предписанного трехмерного дозового распределения для целого ряда пациентов, авторы считают, что с целью коррекции возникающих ошибок в дозе и для недопущения некорректного облучения следует осуществлять учет отклонения ТП от горизонтального положения до начала лучевого лечения индивидуально в каждом клиническом случае. В связи с этим для проведения коррекции условий облучения пациента на этапе моделирования параметров его лечения и обеспечения требуемой протоколами ЛТ точности доставки индивидуальных дозовых распределений необходимо провести анализ зависимости отклонений в дозе, доставляемой пациентам, от величины отклонения ТП РТС от горизонтального положения для каждого используемого в клинической практике РТС, а также разработать и внедрить механизм, который позволит учитывать эту информацию при выборе параметров сеанса облучения и предписания дозы для любой локализации злокачественных новообразований. Для этого следует провести дополнительные исследования с целью выявления влияния систем предлучевой подготовки (компьютерных томографов, рентгеновских симуляторов) на ошибки в позиционировании пациентов.

Список литературы

1. Океанов А.И. Моисеева П.И., Левина Л.Ф., Евмененко А.А., Ипатий Т.Б. Суконко О.Г. *Рак в Беларуси: цифры и факты. Анализ данных Белорусского канцер-регистра за 2009–2018 гг.* Минск: Национальная библиотека Беларуси; 2019.
2. Климанов В.А. *Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Ч. 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения.* Москва: НИЯУ МИФИ; 2011.

3. Tepper J., Foote R., Michalski J. *Clinical radiation oncology*. 5th Ed. Elsevier; 2020.
4. Тарутин И.Г., Титович Е.В. *Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии*. Минск: Беларуская навука; 2015.
5. Practical issues in treating heavy patients on a LINAC treatment couch. *Journal of applied clinical medical physics*. 2005;6(1):45-56.
6. Шаруха И.Н. Белорусы в антропологическом и этническом пространстве. *Псковский региональный журнал*. 2008;1:142-152.

References

1. Oceanov A.I. Moiseeva P.I., Levina L.F., Evmenenko A.A., Ipatiy T.B., Sukonko O.G. [*Cancer in Belarus: figures and facts. Analysis of the data of the Belarusian Cancer Register for 2009–2018*]. Minsk: National Library of Belarus; 2019. (In Russ.)
2. Klimanov V.A. [*Radiobiological and dosimetric planning of radiation and radionuclide therapy. P. 1. Radiobiological basis of radiation therapy. Radiobiological and dosimetric planning of remote radiation therapy with braking and gamma radiation beams*]. Moscow: NRNU MEFPhI; 2011. (In Russ.)
3. Tepper J., Foote R., Michalski J. *Clinical radiation oncology*. 5th Ed. Elsevier; 2020.
4. Tarutin. I.G. [*The use of linear electron accelerators in high-tech radiation therapy*]. Minsk: Belaruskaya Navuka; 2015. (In Russ.)
5. Practical issues in treating heavy patients on a LINAC treatment couch. *Journal of applied clinical medical physics*. 2005;6(1):45-56.
6. Sharuho I.N. [Belarusians in the anthropological and ethnic space]. *Pskovskiy Regionalny Jurnal = Pskov Regional Journal*. 2008;1:142-152. (In Russ.)

Вклад авторов

Петкевич М.Н. разработал модели «среднего» тела пациента, позволяющего изменять нагрузку на терапевтическую поверхность радиотерапевтических столов, выполнил анализ экспериментальных данных.

Титович Е.В. определил замысел исследования, выполнил установление геометрических параметров всех осей перемещений радиотерапевтических столов для фантома, симулирующего тело пациента и его типовое расположение для трех групп больных (опухоль головного мозга, опухоль грудной клетки и опухоль малого таза) при их облучении.

Бельков Г.В. экспериментально установил численные величины отклонения терапевтической поверхности в изоцентре радиационного поля от предписанного горизонтального положения при нагрузке на нее от 40 до 180 кг для радиотерапевтических столов, используемых в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова.

Authors' contribution

Piatkevich M.N. developed the model of the patient's "average" body, which allows changing the load on the therapeutic surface of radiotherapy tables, analyzed the experimental data.

Titovich E.V. defined the concept of the research, established the geometric parameters of all axes of displacement of radiotherapy tables for the phantom simulation of a patient's body and its typical location for three groups of patients (brain tumors, chest tumors and pelvic tumors) during their irradiation.

Belkov G.V. experimentally established the numerical values of the therapeutic surface deviation in the radiation field isocenter from the prescribed horizontal position with a load on it from 40 to 180 kg for radiotherapy tables used in the N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus.

Сведения об авторах

Петкевич М.Н., аспирант МГЭИ им. А.Д. Сахарова
Белорусского государственного университета.

Титович Е.В., к.т.н., доцент, медицинский физик
УП «АДАНИ».

Бельков Г.В., студент МГЭИ им. А.Д. Сахарова
Белорусского государственного университета.

Адрес для корреспонденции

220070, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Долгобродская, 23/1,
МГЭИ им. А.Д. Сахарова Белорусского
государственного университета
тел. +375-29-577-09-75;
e-mail: MaxPetkevichN@gmail.com
Петкевич Максим Николаевич

Information about the authors

Petkevich M.N., PG Student of the A.D. Sakharov
ISEI of Belarusian State University.

Titovich E.V., PhD, Associate Professor, Medical
Physicist of the unitary enterprise "ADANI".

Belkov G.V., student of the A.D. Sakharov ISEI
of Belarusian State University.

Address for correspondence

220070, Republic of Belarus,
Minsk, Dolgobrodskaya str., 23/1,
A.D. Sakharov ISEI of Belarusian
State University
tel. +375-29-577-09-75;
e-mail: MaxPetkevichN@gmail.com
Piatkevich Maksim Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-40-46>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 612. 821.6

ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ ОТ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОЖДЕНИЯ ЧЕЛОВЕКУ

ДУБОВСКИЙ В.А., САВЧЕНКО В.В.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 12 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. На основе анализа тенденций в развитии автомобилестроения и известных методов автоматизации управления транспортными средствами предложен подход к организации передачи управления транспортным средством от автоматизированной системы вождения человеку. Подход предполагает мониторинг параметров функционирования транспортного средства и систем, обеспечивающих автоматизированное вождение, состояния окружающей среды и психофизиологического состояния водителя, а также условий дорожного движения на предстоящем пути, прогнозирование места и времени передачи управления водителю, определение и регулирование его готовности взять управление на себя при возникновении такой необходимости. Особенностью предложенного подхода является то, что при автоматизированном вождении постоянно поддерживается минимальный уровень готовности водителя к управлению транспортным средством, который в течение определенного интервала времени перед запланированным переходом к ручному управлению доводится до оптимального. Такой двухуровневый контроль состояния водителей высокоавтоматизированных транспортных средств позволит повысить безопасность дорожного движения как в случаях прогнозируемой, так и в случаях неожиданно возникающей необходимости экстренного перехода от автоматизированного к ручному вождению. Цель работы – развитие методологии повышения безопасности дорожного движения с участием высокоавтоматизированных транспортных средств.

Ключевые слова: автоматизированное вождение, безопасность дорожного движения, домен штатной эксплуатации, передача управления водителю, система «человек-машина».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дубовский В.А., Савченко В.В. Подход к организации передачи управления транспортным средством от автоматизированной системы вождения человеку. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 40-46.

AN APPROACH TO ORGANIZING THE TRANSITION OF VEHICLE CONTROL FROM AN AUTOMATED DRIVING SYSTEM TO A PERSON

VLADIMIR A. DUBOVSKY, VLADIMIR V. SAVCHENKO

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

Submitted 12 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The analysis of trends in the development of the automotive industry and well-known methods of automating vehicle control served the basis for us to propose an approach to organizing the transfer of vehicle control from an automated driving system to a person. The approach involves monitoring the vehicle performance and the systems that provide automated driving, the state of the environment and the driver's psychophysiological state, as well as road conditions on the upcoming path, predicting the place and time of transition of control to the driver, determining and regulating his/her readiness to take control if necessary. This approach is peculiar for in time of automated driving, the minimum level of the driver's readiness to operate the vehicle is constantly maintained, which is brought to optimal within a certain time before the scheduled transition to manual control. This two-level monitoring of the condition of drivers of highly automated vehicles will improve road safety both in cases of predicted and unexpected need for an emergency transition from automated to manual driving. The aim of the work is to develop a methodology for improving road safety with highly automated vehicles involved.

Keywords: automated driving, road safety, automated mode, transition of control, human-machine system.

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

For citation. Dubovsky V.A., Savchenko V.V. An approach to organizing the transition of vehicle control from an automated driving system to a person. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 40-46.

Введение

Наблюдающаяся в настоящее время тенденция к росту уровня автоматизации транспортных средств (ТС) имеет своей целью повышение как эффективности и безопасности транспортных систем, так и комфорта для водителей [1, 2]. Предполагается, что в обозримом будущем автомобили с системами беспилотного управления и соответствующая им интеллектуальная инфраструктура, обеспечивающая функционирование высокоавтоматизированных и автономных ТС в домене штатной эксплуатации, будут широко распространены [3, 4]. Известна классификация уровней автоматизации автомобилей, разработанная сообществом автомобильных инженеров (стандарт SAE J3016), в соответствии с которой выделены 6 уровней: от 0 (без автоматизации) до 5 (полная автоматизация, в автомобиле не предусмотрены органы управления траекторным движением). Такой ход вещей предполагает постепенные изменения в отношениях между водителем и ТС: деятельность водителей будет смещаться от выполнения задач, связанных с вождением, к выполнению задач по мониторингу параметров функционирования автоматизированной системы вождения [5, 6]. Это облегчает труд водителя, но не снимает проблему человеческого фактора, по крайней мере, в течение всего переходного периода к интеллектуальным транспортным системам прежде всего из-за необходимости по тем или иным причинам менять режим управления ТС между ручным и автоматизированным вождением в ту или иную сторону [5, 7]. Данная проблема обусловлена тем, что при автоматизированном вождении неучастие водителя в управлении ТС снижает его осведомленность о текущей дорожно-транспортной ситуации и уровень развития его профессиональных качеств и навыков, что в сложных дорожных обстоятельствах может негативно повлиять на безопасность дорожного

движения в случаях запланированной или неожиданно возникающей необходимости смены режима управления [7–9].

В настоящее время поиск решений обозначенной проблемы ведется в направлении разработки наиболее эффективных способов предупреждения водителя о необходимости передачи ему управления ТС и соответствующих интерфейсов, которые позволяли бы достаточно быстро и плавно приводить функциональное состояние водителя к нужному уровню [10–12]. Такой подход к решению проблемы смены режима управления ТС предполагает наличие определенного промежутка времени между предупреждением о передаче управления водителю и полным переходом к ручному вождению, в силу чего он представляется целесообразным лишь в случаях ожидаемой смены режима управления [13].

В случаях экстренной необходимости перехода к ручному вождению, когда водитель не готов взять управление ТС в свои руки и если при этом дорожно-транспортная ситуация в том или ином отношении сложна, рассмотренный подход к решению проблемы смены режима управления не может обеспечить в должной мере безопасность дорожного движения [14]. Для снижения риска дорожно-транспортных происшествий с участием высокоавтоматизированных ТС в случаях экстренной необходимости перехода от автоматизированного к ручному вождению представляется целесообразным постоянно поддерживать минимальный уровень готовности водителя к управлению ТС, а в случаях запланированного перехода к ручному управлению этот минимальный уровень готовности водителя к управлению ТС повышать до оптимального.

Цель работы – развитие методологии повышения безопасности дорожного движения с участием высокоавтоматизированных ТС на основе двухуровневого контроля состояния их водителей.

Подход к организации передачи управления ТС от автоматизированной системы вождения человеку

Предлагаемый подход к организации передачи управления ТС от автоматизированной системы вождения человеку рассматривается на основе разработанного авторами обобщенного алгоритма для его реализации, который приведен на рис. 1.

Обобщенный алгоритм для реализации предлагаемого подхода к организации передачи управления ТС от автоматизированной системы вождения человеку включает в себя следующие стадии.

1. Определение условий, при которых необходим переход от автоматизированного к ручному режиму управления ТС, например, в виде ограничений, накладываемых на использование автоматизированного режима трафиком движения, погодными условиями, качеством и надежностью информационных сигналов от бортовых систем ТС и средств спутниковой и других видов связи. Задание минимального PS_{\min} и оптимального PS_{opt} значений показателя PS психофизиологического состояния водителя, в качестве которого могут быть использованы, например, показатели электродермальной активности и частота сердечных сокращений [5, 15]. Задание интервала Δt времени для комфортной и безопасной передачи управления ТС водителю от системы автоматизированного вождения, под которым понимается промежуток времени между запросом на ручное вождение и началом активных действий водителя, связанных с управлением ТС. Интервал Δt времени необходим для того, чтобы водитель, не вовлеченный в управление ТС, до полного отключения системы автоматизированного вождения успел среагировать на запрос о ручном вождении и обратить внимание на дорожно-транспортную ситуацию (ДТС), занять нужную позу, положить руки на рулевое колесо и ноги на педали, сформировать верное представление о текущей ДТС и начать активные действия по управлению ТС, адекватные текущей ДТС [5, 11, 12].

Результаты исследований [11, 16] показали, что минимальное время передачи управления водителю при движении в высокоавтоматизированном ТС составляет 2–4 с. Задаваемый интервал Δt времени должен превышать указанное минимальное значение времени передачи управления для того, чтобы водитель мог комфортно принять управление ТС и избежать потенциально опасных ситуаций в сложных дорожных условиях.

2. Во время управления ТС в автоматизированном режиме осуществляется мониторинг условий передачи управления водителю на предстоящем пути, психофизиологического состояния водителя и параметров/признаков текущей ДТС. Полученная информация с помощью бортового компьютера и/или платформы облачных вычислений анализируется с целью принятия решения о необходимости по тем или иным причинам в определенном месте предстоящего пути перейти от автоматизированного к ручному режиму управления ТС, после чего водитель информируется об этом. Прогноз остающегося до передачи управления водителю времени T осуществляется в реальном времени на основе известного расстояния до места смены режима вождения и запланированной средней скорости ТС. Прогноз остающегося времени T до передачи управления водителю непрерывно уточняется по мере приближения к месту смены режима вождения. При этом в реальном времени осуществляется генерация текстового описания ДТС и поддерживается минимальный уровень осведомленности (информированности) водителя о ДТС путем воспроизведения в звуковой форме основных компонентов ее текстового описания. Также поддерживается значение PS_{\min} водителя путем предупреждения его о приближении психофизиологического состояния к заданному минимальному уровню.

3. В случае, если время T , оставшееся до перехода к ручному вождению, превышает предварительно заданный интервал времени Δt (соблюдается условие $T - \Delta t > 0$), а уровень PS психофизиологического состояния водителя не опускается ниже заданного минимального уровня PS_{\min} и нет запроса на экстренную передачу управления водителю, режим автоматизированного вождения продолжается. Если при этом возникает необходимость экстренной передачи управления водителю, последнему дают запрос на ручное вождение, и при получении от него подтверждения о восприятии запроса передают ему управление ТС. В противном случае, а также в случае, если уровень PS психофизиологического состояния водителя оказывается ниже заданного минимального уровня PS_{\min} , система автоматизированного вождения в установленном порядке останавливает ТС.

4. В случае, если время T , остающееся до перехода к ручному вождению, становится равным предварительно заданному интервалу времени Δt , водителю дают запрос на ручное вождение и повышают уровень его осведомленности о ДТС путем воспроизведения в звуковой форме полного ее текстового описания. После получения от водителя подтверждения о восприятии запроса при условии, что уровень PS его психофизиологического состояния не ниже заданного оптимального уровня PS_{opt} и время T до перехода к ручному вождению не истекло, передают управление ТС водителю. Если же уровень PS психофизиологического состояния водителя оказывается ниже заданного оптимального уровня PS_{opt} и время T до перехода к ручному вождению не истекло, повышают психофизиологическое состояние водителя до заданного оптимального уровня PS_{opt} путем стимуляции его органов чувств стимулами различной модальности (зрительными, звуковыми, тактильными), после чего передают ему управление ТС. В случае, если уровень PS психофизиологического состояния водителя при этом не поднимается до заданного оптимального уровня PS_{opt} и время T до перехода к ручному вождению истекло, а также в случае отсутствия подтверждения от водителя о восприятии им запроса на ручное вождение, система автоматизированного вождения в установленном порядке останавливает ТС.

Реализация предлагаемого подхода к организации перехода от автоматизированного к ручному режиму вождения предполагает наличие на ТС системы автоматизированного вождения, систем мониторинга параметров функционирования ТС, психофизиологического состояния водителя, состояния окружающей среды и условий дорожного движения на предстоящем пути, системы поддержания работоспособности (должного уровня психофизиологического состояния и осведомленности о ДТС) водителя, средств отображения информации и коммуникационной платформы для связи с платформой облачных вычислений, инфраструктурой и другими участниками дорожного движения.

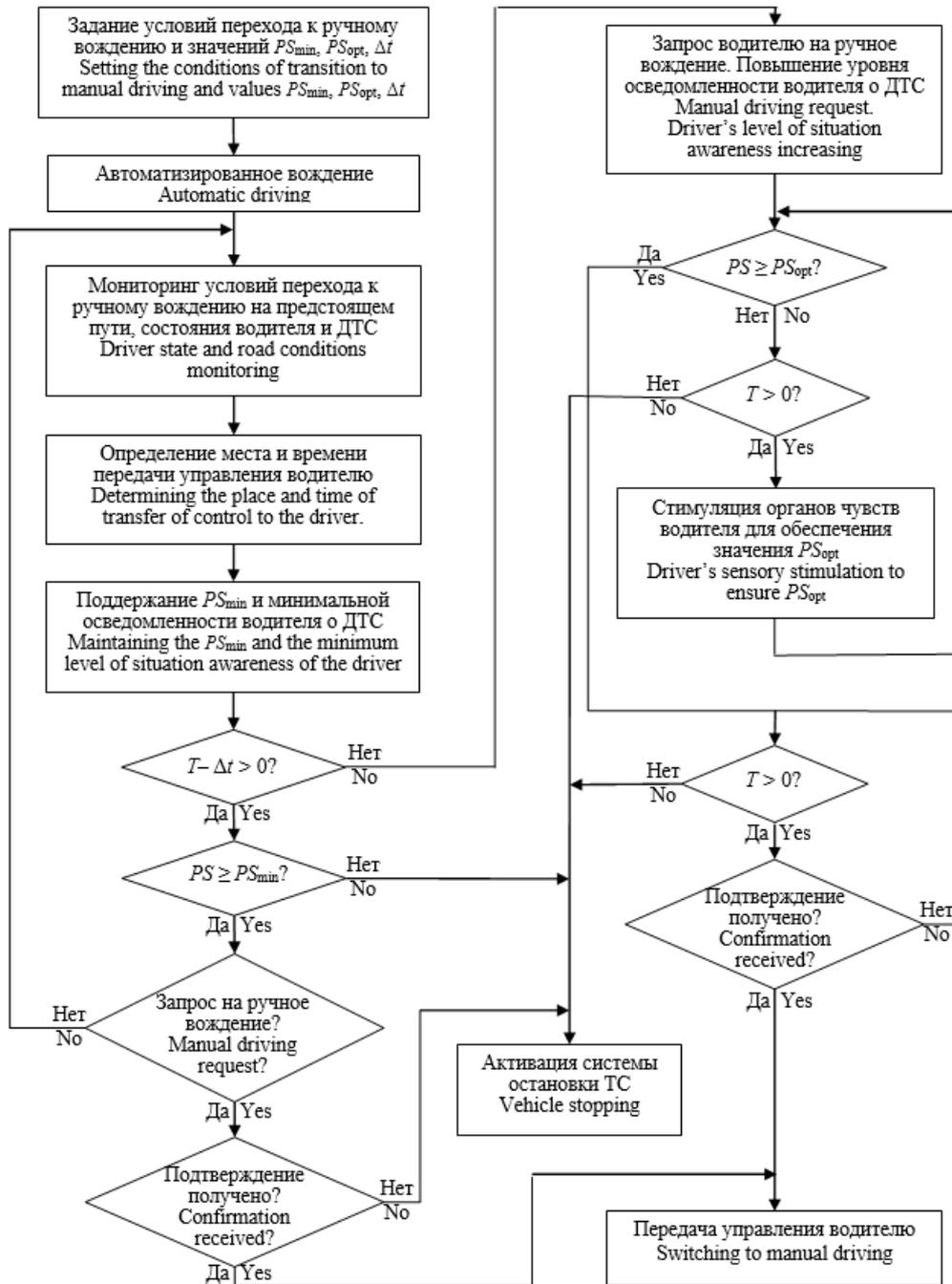


Рис. 1. Обобщенный алгоритм передачи управления ТС от автоматизированной системы вождения человеку

Fig. 1. A generalized algorithm for transiting vehicle control from an automated driving system to a person

Заключение

Предложенный подход к организации передачи управления ТС от системы автоматизированного вождения человеку основан на мониторинге параметров функционирования ТС и систем, обеспечивающих автоматизированное вождение, состояния окружающей среды и психофизиологического состояния водителя, а также условий дорожного движения на предстоящем пути, определении места передачи управления водителю, прогнозировании времени, остающегося до передачи управления, и регулировании работоспособности (должного уровня психофизиологического состояния и осведомленности

о ДТС) водителя для обеспечения его готовности принять управление ТС на себя при возникновении такой необходимости. Особенностью предложенного подхода является то, что во время автоматизированного вождения постоянно поддерживается минимальный уровень готовности (минимальный уровень психофизиологического состояния и осведомленности о ДТС) водителя к управлению ТС, а перед запланированным переходом к ручному управлению уровень готовности водителя к управлению ТС доводится до оптимального. Такой двухуровневый контроль готовности водителя высокоавтоматизированного ТС принять управление ТС на себя позволит повысить безопасность дорожного движения как в случаях прогнозируемой, так и в случаях неожиданно возникающей необходимости экстренной смены режима управления ТС.

Список литературы / References

1. Papadimitratos P., Fortelle A., Evenssen K., Brignolo R., Cosenza S. Vehicular Communication Systems: Enabling Technologies, Applications, and Future Outlook on Intelligent Transportation. *IEEE Communications Magazine*. 2009;47(11):84-95.
2. Burnett G.E. On-the-Move and in Your Car: An Overview of HCI Issues for In-Car Computing. *International Journal of Mobile Human Computer Interaction*. 2009;1(1):60-78.
3. Tanelli M., Toledo-Moreo R., Stanley L.M. Guest Editorial: Multifaceted Driver-Vehicle Systems: Toward More Effective Driving Simulations, Reliable Driver Modeling, and Increased Trust and Safety. *IEEE Transactions on human-machine systems*. 2018;48(1):1-5. DOI: 0.1109/THMS.2017.2784018.
4. Hancock P.A., Nourbakhsh I., Stewart J. On the future of transportation in an era of automated and autonomous vehicles. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2019;116(16):7684-7691.
5. Collet C. and Musicant O. Associating Vehicles Automation with Drivers Functional State Assessment Systems: A Challenge for Road Safety in the Future. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2019;13:131. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00131.
6. Russell H.E.B., Harbott L.K., Nisky I., Pan S., Okamura A.M., Gerdes J.C. Motor learning affects car-to-driver handover in automated vehicles. *Science Robotics*. 2016;1(1):1-9.
7. Lu Z., Happee R., Cabral C.D.D., Kyriakidis M., Winter J.C.F. Human Factors of Transitions in Automated Driving: A General Framework and Literature Survey. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2016;43(11):183-198.
8. Merat N., Jamson A.H., Lai F.C.H., Daly M., Carsten O.M.J. Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle. *Transportation Research Part F*. 2014;27:274-282.
9. Дубовский В.А., Савченко В.В. Концептуальная модель системы «водитель-автомобиль-дорога-среда». Доклады НАН Беларуси. 2019;63(1):112-120. Dubovsky V.A., Savchenko V.V. [A conceptual model of the “driver-car-road-environment” system]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2019;63(1):112-120. (in Russ.)
10. Saito T., Wada T., Sonoda K. Control Authority Transfer Method for Automated-to-Manual Driving Via a Shared Authority Mode. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2018;3(2):198-207. DOI: 10.1109/TIV.2018.2804167.
11. Gold C., Damböck D., Lorenz L., Bengler K. Take over! How long does it take to get the driver back into the loop? *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2013;57(1):1938-1942. DOI: 10.1177/1541931213571433.
12. Gold C., Körber M., Lechner D., Bengler K. Taking Over Control from Highly Automated Vehicles in Complex Traffic Situations: The Role of Traffic Density. *Human Factors*. 2016;58(4):642-652. DOI: 10.1177/0018720816634226.
13. Savchenko V.V., Poddubko S.N. Development approach to a method for monitoring of driver’s ability of resumption of control over the vehicle by on-board systems in automatic mode. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018;121(2):181-187.
14. Савченко В.В. Проблема передачи управления водителю в высокоавтоматизированных транспортных средствах: метод мониторинга восприятия семантически бинарной релевантной информации водителем. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2019;47(2):14-19. Savchenko V.V. [The problem of transferring control to the driver in highly automated cars: a method for monitoring the perception of semantically binary relevant information by the driver]. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2019;47(2):14-19. (in Russ.)
15. Дементенко В.В., Иванов И.И., Макаев Д.В. Комплексная система мониторинга состояния водителя в рейсе. *Вестник НЦ БЖД*. 2016;29(3):17-21. Dementienko V.V., Ivanov I.I., Makaev D.V. [Comprehensive system of monitoring the state of the driver on the trip]. *Vestnik NTsBZhD*. 2016;29(3):17-21. (in Russ.)

16. Жанказиев С.В., Воробьев А. И., Забудский А. Ю. Определение минимального времени передачи управления при движении в высокоавтоматизированном автомобиле. *Транспорт РФ*. 2019;4(83):33-36. Zhankaziev S.V., Vorobiev A.I., Zabudsky A.Y. [Determination of the minimum control transmission time when driving in a highly automated vehicle]. *Transport of Russia*. 2019;4(83):33-36. (in Russ.)

Вклад авторов

Дубовский В.А. разработал обобщенный алгоритм передачи управления транспортным средством от автоматизированной системы вождения человеку.

Савченко В.В. сформулировал постановку задачи и выполнил анализ полученных результатов.

Authors' contribution

Dubovsky V.A. has developed a generalized algorithm for transiting vehicle control from an automated driving system to a person.

Savchenko V.V. has formulated the problem statement and made an analysis of the obtained results.

Сведения об авторах

Дубовский В.А., к.т.н., старший научный сотрудник Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси.

Савченко В.В., к.т.н., доцент, начальник научно-инжинирингового центра «Бортовых систем управления мобильных машин» Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси.

Information about the authors

Dubovsky V.A., PhD, Senior Researcher of The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus.

Savchenko V.V., PhD, Associate Professor, Chief of R&D Center "Onboard control systems of mobile machines" of The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Академическая, 12,
Объединенный институт машиностроения
Национальной академии наук Беларуси
тел. +375-17-370-07-49;
Дубовский Владимир Андреевич

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, P. Akademicheskaya str., 12,
The Joint Institute of Mechanical Engineering
of the National Academy of Sciences of Belarus
tel. +375-17-370-07-49;
Dubovsky Vladimir Andreevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-47-54>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.6

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

ЩЕРБАКОВ С.С.^{1,2}, ШЕМЕТ Л.А.², НАСАНЬ О.А.²

¹ Государственный комитет по науке и технологиям (г. Минск, Республика Беларусь)

² Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 9 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Объект исследования – массив горных пород с различными формами поперечного сечения выработки. Целью работы является компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния и объемной повреждаемости в окрестности горной выработки. Ненарушенный горный массив еще до образования выработки обладает начальным напряженно-деформированным состоянием (под собственным весом). Поэтому для определения напряженно-деформированного состояния массива с выработкой следует сначала рассчитать напряженное состояние массива без выработки, а затем учесть его как преднапряженное состояние для массива с выработкой. Оценка степени повреждаемости массива с выработкой проводилась на основе полученных распределений напряжений и деформаций. Расчет объемной повреждаемости производился с помощью модели деформированного твердого тела с опасным объемом. Опасный объем есть ограниченная область, где напряжения или деформации превышают установленный порог. Расчет опасных объемов и объемной повреждаемости проводился в конечно-элементном пакете ANSYS. Для этого была написана программа на языке APDL. Для каждого конечного элемента было рассчитано отношение действующих и предельных деформаций. Элементы, для которых данное отношение превышает единицу, и будут образовывать опасный объем для всей рассматриваемой модели. В итоге имеем список элементов, входящих в состав опасного объема, а также его величину. Разработанный метод оценки повреждаемости в окрестности подземной выработки учитывает различные формы сечения выработки и глубины ее залегания. Обоснована актуальность проведения исследования зон возможных разрушений с применением модели деформированного твердого тела с опасным объемом.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформируемое состояние, модель деформированного твердого тела с опасным объемом, объемная повреждаемость, горная выработка.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Щербаков С.С., Шемет Л.А., Насань О.А. Компьютерное моделирование объемной повреждаемости в окрестности горной выработки. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 47-54.

COMPUTER MODELING OF VOLUMETRIC DAMAGEABILITY IN THE MINE ROADWAY NEIGHBOURHOOD

SERGEI S. SHERBAKOV^{1,2}, LIUDMILA A. SHEMET², ALEH A. NASAN²

¹ State Committee on Science and Technology (Minsk, Republic of Belarus)

² Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 9 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The object of research is a rock massif with various cross-sectional shapes of roadway. The purpose of work: computer modeling of stress-strain state and volumetric damageability in the neighbourhood of a mine roadway. The undisturbed rock massif has an initial stress-strain state (under its own weight) before a mine roadway is formed. Therefore, to determine the stress-strain state of the rock massif with the mine roadway, we must first calculate the stress state of the rock massif without the roadway and then take it into account as a pre-stressed state for the rock massif therewith. Damageability assessment of the rock massif with a mine roadway was carried out based on the obtained distributions of stresses and strains. We calculated volumetric damageability through the model of a deformed solid body with dangerous volume. Dangerous volume is a limited area where stresses or strains exceed the predetermined threshold. Calculation of dangerous volumes and integral damageability was carried out in the finite element package ANSYS. The program was written in APDL. The ratios between the existing and limiting stresses was calculated for each finite element. The elements for which this ratio exceeds unity will form a dangerous volume for the whole model. As a result, we have an array of finite elements constituting the dangerous volume and its value. The developed method for assessing damageability in the mine roadway neighbourhood takes into account various cross-sectional shapes of the mine roadway and its depth. The relevance of studying possible destruction regions using the model of a deformed solid body with dangerous volume was substantiated.

Keywords: computer modeling, finite element method, stress-strain state, model of a deformed solid body with dangerous volume, volumetric damageability, mine roadway.

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

For citation. Sherbakov S.S., Shemet L.A., Nasan A.A. Computer modeling of volumetric damageability in the mine roadway neighbourhood. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 47-54.

Введение

Большое количество научных исследований посвящено определению и анализу с помощью компьютерного конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) различных систем и объектов. В данной работе в качестве объекта рассматривается массив горных пород. Процессы разрушения горных массивов при ведении подземных работ имеют сложный характер. Возникает большая вероятность образования особых участков в кровле, почве и боках выработок. На этих участках могут одновременно по разным направлениям действовать сжимающие и растягивающие напряжения. Таким образом, можно выделить предполагаемые зоны разрушения в элементах выработки. [1–5].

Существует множество критериев для определения данных зон, однако задача об их интегральной оценке остается до конца нерешенной. Авторами предлагается один из вариантов решения данной проблемы с использованием модели деформированного твердого тела с опасным объемом [1, 2].

Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния объекта исследования

В качестве объекта исследования рассматривался массив горных пород с выработкой. Были разработаны три модели с разной геометрией поперечного сечения выработки (арочная, прямоугольная и круглая), но с одинаковой площадью $S_{pr} = 32,13 \text{ м}^2$, как показано на рис. 1. Геометрические характеристики и свойства материала были приняты следующими: $H = 100\text{--}600 \text{ м}$, $R = 3 \text{ м}$, $R_c = 3,2 \text{ м}$, $a = 6 \text{ м}$, $b = 5,355 \text{ м}$, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$, $E = 1,75 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\nu = 0,28$, $\sigma_{сж}^{\text{lim}} = -25,2 \text{ МПа}$, $\sigma_p^{\text{lim}} = 1,8 \text{ МПа}$.

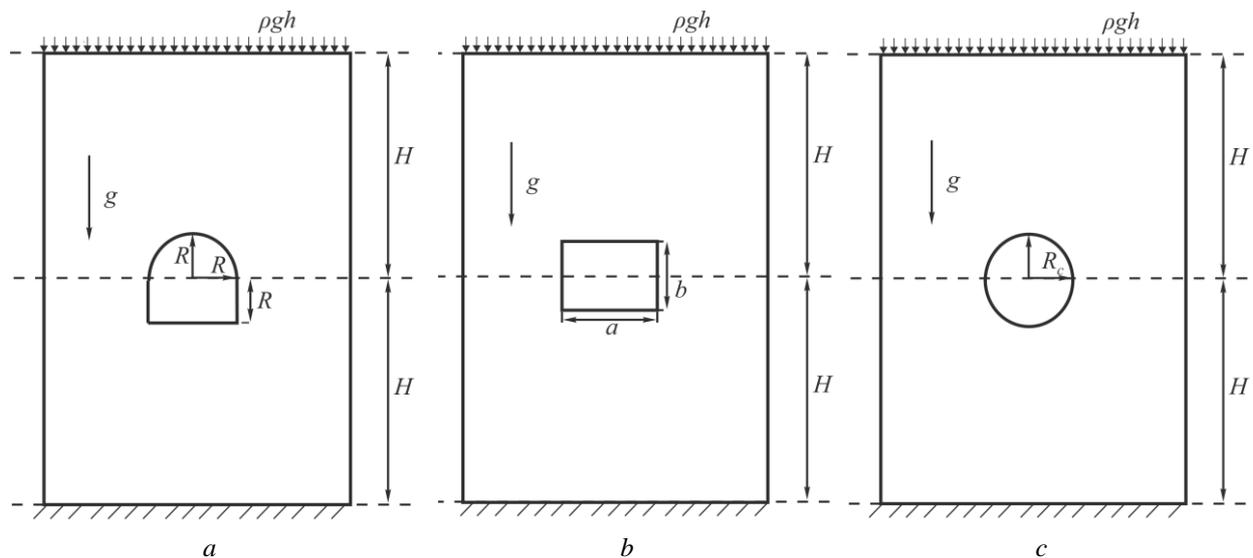


Рис. 1. Расчетные модели объекта исследования с учетом формы поперечного сечения выработки:
a – арка; *b* – прямоугольник; *c* – круг

Fig. 1. Design models of the research object, taking into account the shape of the cross-section of the mining work: *a* – arch; *b* – rectangle; *c* – circle

Ненарушенный горный массив еще до образования выработки обладает начальным НДС (под собственным весом). Поэтому для определения НДС массива с выработкой следует сначала рассчитать НДС массива без выработки (рис. 2), а затем учесть его как преднапряженное состояние для массива с выработкой [1, 2].

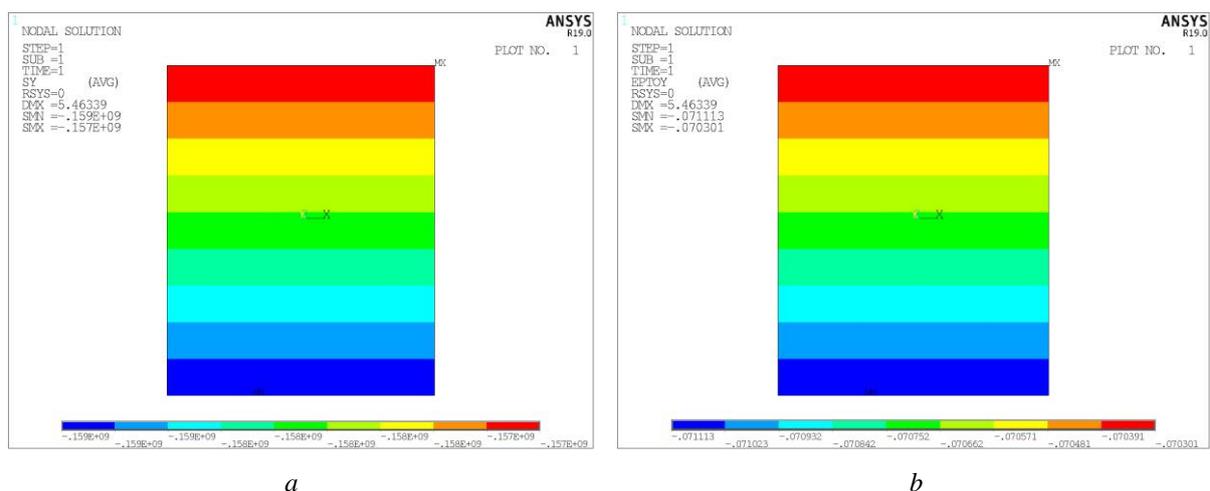


Рис. 2. Распределение напряжений и деформаций в массиве без выработки: *a* – σ_y ; *b* – ϵ_y
Fig. 2. Distribution of stresses and strains in a rock massif without mine roadway: *a* – σ_y ; *b* – ϵ_y

Расчеты полей напряжений и деформаций проводились для различных глубин залегания выработки. В частности, на рис. 3 представлены результаты для глубины $H = 500 \text{ м}$.

Из рисунка видно, что значения деформаций вблизи контура выработки намного больше, чем в самом массиве на достаточном удалении от выработки.

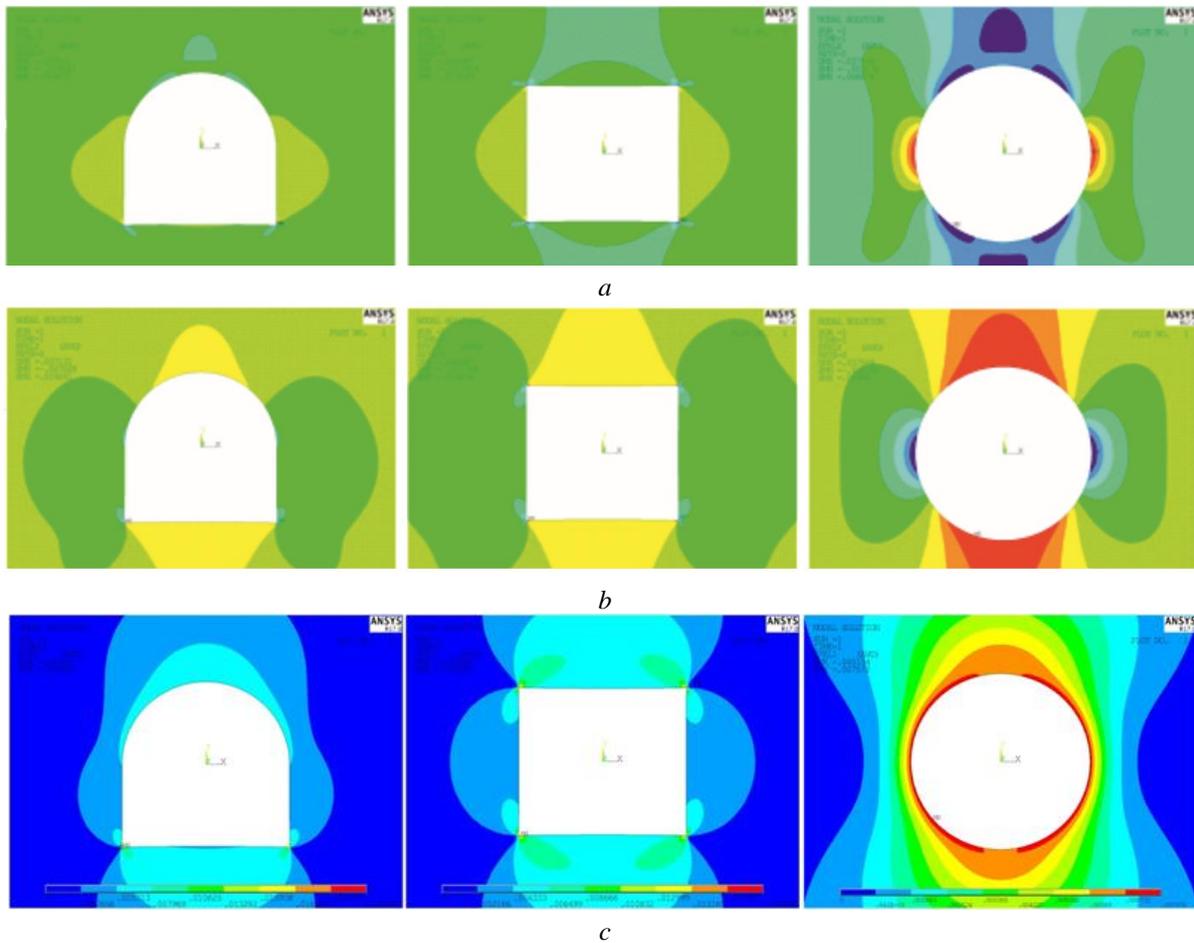


Рис. 3. Распределение деформаций: $a - \varepsilon_x$; $b - \varepsilon_y$; $c - \varepsilon_{int}$
Fig. 3. Distribution of strains: $a - \varepsilon_x$; $b - \varepsilon_y$; $c - \varepsilon_{int}$

После того, как получены распределения напряжений и деформаций в массиве с выработкой, можно приступить к оценке степени повреждаемости массива. Расчет объемной повреждаемости производился с помощью модели деформированного твердого тела с опасным объемом. Опасный объем есть ограниченная область, где напряжения или деформации превышают установленный порог. Кроме опасного объема, в качестве интегрального показателя состояния выработки может также использоваться повреждаемость опасного объема [1, 6–10].

Расчет объемной повреждаемости

Определение опасных объемов V_i как множеств элементарных объемов тела, в которых действующие напряжения не меньше предельных, а также формулы расчета их величин и повреждаемости Ψ_i для эквивалентных напряжений в общем случае имеют вид [1, 6, 8]:

$$\begin{aligned}
 V_q &= dV / \psi_q \geq 1, dV \subset V_k, \\
 V_q &= \int_{\psi_q \geq 1} dV, \quad q = x, y, z, 1, 2, 3, \text{int}, \\
 \Psi_q &= \int_{\psi_q \geq 1} \psi_q dV,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\Psi_q^i = \varepsilon_q^i / \varepsilon_q^{\text{lim}}$, $q = x, y, z, 1, 2, 3, \text{int}$;

dV – элементарный объем нагруженного тела;

V_k – рабочий объем нагруженного тела.

Расчет опасного объема и его повреждаемости проводился в конечно-элементном пакете ANSYS. Для этого была написана программа на языке APDL [1, 2]. Для каждого конечного элемента было рассчитано отношение действующих и предельных деформаций:

$$\Psi_q^i = \varepsilon_q^i / \varepsilon_q^{\text{lim}}, q = x, y, \text{int}. \quad (2)$$

Элементы, для которых данное отношение превышает единицу, и будут образовывать опасный объем для всей рассматриваемой модели. В итоге имеем список элементов, входящих в состав опасного объема, а также его величину.

Для каждой рассматриваемой глубины залегания выработки были рассчитаны опасные площади (опасный объем V в двумерной постановке становится опасной площадью S). Результаты расчетов при $H = 500$ м представлены на рис. 4. Видно, что при оценке деформаций ε_x основная часть площади локализуется в районе боков выработки, при оценке деформаций ε_y – только над кровлей и в почве, а по ε_{int} – вокруг всего контура выработки.

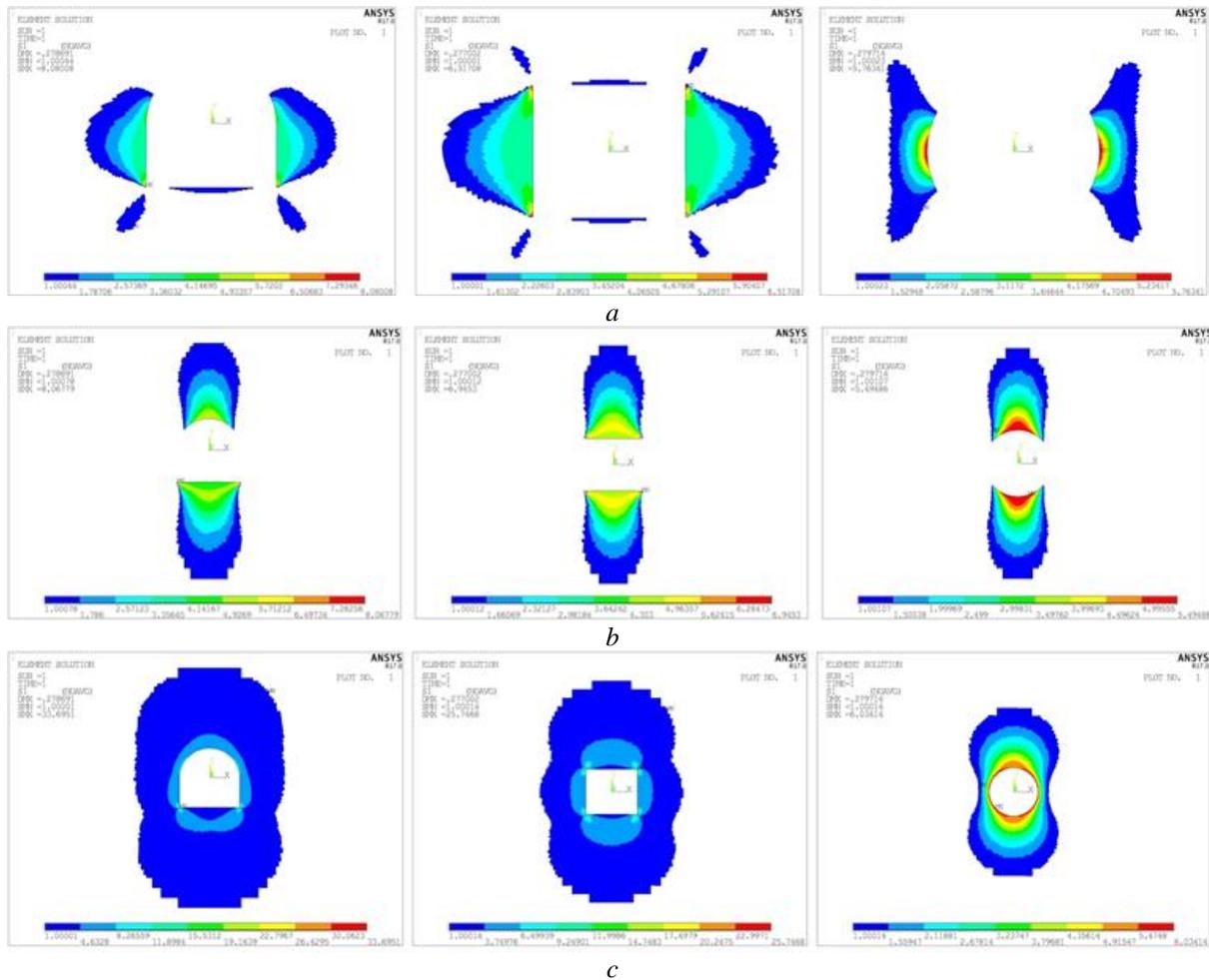


Рис. 4. Опасные площади для: $a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\text{lim}}$; $b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\text{lim}}$; $c - \Psi_{\text{int}} = \varepsilon_{\text{int}} / \varepsilon_{\text{int}}^{\text{lim}}$

Fig. 4. Dangerous areas for: $a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\text{lim}}$; $b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\text{lim}}$; $c - \Psi_{\text{int}} = \varepsilon_{\text{int}} / \varepsilon_{\text{int}}^{\text{lim}}$

На рис. 5, 6 представлены зависимости опасной площади и объемной повреждаемости от глубины залегания выработки. Видно, что с ростом глубины залегания выработки опасная площадь и повреждаемость увеличиваются, величина опасной площади для прямоугольной формы значительно больше, чем величина опасной площади для арочной и круглой форм. Кривые имеют схожую форму, и на всех рассматриваемых глубинах наибольшее значение

повреждаемость Ψ имеет для выработки прямоугольной формы, а наименьшее – для круглой. Анализ опасных площадей по деформациям ε_{int} показал, что в среднем величина опасной площади круглой выработки меньше арочной и прямоугольной на 9 и 17 % соответственно.

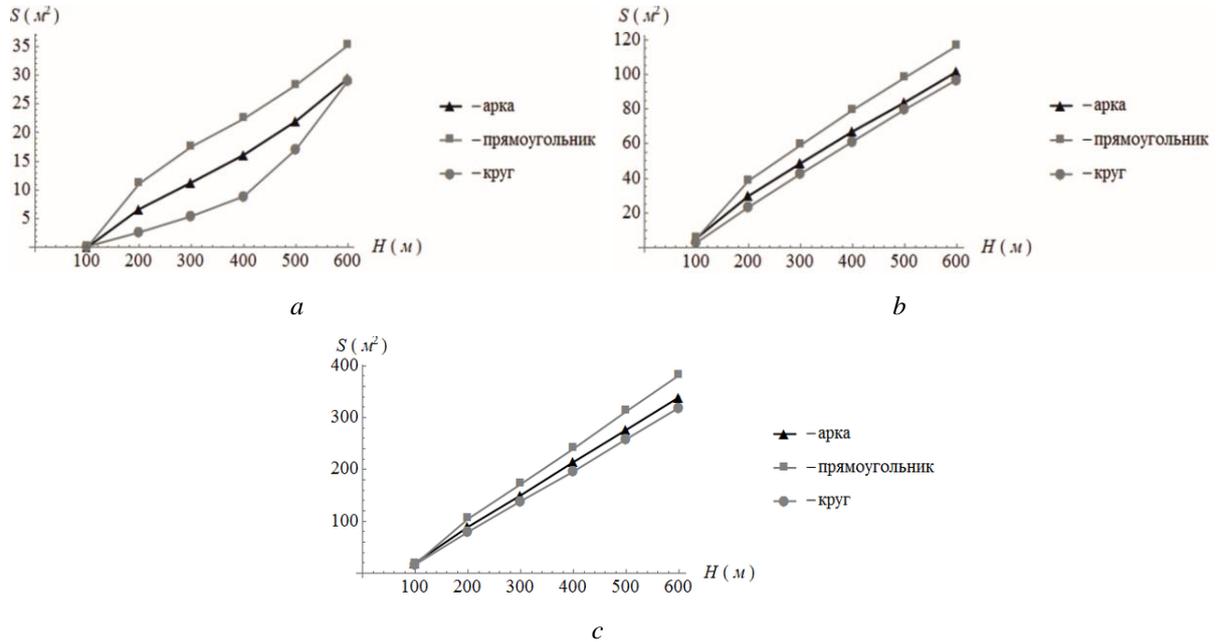


Рис. 5. Зависимость опасной площади от глубины залегания выработки для:

$$a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\lim}; b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\lim}; c - \Psi_{int} = \varepsilon_{int} / \varepsilon_{int}^{\lim}$$

Fig. 5. The dependence of dangerous area on the depth of mine roadway work for:

$$a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\lim}; b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\lim}; c - \Psi_{int} = \varepsilon_{int} / \varepsilon_{int}^{\lim}$$

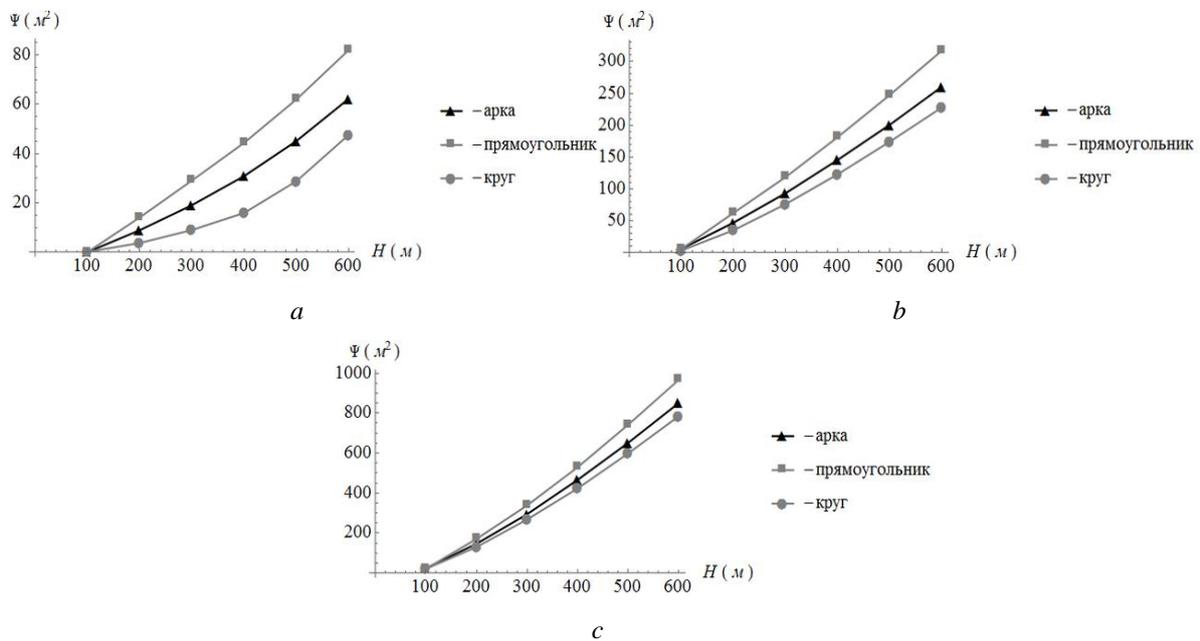


Рис. 6. Зависимость объемной повреждаемости от глубины залегания выработки для:

$$a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\lim}; b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\lim}; c - \Psi_{int} = \varepsilon_{int} / \varepsilon_{int}^{\lim}$$

Fig. 6. The dependence of integral damageability from the depth of mining work for:

$$a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\lim}; b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\lim}; c - \Psi_{int} = \varepsilon_{int} / \varepsilon_{int}^{\lim}$$

Заключение

В работе были представлены результаты компьютерного моделирования НДС и объемной повреждаемости в окрестности горной выработки с различной формой поперечного сечения (арочная, прямоугольная, круглая). Оценка объемной повреждаемости проводилась с помощью модели деформированного твердого тела с опасным объемом. Разработанный метод оценки повреждаемости в окрестности подземной выработки учитывает различные формы сечения выработки и глубины ее залегания. Было показано, что для глубин от 100 до 600 м повреждаемость для круглой выработки в среднем меньше повреждаемости для прямоугольной и арочной на 9 и 17 % соответственно при оценке опасных объемов по интенсивности деформаций.

Список литературы

1. Журавков М.А., Щербаков С.С., Шемет Л.А. Объемная повреждаемость окрестности горной выработки. *Актуальные вопросы машиноведения*. 2016;5:184-186.
2. Журавков М.А., Щербаков С.С., Шемет Л.А. Опасные объемы в окрестности выработки в горном массиве. *Вестник БелГУТа: наука и транспорт*. 2016;1(32):83-90.
3. Оловянный А.Г. *Механика горных пород. Моделирование разрушений*. С.-Петербург: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА»; 2012.
4. Журавков М.А., Коновалов О.Л., Богдан С.И., Прохоров П.А., Круподеров А.В. *Компьютерное моделирование в геомеханике*. Минск: БГУ; 2008.
5. Журавков М.А. *Фундаментальные решения теории упругости и некоторые их применения в геомеханике, механике грунтов и оснований*. Минск: БГУ; 2008.
6. Щербаков С.С., Сосновский Л.А. *Механика трибофатических систем*. Минск: БГУ; 2011.
7. Журавков М.А., Щербаков С.С., Мармыш Д.Е., Шемет Л.А., Насань О.А. Опасные объемы как мера повреждаемости системы на макро- и микроуровне. *Актуальные вопросы машиноведения*. 2015;4:237-240.
8. Сосновский Л.А. *Механика износоусталостного повреждения*. Гомель: БелГУТ; 2007.
9. Сосновский Л.А., Щербаков С.С. *Сюрпризы трибофатики*. Гомель: БелГУТ; 2005.
10. Bahdanovich A., Bendikiene R., Cesnavicius R., Ciuplys A., Grigas V., Jutas A., Marmysh D., Mazaleuski A., Nasan A., Shemet L., Sherbakov S., Spakauskas K., Sosnovskiy L. Research on Tensile Behaviour of New Structural Material MoNiCa. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2019;25(3):292-296. DOI: 10.5755/j01.ms.25.3.23079.

References

1. Zhuravkov M.A., Shcherbakov S.S., Shemet L.A. [Volumetric damageability in the mining work neighbourhood]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniia = Actual issues of engineering*. 2016;5:184-186. (In Russ.)
2. Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S., Shemet L.A. [Dangerous volumes in the neighborhood of the mining work in rock massif]. *Vestnik BelGUTA: Nauka i transport = Vestnik BelGUTA: science and transport*. 2016;1(32):83-90. (In Russ.)
3. Oloviannyi A.G. [Rock mechanics. Destruction modeling]. St.-Peterburg: ООО "Izdatel'sko-poligraficheskaiа kompaniia "KOSTA"; 2012. (In Russ.)
4. Zhuravkov M.A., Konovalov O.L., Bogdan S.I., Prokhorov P.A., Krupoderov A.V. [Computer modeling in geomechanics]. Minsk: BGU; 2008. (In Russ.)
5. Zhuravkov M.A. [Fundamental solutions of the theory of elasticity and some of their applications in geomechanics, soil and foundation mechanics]. Minsk: BGU; 2008. (In Russ.)
6. Shcherbakov S.S., Sosnovskii L.A. [Mechanics tribo-fatigue systems]. Minsk: BGU; 2011. (In Russ.)
7. Zhuravkov M.A., Shcherbakov S.S., Marmysh D.E., Shemet L.A., Nasan A.A. [Dangerous volumes as the measure of system damageability on macro and microlevel]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniia = Actual issues of engineering*. 2015;4:237-240. (In Russ.)
8. Sosnovskii L.A. [Fatigue Damage Mechanics]. Gomel: BelGUT; 2007. (In Russ.)
9. Sosnovskii L.A., Shcherbakov S.S. [Surprises of Tribo-Fatigue]. Gomel: BelGUT; 2005. (In Russ.)
10. Bahdanovich A., Bendikiene R., Cesnavicius R., Ciuplys A., Grigas V., Jutas A., Marmysh D., Mazaleuski A., Nasan A., Shemet L., Sherbakov S., Spakauskas K., Sosnovskiy L. Research on Tensile Behaviour of New Structural Material MoNiCa. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2019;25(3):292-296. DOI: 10.5755/j01.ms.25.3.23079.

Вклад авторов

Щербаков С.С. разработал методику подсчета опасного объема и объемной повреждаемости в окрестности горной выработки.

Шемет Л.А. создала компьютерную программу для расчетов опасных объемов в окрестности горной выработки.

Насань О.А. разработал компьютерную модель и выполнил расчет напряженно-деформированного состояния горного массива с выработкой.

Authors' contribution

Sherbakov S.S. developed a methodology for calculating dangerous volume and volumetric damageability in the neighbourhood of a mine roadway.

Shemet L.A. created a computer program for calculating dangerous volumes in the neighbourhood of a mine roadway.

Nasan A.A. developed a computer model and performed the calculation of the stress-strain state of the rock massif with a mine roadway.

Сведения об авторах

Щербаков С.С., д.ф.-м.н., профессор, заместитель Председателя Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь, профессор кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета (совместительство).

Шемет Л.А., старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета.

Насань О.А., старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета.

Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, 4,
Белорусский государственный университет
тел. +375-33-313-04-94;
e-mail: shemetla@yandex.ru
Шемет Людмила Александровна

Information about the authors

Sherbakov S.S., D.Sci, Professor, Vice Chairman of the State Committee on Science and Technology of the Republic of Belarus, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics of Belarusian State University (concurrently).

Shemet L.A., Senior lecturer of the Department of Theoretical and Applied Mechanics of Belarusian State University.

Nasan A.A., Senior lecturer of the Department of Theoretical and Applied Mechanics of Belarusian State University.

Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 4,
Belarusian State University
tel. +375-33-313-04-94;
e-mail: shemetla@yandex.ru
Shemet Liudmila Alexandrovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-55-62>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛОЙ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРНОЙ СТРУКТУРЫ *n*-МОП-ТРАНЗИСТОРА

ЛОВШЕНКО И.Ю., СТЕМПИЦКИЙ В.Р., ШАНДАРОВИЧ В.Т.

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

Поступила в редакцию 4 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Применение изделий микроэлектроники в условиях космического пространства возможно при обеспечении защиты от специальных внешних воздействующих факторов, в том числе радиационного воздействия. Для цифровых интегральных микросхем, изготовленных по субмикронным КМОП-технологическим процессам, наибольшее влияние оказывают радиационные эффекты, вызванные воздействием тяжелой заряженной частицы. Применение специальных средств проектирования при разработке микросхем двойного назначения, с повышенной устойчивостью к воздействию тяжелых заряженных частиц, позволяет предотвратить возникновение одиночных событий. Таким образом, применение современных программных продуктов приборно-технологического моделирования в микроэлектронике при разработке элементной базы радиационностойких микросхем космического назначения обеспечит сокращение сроков разработки новых изделий, а также позволит модернизировать (повысить эксплуатационные характеристики) уже существующие приборные и схмотехнические решения. В работе представлены результаты моделирования воздействия тяжелой заряженной частицы с величиной линейной передачи энергии, равной 1,81, 10,1, 18,8, 55,0 МэВ·см²/мг, соответствующей ионам азота ¹⁵N⁺⁴ с энергией $E = 1,87$ МэВ, аргона ⁴⁰Ar⁺¹² с энергией $E = 372$ МэВ, железа ⁵⁶Fe⁺¹⁵ с энергией $E = 523$ МэВ, ксенона ¹³¹Xe⁺³⁵ с энергией $E = 1217$ МэВ, на электрические характеристики приборной структуры *n*-МОП-транзистора. Показаны зависимости максимального тока стока I_C от траектории движения тяжелой заряженной частицы и температуры окружающей среды.

Ключевые слова: МОП-транзистор, ионизирующее излучение, одиночный сбой, линейная передача энергии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования выполняются при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (задание 3.1.03).

Для цитирования. Ловшенко И.Ю., Стемпицкий В.Р., Шандарович В.Т. Моделирование воздействия тяжелой заряженной частицы на электрические характеристики приборной структуры *n*-МОП-транзистора. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 55-62.

MODELING THE IMPACTS OF HEAVY CHARGED PARTICLES ON ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF *n*-MOSFET DEVICE STRUCTURE

IVAN YU. LOVSHENKO, VIKTOR R. STEMPIITSKY, VERANIKA T. SHANDAROVICH

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

Submitted 4 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The use of microelectronic products in outer space is possible if protection is provided against special external influencing factors, including radiation effect. For digital integrated circuits manufactured using submicron CMOS processes, the greatest influence is exerted by radiation effects caused by exposure to a heavy charged particle. The use of special design tools in the development of dual-purpose microcircuits, with increased resistance to the impact of heavy charged particles, prevents single events from occurring. Thus, the use of modern software products for device and technological modeling in microelectronics when developing the element base of radiation-resistant microcircuits for space purposes will cut the time to develop new products and make it possible to modernize (improve performance) already existing device and circuitry solutions. The paper delivers the results of modeling the impacts of heavy charged particles with a magnitude of linear energy transfer equal to 1.81, 10.1, 18.8, 55.0 MeV·cm²/mg, corresponding to nitrogen ions ¹⁵N⁺⁴ with an energy $E = 1.87$ MeV; argon ⁴⁰Ar⁺¹² with an energy $E = 372$ MeV; ferrum ⁵⁶Fe⁺¹⁵ with an energy $E = 523$ MeV; xenon ¹³¹Xe⁺³⁵ with an energy $E = 1217$ MeV, on electrical characteristics of *n*-MOSFET device structure. The dependences of the maximum drain current I_C on the motion trajectory of a heavy charged particle and the ambient temperature are shown.

Keywords: MOSFET, ionization radiation, single error, linear energy transfer.

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

Gratitude. The research is carried out with financial support and as part of state research program “Photonics, opto- and microelectronics” (Assignment 3.1.03).

For citation. Lovshenko I.Yu., Stempitsky V.R., Shandarovich V.T. Modeling the impacts of heavy charged particles on electrical characteristics of *n*-MOSFET device structure. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 55-62.

Введение

К основным факторам космического пространства (КП), способным наносить повреждения электронным устройствам космических аппаратов, относят [1]: ионизирующее излучение (ИИ); космическую плазму; тепловое излучение Солнца, планет и КП и т. д. В состав ИИ входят поток первичных (электроны, протоны, тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ)) и вторичных (продукты ядерных превращений, связанные с первичными частицами) ядерных частиц. Ионизационные и ядерные потери энергии первичных и вторичных частиц в активных и пассивных областях полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных микросхем (ИМС) в результате взаимодействия ИИ с радиоэлектронной аппаратурой космических аппаратов могут привести их к параметрическому отказу в результате накопления дозы ИИ, а также возникновению одиночных эффектов (ОЭ, англ. single event effects, SEE), например, одиночного сбоя (ОС, англ. Single Event Upset, SEU). ОС происходит, когда ТЗЧ попадают в ИМС, и характеризуется кратковременной сильной ионизацией вдоль трека частицы [2]. Рекомбинация индуцированных ионом дырок и электронов приводит к возникновению импульса тока и изменению состояния логического элемента. Величина ионизирующего заряда, достаточного для ОС, зависит от напряжений на электродах и линейной передачи энергии (ЛПЭ, англ. linear energy transfer, LET).

Разработчикам ИМС аэрокосмического и специального назначения необходимо исследовать механизмы воздействия радиации на элементно-компонентную базу (ЭКБ) и использовать конструктивно-технологические решения, которые одновременно снижают влияние воздействия радиации и могут быть реализованы в рамках полупроводниковой технологии [3, 4].

Структура МОП-транзистора

Типовая приборная структура *n*-МОП-транзистора представлена на рис. 1. В качестве подложки выступает кремний, легированный бором с концентрацией примеси $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Изоляция между элементами выполнена по STI-технологии. Области стока и истока сформированы с использованием ионной имплантации фосфора через маску. Максимальная концентрация примеси в областях стока и истока составляет $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Глубина залегания сток-истоковых *p-n*-переходов равна 0,65 мкм. В качестве материала затвора используется поликремний. Контакты к областям стока, истока и подложки выполнены алюминием.

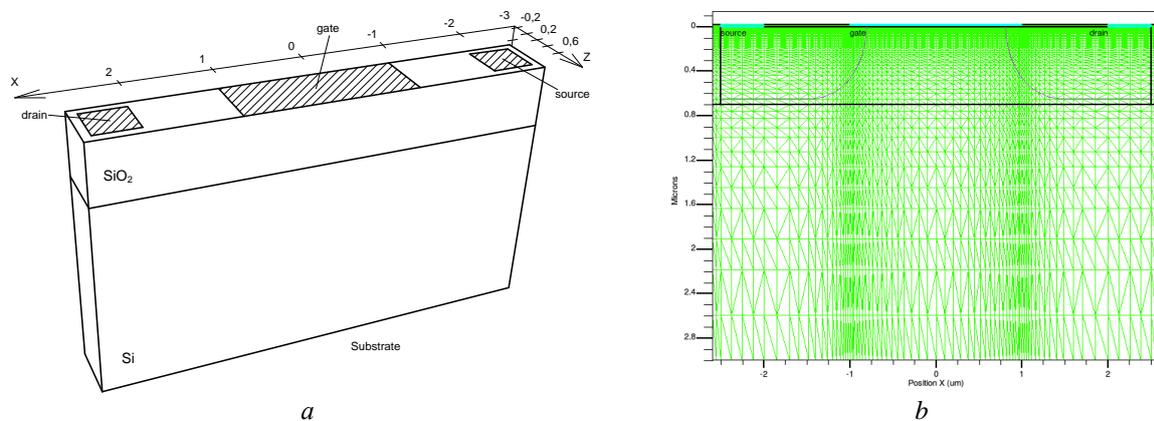


Рис. 1. Приборная структура *n*-канального МОП-транзистора (а) и ее сечение по координате $Z=0,25 \text{ мкм}$ (b)
Fig. 1. Device structure of *n*-channel MOS transistor (a) and its cross section along the coordinate $Z=0.25 \text{ }\mu\text{m}$ (b)

В табл. 1 представлены допустимые значения для основных конструктивных и технологических параметров исследуемой приборной структуры.

Таблица 1. Базовые параметры структуры *n*-МОП-транзистора
Table 1. Basic parameters of the structure of *n*-MOS transistor

Параметр Parameter	Допустимые значения Valid values		
	Мин. Min.	Ном. Nom.	Макс. Max.
Глубина оксида STI, мкм / STI oxide depth, μm	0,5	0,7	0,9
Ширина оксида STI, мкм / STI oxide width, μm	0,1	0,2	0,5
Толщина подзатворного оксида, нм / Gate oxide thickness, nm	11	13	15
Длина и ширина контактного окна к стоку и истоку, мкм / Length and width of contact window to drain and source, μm	0,3	0,5	0,7
Ширина окна при имплантации фосфора / Window width during phosphorus implantation	0,43	0,45	0,47
Длина затвора, мкм / Gate length, μm	1,0	2,0	3,0
Ширина затвора, мкм / Gate width, μm	0,5	1,5	2,5

Результаты и их обсуждение

Проведено моделирование воздействия ТЗЧ с ЛПЭ, равной 1,81, 10,1, 18,8, 55,0 МэВ·см²/мг, соответствующей ионам азота ¹⁵N⁺⁴ с энергией $E = 1,87$ МэВ, аргона ⁴⁰Ar⁺¹² с энергией $E = 372$ МэВ, железа ⁵⁶Fe⁺¹⁵ с энергией $E = 523$ МэВ, ксенона ¹³¹Xe⁺³⁵ с энергией $E = 1217$ МэВ, на электрические характеристики приборной структуры *n*-МОП-транзистора с использованием систем автоматизированного проектирования в микроэлектронике. Моделирование проводилось при значениях температуры окружающей среды 223, 303 и 383 К.

Исследовалось влияние траектории движения ТЗЧ, а именно углов α и β к нормали к поверхности *n*-МОП-транзистора в двух перпендикулярных плоскостях (рис. 2). Точкой входа является центр контакта к стоковой области (координаты точки – $x = 2,25$, $y = 0$, $z = 0,25$). В момент воздействия напряжение на затворе $V_3 = 1,2$ В, на стоке $V_C = 0,05$ В. ТЗЧ вызывает генерацию дополнительных носителей заряда (НЗ), которые являются причиной увеличения тока стока I_C . В дальнейшем происходит снижение величины тока стока I_C до первоначальной величины.

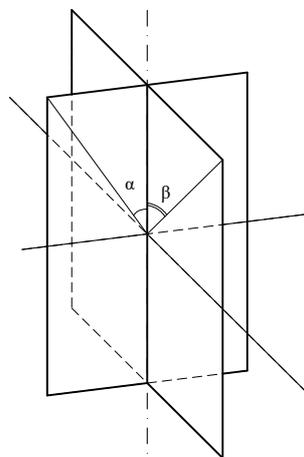


Рис. 2. Расположение углов α и β к нормали к поверхности *n*-МОП-транзистора
Fig. 2. Location of angles α and β to the normal to surface of the *n*-MOS transistor

На рис. 3 представлены зависимости тока стока I_C от времени моделирования при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ, равной 1,81 МэВ·см²/мг, при температуре окружающей среды 303 К и вариации угла α . Угол β при расчетах равняется 0°.

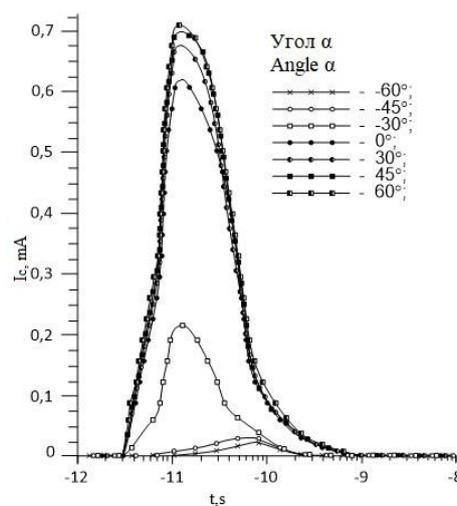


Рис. 3. Зависимости тока стока I_C от времени моделирования при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ, равной 1,81 МэВ·см²/мг, при температуре 303 К и вариации угла α
Fig. 3. Dependences of the drain current I_D on simulation time under the action of heavy ions with LET equal to 1.81 MeV cm²/mg at temperature of 303 K and variation of the angle α

Результаты моделирования показали, что величина тока стока I_C , вызванного воздействием ТЗЧ, во много раз превышает номинальное значение. Так, при значении угла $\alpha = 0^\circ$ ток стока I_C увеличивается в 626,7 раз (с $9,9 \cdot 10^{-7}$ до $6,2 \cdot 10^{-4}$ А). Восстановление величины тока стока I_C до номинального значения происходит в момент времени $t = 5,8$ нс. С увеличением угла α происходит повышение отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} (например, при $\alpha = 30^\circ$ отношение I_{Cmax} / I_{Cnom} равно 684,4; при $\alpha = 45^\circ$ $I_{Cmax} / I_{Cnom} = 715,9$; при $\alpha = 60^\circ$ $I_{Cmax} / I_{Cnom} = 707,3$). При этом время восстановления в меньшей степени зависит от угла α в диапазоне от 0 до 60° ($t = 5,4$ нс при $\alpha = 30^\circ$; $t = 6,7$ нс при $\alpha = 45^\circ$; $t = 5,2$ нс при $\alpha = 60^\circ$).

Угол β оказывает сильное влияние на величину пикового тока стока и время восстановления. Так, при углах $\alpha = 0^\circ$ и $\beta = 60^\circ$ ток стока I_C увеличивается в 22,2 раза (до значения $2,2 \cdot 10^{-5}$ А). Восстановление величины тока стока I_C до номинального значения происходит в момент времени $t = 7,72$ нс. При этом увеличение угла α практически не изменяет значения пикового тока стока, но приводит к повышению времени восстановления (при $\alpha = 30^\circ$ отношение I_{Cmax} / I_{Cnom} равно 19,97, $t = 7,66$ нс; при $\alpha = 45^\circ$ $I_{Cmax} / I_{Cnom} = 21,29$, $t = 7,44$ нс; при $\alpha = 60^\circ$ $I_{Cmax} / I_{Cnom} = 23,32$, $t = 6,27$ нс).

На рис. 4, а представлены зависимости тока стока I_C от времени моделирования при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ, равной $1,81 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, при разных температурах окружающей среды и угле $\alpha = 60^\circ$. На рис. 4, б представлено распределение скорости генерации носителей заряда вдоль трека прохождения частицы (303 К).

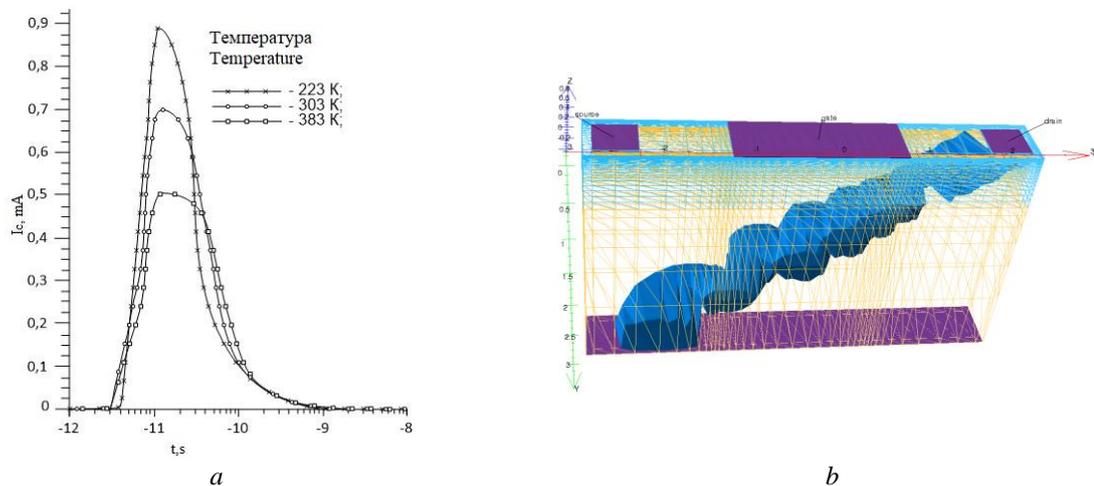


Рис. 4. Зависимости тока стока I_C от времени моделирования при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ, равной $1,81 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, при разных температурах и $\alpha = 60^\circ$ (а) и распределение скорости генерации носителей заряда вдоль трека прохождения частицы (б)

Fig. 4. Dependences of the drain current I_D on simulation time under the action of heavy ions with LET equal to $1.81 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$ at different temperatures and $\alpha = 60^\circ$ (a) and the distribution of generation rate of charge carriers along the particle path (b)

Показано, что величина тока стока I_C , вызванного воздействием ТЗЧ, при температурах выше 303 К изменяется примерно в одинаковое количество раз относительно номинального значения. Так, при температуре 303 К номинальный ток стока I_{Cnom} равен $9,9 \cdot 10^{-7}$ А, максимальный ток стока I_{Cmax} равен $7 \cdot 10^{-4}$ А ($I_{Cmax} / I_{Cnom} = 707,3$), при температуре 383 К – $7,2 \cdot 10^{-7}$ А и $5 \cdot 10^{-4}$ А соответственно ($I_{Cmax} / I_{Cnom} = 706,2$). При температурах ниже 303 К наблюдается существенное снижение отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} (592,4 при температуре 223 К). Как и в случае с влиянием угла α , время восстановления значения тока стока до номинальной величины показывает относительно слабую зависимость от температуры ($t = 5,6$ нс при $T = 223$ К; $t = 5,1$ нс при $T = 303$ К; $t = 6,1$ нс при $T = 383$ К).

На рис. 5, а представлена зависимость отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} от угла α (угол $\beta = 60^\circ$) при разных температурах. Показано, что качественно полученные посредством компьютерного моделирования зависимости совпадают и имеют наименьшее увеличение максимального тока стока I_C при $\alpha = 0^\circ$. При увеличении угла до значений $\alpha = 60^\circ$ или $\alpha = -60^\circ$ происходит повышение максимального тока стока и увеличение соотношения I_{Cmax} / I_{Cnom} на 1,2, 4,6 и 6,55 % для значений угла α , равного -30 , -45 и -60° соответственно, и на 2,5, 9,3 и 15,4 %

для значений угла α , равного 30, 45 и 60° соответственно. Данные значения справедливы практически для всего рассматриваемого температурного диапазона, кроме значения угла $\alpha = 60^\circ$. Так, соотношение $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ при температуре 223 К увеличивается на 15,4 %, при температуре 303 К – на 19,9 % и при температуре 383 К – на 20,1 %.

На рис. 5, *b* представлена зависимость времени восстановления от угла α (угол $\beta = 60^\circ$) при разных температурах.

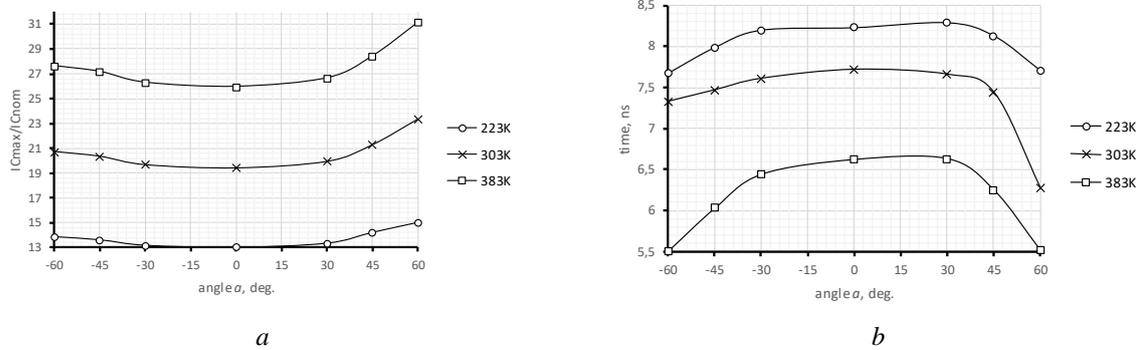


Рис. 5. Зависимость отношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ (*a*) и времени восстановления (*b*) от угла α (угол $\beta = 60^\circ$) при разных температурах

Fig. 5. Dependence of the ratio $I_{D_{\max}} / I_{D_{\text{ном}}}$ (*a*) and recovery time (*b*) on the angle α (angle $\beta = 60^\circ$) at different temperatures

В отличие от соотношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ зависимость времени восстановления от угла α демонстрирует более сложный характер. Показано, что с увеличением абсолютного значения угла α происходит снижение времени, необходимого для возврата приборной структуры МОП-транзистора в первоначальное состояние. При высокой и низкой температуре влияние этого абсолютного значения практически одинаково. Так, при температуре 383 К и угле α , равном -60 и 60° , время восстановления снижается на величину 1,11 и 1,1 нс соответственно, а при температуре 223 К – на величину 0,55 и 0,52 нс. Однако при температуре, близкой к 303 К, наибольшее влияние оказывает изменение угла в сторону канала транзистора (положительные значения угла α). Так, при угле α , равном -60 и 60° , время восстановления снижается на величину 0,39 и 1,45 нс соответственно (отличие в 3,7 раза).

На рис. 6, *a* представлены зависимости соотношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$, приведенного к значению при $\alpha = 0^\circ$, от угла α (температура $T = 303$ К, угол $\beta = 60^\circ$) для частиц, представленных ионами азота $^{15}\text{N}^{+4}$ с энергией $E = 1,87$ МэВ, аргона $^{40}\text{Ar}^{+12}$ с энергией $E = 372$ МэВ, железа $^{56}\text{Fe}^{+15}$ с энергией $E = 523$ МэВ и ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$ с энергией $E = 1217$ МэВ. Указанным частицам соответствует величина линейной передачи энергии, равная 1,81, 10,1, 18,8 и 55,0 МэВ·см²/мг. Показано, что с повышением ЛПЭ частиц относительное увеличение соотношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ при изменении угла α снижается. Так, для ионов азота $^{15}\text{N}^{+4}$, аргона $^{40}\text{Ar}^{+12}$ и железа $^{56}\text{Fe}^{+15}$ при угле $\alpha = 60^\circ$ соотношение увеличивается в среднем на 20 %, а для иона ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$ – на 10,99 %. При этом сами значения соотношения $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ пропорциональны значению ЛПЭ частицы: 23,3 (максимальный ток стока I_C равен $2,31 \cdot 10^{-5}$ А), 123,2 ($1,22 \cdot 10^{-4}$ А), 218,2 ($2,16 \cdot 10^{-4}$ А), 408,1 ($4,04 \cdot 10^{-4}$ А) в случае воздействия ионов азота, аргона, железа и ксенона соответственно. Также можно заметить, что при положительных значениях угла α его влияние на соотношение $I_{C_{\max}} / I_{C_{\text{ном}}}$ более чем в 3 раза (а для иона ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$ в 20 раз) выше по сравнению с отрицательными значениями угла α .

На рис. 6, *b* представлены зависимости времени восстановления, приведенного к значению при $\alpha = 0^\circ$, от угла α (температура $T = 303$ К, угол $\beta = 60^\circ$) для частиц, представленных ионами азота $^{15}\text{N}^{+4}$ с энергией $E = 1,87$ МэВ, аргона $^{40}\text{Ar}^{+12}$ с энергией $E = 372$ МэВ, железа $^{56}\text{Fe}^{+15}$ с энергией $E = 523$ МэВ и ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$ с энергией $E = 1217$ МэВ. Проводя анализ полученных результатов, трудно выявить закономерности в зависимости времени восстановления от ЛПЭ частиц.

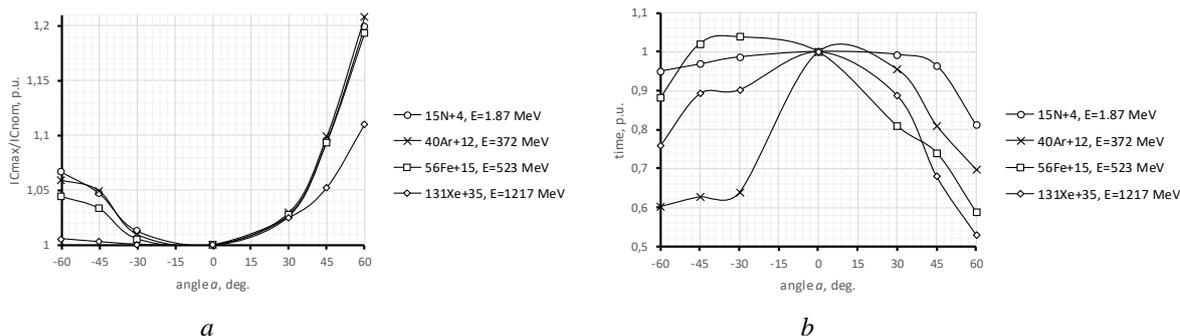


Рис. 6. Зависимость отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} (a) и времени восстановления (b) от угла α (угол $\beta = 60^\circ$, температура $T = 303$ K) для разных частиц
Fig.6. Dependence of the ratio I_{Dmax} / I_{Dnom} (a) and recovery time (b) on the angle α (angle $\beta = 60^\circ$, temperature $T = 303$ K) for different particles

Заключение

Из анализа результатов моделирования воздействия ТЗЧ на приборную структуру n -МОП-транзистора можно сделать вывод, что величина тока стока I_C , вызванного воздействием ТЗЧ, во много раз превышает номинальное значение тока стока I_C (до 700 раз для иона азота $^{15}\text{N}^{+4}$ с энергией $E = 1,87$ МэВ) и имеет сильную зависимость от углов α и β , которые характеризуют траекторию движения частицы. При температурах выше 303 K отношение пикового тока стока к номинальному остается практически постоянным. При температурах ниже 303 K наблюдается существенное снижение отношения I_{Cmax} / I_{Cnom} (до 592,4 при температуре 223 K). Время восстановления в меньшей степени зависит от угла α в диапазоне от 0 до 60° ($t = 5,4$ нс при $\alpha = 30^\circ$; $t = 6,7$ нс при $\alpha = 45^\circ$; $t = 5,2$ нс при $\alpha = 60^\circ$) и температуры ($t = 5,6$ нс при $T = 223$ K; $t = 5,1$ нс при $T = 303$ K; $t = 6,1$ нс при $T = 383$ K), в большей степени зависит от угла β ($t = 5,8$ нс при $\beta = 0^\circ$; $t = 0,27$ нс при $\beta = 60^\circ$). Для остальных частиц (ионов аргона $^{40}\text{Ar}^{+12}$, железа $^{56}\text{Fe}^{+15}$ и ксенона $^{131}\text{Xe}^{+35}$) наблюдается качественное совпадение зависимостей, кроме случая со временем восстановления.

Список литературы

1. Таперо К.И. *Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения*. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2012.
2. Чумаков А.И. *Действие космической радиации на интегральные схемы*. Москва: Радио и связь; 2004.
3. Белоус А.И. *Космическая электроника. В 2-х книгах*. Москва: Техносфера; 2015.
4. Анашин В.С. Проблемы обеспечения высоких сроков активного существования РЭА спутников связи. *Электросвязь*. 2009;(4):19-22.

References

1. Tapero K.I. [*Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications*]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2012. (In Russ.)
2. Chumakov A.I. [*Effect of space radiation on integrated circuits*]. Moscow: Radio i svyaz'; 2004. (In Russ.)
3. Belous A.I. [*Space electronics. In 2 volumes*]. Moscow: Tekhnosfera; 2015. (In Russ.)
4. Anashin V.S. [Problems of ensuring the long life of the radio electronic equipment for communication satellites]. *Elektrosvyaz'*. 2009;(4):19-22. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Стемпичский В.Р., к.т.н., доцент, заместитель начальника научно-исследовательской части, научный руководитель лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ловшенко И.Ю., заведующий научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шандарович В.Т., аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники, младший научный сотрудник научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-90;
+375-17-293-84-09;
e-mail: lovshenko@bsuir.by
Ловшенко Иван Юрьевич

Information about the authors

Stempitsky V.R., PhD., Associate Professor, Deputy Head of Research and Development Department Sc. Adviser of “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (R&D Lab 4.4) of R&D Unit of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lovshenko I.Yu., Head of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (R&D Lab 4.4) of R&D Unit of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shandarovich V.T., PG student of Micro- and Nanoelectronics Department, Researcher of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (R&D Lab 4.4) of R&D Unit of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
тел. +375-17-293-88-90;
+375-17-293-84-09;
e-mail: lovshenko@bsuir.by
Lovshenko Ivan Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-63-70>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 654.924.5:625.748.28

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЗОНЕ ГОРЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ ГАРАЖЕЙ-СТОЯНОК ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

ХОРОШКО В.В.¹, ГЛИНИСТЫЙ Р.В.², ГЛИНИСТЫЙ Р.Р.¹, ШНЕЙДЕРОВ Е.Н.¹,
КОРОЛЁВ А.Г.¹, КОРОЛЬ О.М.³

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

²ООО «Дювр-электро» (г. Минск, Республика Беларусь)

³ЦИСП РУП «Стройтехнорм» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 9 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье представлены результаты испытаний систем автоматического пожаротушения в части снижения температурного воздействия на строительные конструкции (перекрытия), воздухопроводы системы вытяжной противодымной вентиляции. Проведены испытания по определению эффективности функционирования системы противодымной вентиляции по удалению продуктов горения по стальным воздухопроводам с толщиной металла 1 мм, а также анализ температурного режима на строительные конструкции, воздухопровод системы вытяжной противодымной вентиляции при огневом воздействии. Для системы оповещения (СО) второго типа была использована СО-2 на базе приборов ИСО «Болид». Предусмотрен запуск системы оповещения людей о пожаре: автоматически от системы автоматического пожаротушения; дистанционно от ручных пожарных извещателей, установленных на эвакуационных выходах из помещения хранения автомобилей. Проведены два натуральных огневых испытания для легковых автомобилей. При проведении испытаний возгорание автомобилей проводилось изнутри салона. В ходе проведенных натуральных огневых испытаний воздухопроводы противодымной вентиляции сохранили целостность и герметичность, что подтверждено положительными протоколами аэродинамических испытаний вентиляционной системы противодымной вентиляции. Воздуховоды системы вытяжной противодымной вентиляции сохранили целостность, фланцевые соединения воздухопроводов сохранили прочность и герметичность, крепления воздухопроводов не имеют повреждений и сохранили свои функции. В результате испытаний установлено: ограничение очага пожара в горизонтальной проекции автомобиля (периметр автомобиля); заполнение объема помещения хранения автомобилей дымовоздушной смесью происходит лавинообразно на всю высоту помещения; в результате лавинообразного заполнения помещения установлено отсутствие нейтральной зоны (зоны безопасности). По результатам проведенных испытаний возможно внесение изменений в действующие технические нормативно-правовые акты.

Ключевые слова: электронные системы безопасности, испытания, пожарная безопасность, опасные факторы пожара.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Хорошко В.В., Глинистый Р.В., Глинистый Р.Р., Шнейдеров Е.Н., Королёв А.Г., Король О.М. Эффективность электронных систем пожарной безопасности в зоне горения автомобилей для подземных гаражей-стоянок жилых зданий. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 63-70.

ELECTRONIC FIRE SAFETY SYSTEMS EFFICIENCY IN THE COMBUSTION ZONE OF CARS FOR UNDERGROUND PARKINGS OF RESIDENTIAL BUILDINGS

VITALIY V. KHOROSHKO¹, ROMAN V. HLINISTY², RUSLAN R. HLINISTY¹,
EVGENY N. SHNEIDEROV¹, ARTSYOM G. KOROLEV¹, OLEG M. KOROL³

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

² LLC “Duvr electro” (Minsk, Republic of Belarus)

³Stroitekhnorm (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 9 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. In this paper we presents the results of tests of automatic fire alarm systems in terms of reducing the temperature effect on building structures (floors), air ducts of the exhaust smoke ventilation system. Tests were carried out to determine the efficiency of the antismoke ventilation system for the removal of combustion products through steel air ducts with a metal thickness of 1 mm, as well as analysis of the temperature regime on building structures, the air duct of the exhaust smoke ventilation system under fire exposure. For the warning system (SO) of the second type, CO-2 we used on the basis of ISO “Bolid” devices. The launch of a fire warning system is provided for: automatically from an automatic fire extinguishing system; remotely from manual fire detectors installed at emergency exits from the vehicle storage room. Two full-scale firing tests were carried out for passenger cars. During the tests, the vehicles were ignited from inside the passenger compartment. In the course of the fire tests proved that the antismoke control ventilation ducts retained their integrity and tightness, which was confirmed by the positive protocols of aerodynamic tests of the smoke control ventilation system. The air ducts of the exhaust smoke ventilation system retained their integrity, the flange connections of the air ducts retained their strength and tightness, the fastenings of the air ducts were not damaged and retained their functions. The tests established the following: limitation of the fire center in the horizontal projection of the vehicle (the perimeter of the vehicle); filling the volume of the storage room for vehicles with a smoke-steam-air mixture occurs in an avalanche manner over the entire height of the room; as a result of the avalanche-like filling of the room, the absence of a neutral zone (security zone) was determined. Based on the results of the tests, it is possible to make changes to the existing technical normative legal acts.

Keywords: electronic security systems, testing, fire safety, fire hazards.

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

For citation. Khoroshko V.V., Hlinisty R.V., Hlinisty R.R., Shneiderov E.N., Korolev A.G., Korol O.M. Electronic fire safety systems efficiency in the combustion zone of cars for underground parkings of residential buildings. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 63-70.

Введение

Проблема содержания и хранения транспортных средств в крупных городах все чаще решается путем организации подземных гаражей-стоянок [1]. В условиях постоянно увеличивающегося количества транспортных средств и нехватки мест для них это оптимальное и устраивающее практически всех решение. Строительство и эксплуатация подземных гаражей-стоянок сопряжены со многими сложностями, в том числе устройством вентиляции и противодымной защиты. В соответствии с требованиями ТКП 45-3.02-25-2006* в помещениях подземных гаражей-стоянок для удаления дыма допускается использовать вытяжную вентиляцию с механическим побуждением, если она отвечает требованиям ТКП 45-4.02-273. Данное требование по устройству единой системы вентиляции с учетом удаления вредных газовыделений из помещений хранения автомобилей из верхней и нижней зоны помещения не находит практического применения из-за сложности устройства системы (количества противопожарных клапанов с реверсным приводом и автоматизации системы) и значительных экономических затрат [2, 3].

Экспериментальная часть

В рамках исследований проводились испытания по определению эффективности функционирования системы противодымной вентиляции по удалению продуктов горения по стальным воздуховодам с толщиной металла 1 мм, а также анализ температурного режима на строительные конструкции (перекрытия), воздуховод системы вытяжной противодымной вентиляции при огневом воздействии (горение автомобиля в подземном гараже-стоянке под воздуховодом).

В качестве места проведения испытаний был определен гараж-стоянка одноэтажный подземный, встроенно-пристроенный, неотапливаемый, II степени огнестойкости по ТКП 45-2.02-315-2018*, класс функциональной пожарной опасности Ф5.2, третьего класса сложности (К-3), предназначенная для хранения 46 автомобилей – I категории. Площадь помещения хранения автомобилей на отм. –3,700–1692,49 м². Высота помещения хранения автомобилей на отм. –3,700–2,5 м. Объем помещения хранения автомобилей на отм. –3,700–4231,225 м³.

Для проведения испытаний гараж-стоянка был оборудован системами: автоматического контроля параметров воздушной среды; вытяжной противодымной вентиляции; оповещения людей о пожаре, а также автоматической установкой пожаротушения. Для системы оповещения (СО) второго типа была использована СО-2 на базе приборов ИСО «Болид». Предусмотрен запуск системы оповещения людей о пожаре: автоматически от системы автоматического пожаротушения; дистанционно от ручных пожарных извещателей, установленных на эвакуационных выходах из помещения хранения автомобилей.

Автоматическая установка пожаротушения соответствовала приложению «Б» ТКП 45-2.02-190-2010 по степени опасности развития пожара и пожарной нагрузке сгораемых материалов гаража-стоянки и относится ко 2-й группе помещений с интенсивностью орошения 0,12 л/с·м², расчетной площадью 240 м², временем тушения 60 мин. Для тушения гаража-стоянки предусмотрена спринклерная воздухозаполненная система с оросителями водяными спринклерными розеткой вверх СВО0-РВо(д) 0,6-R½/P57.ВЗ-«СВВ-К115» с коэффициентом производительности $K = 0,6$ с, минимальным давлением на диктующем оросителе 0,2 МПа (согласно эпюре орошения спринклерного оросителя и графика зависимости интенсивности орошения спринклерного оросителя от давления с радиусом орошения 2,0 м).

Электротехническая часть автоматической установки водяного пожаротушения построена на оборудовании пожарной системы контроля и управления «Орион». В ее состав входят: пульты контроля и управления С2000М; блоки индикации С2000-БИ (учтены в разделах АПТ2 и ПД32); блок контроля и индикации Поток-БКИ; прибор пожарный управления Поток-3Н; приборы приемно-контрольные С2000-4, Сигнал-10, Сигнал-20П; шкафы контрольно-пусковые ШКП-45 (2 шт.) для управления основным и резервным пожарными насосами ($P = 30,0$ кВт).

Испытания проводились при горении одного автомобиля в помещении хранения автомобилей с учетом наличия автоматической установки пожаротушения (спринклерная воздухозаполненная система).

Для обеспечения наиболее жестких условий проведения натуральных огневых испытаний с целью исключения возможности опровержения полученных результатов в ходе их проведения предусматривалось:

- в месте установки автомобиля под воздуховодом демонтируется установленный спринклерный ороситель;
- автомобиль размещается под воздуховодами и рядом с дымоприемным устройством.

Результаты и их обсуждение

Были проведены два натуральных огневых испытания для легковых автомобилей (Renault-19 и ВАЗ 2110).

В первом испытании высота от крыши автомобиля до низа воздуховода составляла 0,78 м, во втором и третьем – 0,74 м. Первое и второе испытания проводились на одном и том же паркинге. До и после испытаний проводились аэродинамические испытания вентиляционной системы противодымной защиты ВДб в соответствии с НПБ 23-2010.

В ходе первых испытаний установлено:

- точечный дымовой пожарный извещатель (шлейф № 1) сработал на 80 с;
- извещатель пламени (шлейф № 3) сработал на 83 с;
- первый спринклерный ороситель сработал на 188 с;
- высота нейтральной зоны (зоны безопасности, высота 1,7 м от уровня пола) сохранялась в течение 205 с;
- полная потеря видимости наступила (вследствие лавинообразного обрушения дымопаровоздушной смеси) на 255 с;
- видимость в радиусе 10 м от горячей машины наступила на 1285 с.

Показания термомпар приведены на рис. 1.

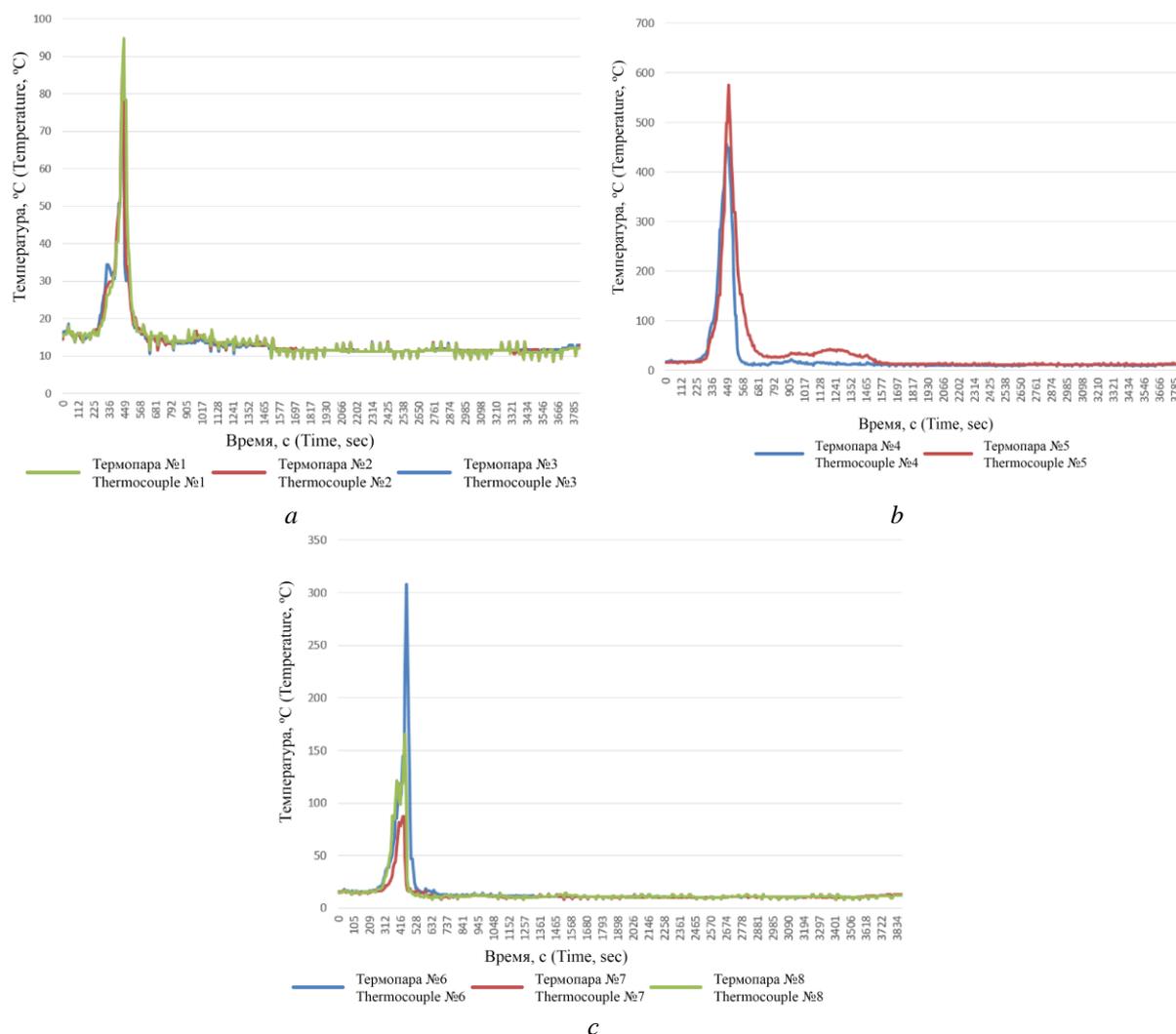


Рис. 1. Результаты по измерению температурного режима первых огневых испытаний для термомпар: а – № 1, 2, 3; б – № 4, 5; с – № 6, 7, 8

Fig. 1. The results of measuring the temperature regime of the first fire tests for thermocouple: а – № 1, 2, 3; б – № 4, 5; с – № 6, 7, 8

Термопары установлены: № 1 – в центре дымоприемного устройства (ДПУ) № 1; № 2 – внутри воздуховода на расстоянии 1 м от ДПУ № 1; № 3 – внутри воздуховода на расстоянии 2,25 м от ДПУ № 1; № 4 – под воздуховодом на расстоянии 2,25 м от ДПУ № 1; № 5 – под воздуховодом на расстоянии 1 м от ДПУ № 1; № 6 – под перекрытием на расстоянии 1,5 м от ДПУ № 1; № 7 – под перекрытием на расстоянии 0,5 м от проекции автомобиля; № 8 – под перекрытием на расстоянии 0,5 м от проекции автомобиля.

В ходе проведения вторых натурных испытаний было установлено:

- точечный дымовой пожарный извещатель (шлейф № 1) сработал на 92 с;
- извещатель пламени (шлейф № 3) сработал на 103 с;
- первый спринклерный ороситель сработал на 215 с;
- высота нейтральной зоны (зоны безопасности, высота 1,7 м от уровня пола) сохранялась в течение 258 с;
- полная потеря видимости наступила (вследствие лавинообразного обрушения дымопаровоздушной смеси) на 345 с;
- видимость в радиусе 10 м от горящей машины наступила на 970 с.

В ходе испытаний сработало три спринклерных оросителя.

Показания термопар приведены на рис. 2.

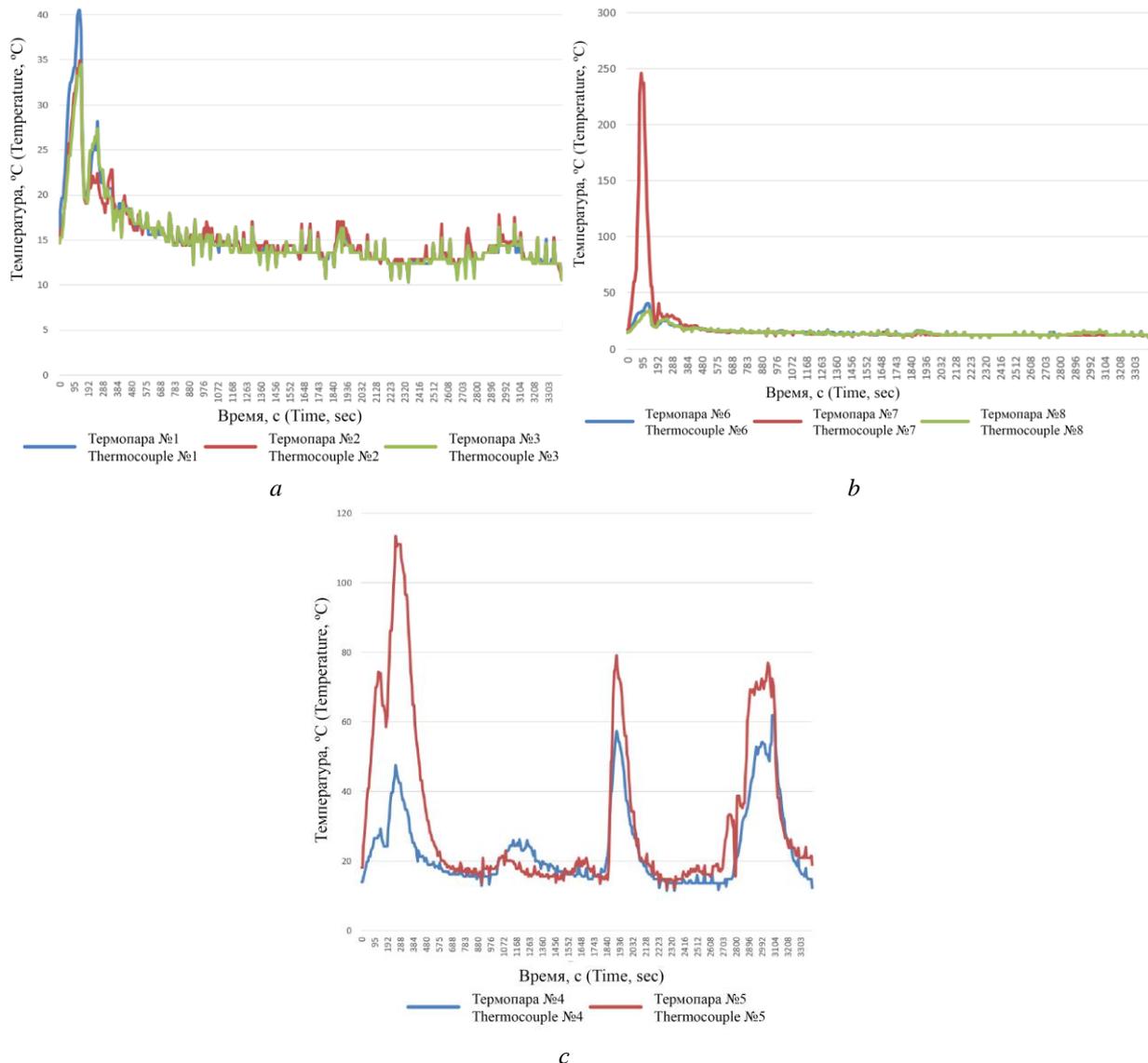


Рис. 2. Результаты по измерению температурного режима вторых огневых испытаний для термопар: а – № 1, 2, 3; б – № 6, 7, 8; с – № 4, 5

Fig. 2. The results of measuring the temperature regime of the second fire tests for thermocouple: а – № 1, 2, 3; б – № 6, 7, 8; с – № 4, 5

В ходе проведенных натурных огневых испытаний воздуховоды противодымной вентиляции сохранили целостность и герметичность, что подтверждено положительными протоколами аэродинамических испытаний вентиляционной системы противодымной вентиляции. В табл. 1 приведены результаты измерений параметров. Воздуховоды системы вытяжной противодымной вентиляции сохранили целостность, фланцевые соединения воздуховодов сохранили прочность и герметичность, крепления воздуховодов не имеют повреждений и сохранили свои функции.

Данное исследование подтверждает необоснованность устройства конструктивной огнезащиты воздуховодов вытяжной противодымной вентиляции при наличии спринклерной системы пожаротушения в паркингах.

Таблица 1. Результаты измерений параметров системы противодымной защиты
Table 1. The results of measuring the parameters of the smoke protection system

Период измерения Measurement period	Расход фактический объемный, м ³ /ч Actual consumption, m ³ /h		
	Клапан № 1 Valve No. 1	Клапан № 2 Valve No. 2	Клапан № 3 Valve No. 3
Перед проведением испытаний № 1 Before testing No. 1	10132	6711	5990
После проведения огневых испытаний № 1 After testing No. 1	10132	7665	6067
После проведения огневых испытаний № 2 After testing No. 2	11016	7434	5835
Относительное изменение, % Relative change, %	+8	+9	-2,5

В ходе испытаний установлено, что при сработке спринклерного оросителя автоматической установки пожаротушения (подача огнетушащего вещества (воды) в очаг пожара) происходит:

- ограничение очага пожара в горизонтальной проекции автомобиля (периметр автомобиля);
- выделение большого количества дымопаровоздушной смеси;
- заполнение объема помещения хранения автомобилей дымопаровоздушной смесью лавинообразно на всю высоту помещения;
- исключение нейтральной зоны (зоны безопасности) (дымопаровоздушная смесь находится как в верхней, так и в нижней части помещения);
- охлаждение дымопаровоздушной смеси (максимальная температура на входе в дымоприемное устройство варьировалась от +37,1 до +75,1 °С);
- значительное снижение плавучести дымопаровоздушной смеси;
- локализация пожара и быстрое падение температуры окружающей среды в зоне горящего автомобиля, *максимальная температура* на строительных конструкциях (перекрытии) над автомобилями в испытаниях составила: +101,2 °С в течение 16 с; выше +80 °С в течение 2 мин; +182,4 °С в течение 8 с, выше +100 °С в течение 1,3 мин; +65,9 °С в течение 12 с, выше +50 °С в течение 2 мин; +308,3 °С, выше +200 °С в течение 24 с; выше +100 °С в течение 1,5 мин; +245,9 °С, выше +200 °С в течение 32 с, выше +100 °С в течение 1,5 мин.

В результате испытаний установлено следующее:

- бензобаки (заправлены бензином АИ-92 на 50 %, как наихудший вариант) горячей машины не разгерметизировались, возгорание топлива и взрыва не произошло;
- зона видимости (в радиусе 7–10 м от горящего автомобиля) в помещении гаража-стоянки наступает на 15–20 мин от начала пожара.

Заключение

По результатам проведенных испытаний возможно внесение изменений в действующие технические нормативно-правовые акты:

- внутренний противопожарный водопровод необходим для тушения на начальной стадии горения автомобиля (до сработки спринклерного оросителя) или для дотушивания

отдельных скрытых очагов горения, при этом расход воды на внутреннее пожаротушение достаточно принимать 2,5 л/с;

– при наличии в гараже-стоянке автоматической установки пожаротушения огнезащита воздуховодов систем противодымной вентиляции (ЕІ 60) в помещении хранения автомобилей не требуется;

– размещение отдельных шахт систем вытяжной противодымной вентиляции (помещений, оборудованных автоматической установкой пожаротушения) на расстоянии не менее 8 м от наружных стен с окнами или от воздухозаборных устройств систем приточной общеобменной вентиляции других примыкающих зданий;

– отделение гаражей-стоянок, встроенных в здания иного назначения, допустимо противопожарными преградами с пределом огнестойкости не менее REI 60, а не противопожарными стенами и перекрытиями 1 типа (REI 150).

Список литературы / References

1. Xin J., & Huang C. Fire risk analysis of residential buildings based on scenario clusters and its application in fire risk management. *Fire Safety Journal*. 2013;62:72-78. DOI:10.1016/j.firesaf.2013.09.022.
2. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*. 2020;103020. DOI:10.1016/j.firesaf.2020.103020.
3. Runefors M., Johansson N., & van Hees P. How could the fire fatalities have been prevented? An analysis of 144 cases during 2011–2014 in Sweden: An analysis. *Journal of Fire Sciences*. 2016;34(6):515-527. DOI:10.1177/0734904116667962.
4. Zhang S., Shi L., Wang J., Li X., Han Y., He K., & Cheng X. Critical ventilation velocity of two fire sources with different separating distances in road tunnel. *Journal of Fire Sciences*. 2019;073490411985754. DOI:10.1177/0734904119857543.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Хорошко В.В., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Глинистый Р.В., директор ООО «Дювр-электро».

Глинистый Р.Р., студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шнейдеров Е.Н., к.т.н., начальник центра развития дистанционного образования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Королёв А.Г., магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Король О.М., начальник отдела инжиниринговых услуг и экспертной деятельности РУП «Стройтехнорм».

Information about the authors

Khoroshko V.V., PhD, Head of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Hlinisty R.V., Director of the LLC “Duvr electro”.

Hlinisty R.R., student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shneiderov E.N., PhD, Head of the Center for the Development of Distance Education, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Korolev A.G., Master's student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Korol O.M., Head of the Department of Engineering Services and Expert Activity of “Stroitekhnorm”.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-01;
e-mail: khoroshko@bsuir.by
Хорошко Виталий Викторович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-86-01;
e-mail: khoroshko@bsuir.by
Khoroshko Vitaliy Viktorovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-71-78>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.794.61

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФЕНА И НИТРИДА БОРА

МУРАВЬЕВ В.В., МИЩЕНКО В.Н.

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

Поступила в редакцию 27 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Приведены результаты моделирования процессов переноса электронов в трехмерной полупроводниковой структуре, содержащей графен и слои гексагонального нитрида бора, с использованием метода Монте – Карло. Графен рассматривается в настоящее время как один из наиболее перспективных материалов для создания новых полупроводниковых приборов в высокочастотных диапазонах работы. Использование графена, который обладает высокой подвижностью носителей заряда, высокой теплопроводностью и рядом других положительных свойств, позволяет разработать новые полупроводниковые приборы с хорошими выходными характеристиками. Путем моделирования получены основные характеристики переноса электронов – зависимости скорости, средней энергии, подвижности от напряженности электрического поля в полупроводниковой структуре, содержащей слой графена и области из нитрида бора. Моделирование процессов переноса электронов производилось с учетом изменения температуры слоев графена и нитрида бора, что наблюдается с увеличением напряженности электрического поля в структуре. Анализ полученных зависимостей показал, что при небольших значениях напряженности электрического поля, которые не превышают величину, равную приблизительно 2,5 кВ/см, наблюдается нелинейное изменение температуры структуры. При более значительных значениях напряженности электрического поля отмечается квазилинейное изменение температуры. Аналогичный вид зависимостей наблюдается и для зависимостей средней энергии электронов от напряженности электрического поля, полученных для слоя графена. Полученные зависимости характеристик переноса электронов могут служить основой для определения выходных характеристик в многослойных полупроводниковых приборах, содержащих слои графена, гексагонального нитрида бора и других материалов.

Ключевые слова: графен, нитрид бора, процессы переноса электронов, метод Монте – Карло.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Моделирование процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре с использованием графена и нитрида бора. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 71-78.

SIMULATION OF ELECTRON TRANSFER PROCESSES IN A SEMICONDUCTOR STRUCTURE USING GRAPHENE AND BORON NITRIDE

VALENTIN V. MURAVYOV, VALERY N. MISHCHENKA

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

Submitted 27 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This paper presents the results of simulating the electron transfer processes in a three-dimensional semiconductor structure containing graphene and layers of boron hexagonal nitride using the Monte – Carlo method. Graphene is currently considered one of the most promising materials for the creation of new semiconductor devices with good performance for high frequency ranges. The use of graphene, which has high mobility of charge carriers, high thermal conductivity and a number of other positive properties, allows the development of new semiconductor devices with good output characteristics. The simulation allowed us to obtain the main characteristics of electron transfer, namely, dependence of speed, average energy, mobility on the strength of the electric field in a semiconductor structure containing a layer of graphene and boron nitride region. Electron transfer processes were simulated considering temperature variations of graphene and boron nitride layers, which is observed with increasing strength of the electric field in the structure. The analysis of the obtained dependencies showed that at small values of electric field strength, which does not exceed approximately 2.5 kV/cm, there is a nonlinear change in electron energy and temperature. At more significant values of electric field strength a quasi-linear change in temperature is observed. The similar course of dependence is observed also for the dependences of the average energy of electrons on the intensity of the electric field for the graphene layer.. The resulting dependencies of electron transfer characteristics can serve the basis for determining output characteristics in multi-layer semiconductor devices containing layers of graphene, boron hexagonal nitride and other materials.

Keywords: graphene, boron nitride, electron transfer processes, Monte – Carlo method.

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

For citation. Muraviev V.V., Mishchenko V.N. Simulation of electron transfer processes in a semiconductor structure using graphene and boron nitride. Doklady BSUIR. 2020; 18(7): 71-78.

Введение

В настоящее время наблюдается большой рост разрабатываемых электронных приборов с использованием перспективного двумерного материала графена. Конструирование таких приборов для диапазонов СВЧ и КВЧ с улучшенными выходными характеристиками ставит задачи подбора сопутствующих графену диэлектрических и полупроводниковых материалов, которые бы обеспечили реализацию его уникальных электронных характеристик. Одним из перспективных материалов, которые рассматриваются для этих целей, является гексагональный нитрид бора (BN). Он имеет ряд положительных свойств: близкая к графену структура кристаллической решетки, низкая величина шероховатости поверхности, большой зазор между долинами зоны проводимости и валентной зоны, сравнительно высокое значение коэффициента теплопроводности. Известны конструкции полупроводниковых приборов с использованием графена и нитрида бора [1–3]. Однако детальный анализ работы таких приборов либо отсутствует, либо проводится с использованием упрощенных дейф-диффузионных моделей [3, 4]. Одним из наиболее известных методов анализа полупроводниковых структур считается метод Монте – Карло, который позволяет детально исследовать процессы переноса носителей заряда для реальных приборов [5, 6]. Целью данной статьи является исследование процессов переноса электронов с учетом их основных механизмов рассеяния на основе метода Монте – Карло в полупроводниковой структуре с использованием слоя графена, размещенного между двумя областями из гексагонального BN.

Метод и особенности моделирования параметров переноса электронов

Метод Монте – Карло [5, 6] был использован для исследования процессов переноса электронов в трехмерной полупроводниковой структуре, которая состояла из монослоя графена, размещенного между двумя областями, выполненными из гексагонального BN. Такое построение в целом соответствует экспериментальной структуре, рассмотренной в [7].

Были выбраны следующие размеры моделируемой полупроводниковой структуры. Значение толщины слоя графена равнялось $0,34 \cdot 10^{-9}$ м [8]. Величина толщины верхнего слоя нитрида бора принималась равной $55 \cdot 10^{-9}$ м, толщины нижнего слоя нитрида бора – $32 \cdot 10^{-9}$ м, длины структуры – $4 \cdot 10^{-6}$ м, ширина структуры – $2 \cdot 10^{-6}$ м. Представленные выше размеры соответствовали размерам экспериментальной структуры, которая описана в [7]. Для реализации метода Монте – Карло количество моделируемых частиц для всей структуры со слоем графена и областями из гексагонального BN принималось равным 25 600. Полупроводниковая структура разбивалась по длине (координата x) на 100 элементарных ячеек, по высоте (координата y) – на 256 элементарных ячеек. Контактные области, которые представлены в [7], в процедуре моделирования с применением метода Монте – Карло не рассматривались, однако данные о них были использованы для расчета величины плотности выходного тока.

Для гексагонального BN значения электрофизических параметров и параметров долин выбирались из данных, полученных в [8, 9]. Для этого материала характерна трехдолинная К-М-Г-зонная диаграмма [8, 9]. Для долины К наблюдается наименьший энергетический зазор между зоной проводимости и валентной зоной.

В разработанной программе моделирования процессов переноса носителей заряда с использованием метода Монте – Карло для областей, состоящих из материала BN, были учтены наиболее важные механизмы рассеяния: на оптических фононах, на ионизированных примесях, на акустических фононах, междолинное рассеяние между неэквивалентными долинами. Для слоя графена рассматривались следующие механизмы рассеяния: на полярных оптических фононах, на примесях, на акустических фононах, на поверхностных оптических фононах, связанных с границей раздела графен и BN, а также дополнительно учитывалось электрон-электронное рассеяние [10, 11].

Для расчета величины энергии E электронов в графене использовалась зависимость этого параметра от волнового вектора k , представленная формулой из [12, 13]:

$$E = \hbar \cdot v_F \cdot \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}, \quad (1)$$

где k_x, k_y, k_z – составляющие волнового вектора (волновые числа) вдоль координат x, y, z соответственно, v_F – скорость Ферми в графене, величина которой принималась равной $1,5 \cdot 10^8$ см/с [7], \hbar – редуцированная постоянная Планка.

Моделирование средней дрейфовой скорости электронов для представленной структуры проводилось с применением выражения из [7]:

$$v = \frac{I}{e \cdot n_{sh} \cdot w_{sh}}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, I – выходной ток структуры, n_{sh} – концентрация электронов, w_{sh} – ширина структуры. Величина тока I определялась для всей структуры при использовании метода Монте – Карло. Значения параметров n_{sh} и w_{sh} соответствовали данным, описанным в [7].

Моделирование средней величины подвижности электронов выполнялся по формуле из [6]:

$$\mu = \frac{v}{F}, \quad (3)$$

где v – средняя дрейфовая скорость электронов, F – напряженность электрического поля.

Результаты моделирования

Результаты моделирования процессов переноса электронов в рассмотренной выше структуре, которая содержит слой графена, размещенного между областями из гексагонального BN, в зависимости от величины напряженности электрического поля F представлены на рис. 1–3.

На рис. 1, *a* представлены результаты расчета зависимости плотности выходного тока в полупроводниковой структуре, описанной выше, от напряженности электрического поля при различных значениях концентрации электронов в слое графена $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2).

На рис. 1, *b* показаны зависимости средней дрейфовой скорости электронов в полупроводниковой структуре от напряженности электрического поля. Кривыми 1 и 3 на рис. 1, *b* показаны зависимости скорости электронов, полученные путем моделирования с использованием разработанного алгоритма и программы, использующей метод Монте – Карло, при концентрации электронов в слое графена $1,5 \cdot 10^{12}$ и $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно. При моделировании зависимостей скорости электронов, представленных кривыми 1 и 3 на рис. 1, *b*, а также других зависимостей, кроме оговоренных особо, использовалась специальная итерационная методика учета изменения температуры слоя графена и слоев BN. Суть этой методики заключалась в изменении температуры с учетом сравнения полученной при моделировании средней скорости электронов и аналогичного значения средней скорости электронов, которое получено экспериментально. Кривыми 2 и 4 на рис. 1, *b* показаны зависимости скорости электронов, полученные экспериментально [7], при концентрации электронов в слое графена $1,5 \cdot 10^{12}$ и $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Кривыми 5 и 6 на рис. 1, *b* показаны зависимости скорости электронов, полученные путем моделирования с использованием разработанного алгоритма и программы, использующей метод Монте – Карло, при концентрации электронов в слое графена $1,5 \cdot 10^{12}$ и $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно, но при этом предполагалось, что температура слоя графена и прилегающих слоев нитрида бора не изменялась и составляла величину 300 К.

Как видно из анализа кривых 1–4, представленных на рис. 1, *b*, наблюдается довольно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных при учете изменения температуры в рассмотренной структуре. С другой стороны, видно, что кривые 5 и 6, полученные без учета изменения температуры, значительно расходятся с экспериментальными данными, которые представлены кривыми 2 и 4 на рис. 1, *b*.

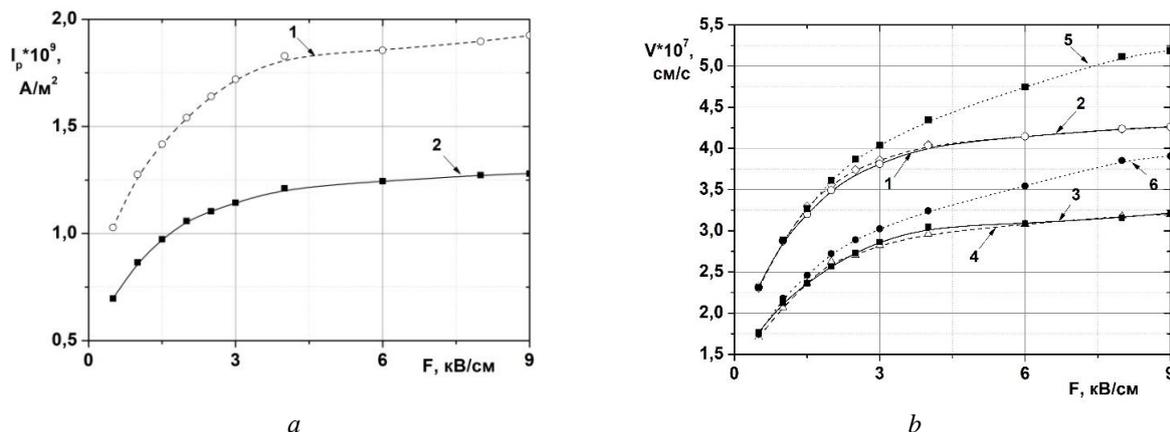


Рис. 1. Зависимости выходного тока (*a*) и средней дрейфовой скорости (*b*) от напряженности электрического поля

Fig. 1. Dependence of output current (*a*) and average drift velocity (*b*) on the electric field strength

На рис. 2, *a* показаны зависимости изменения температуры слоев графена и нитрида бора в полупроводниковой структуре от напряженности электрического поля при значениях концентрации электронов в слое графена $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2). Анализ этих зависимостей показывает, что с ростом напряженности электрического поля происходит увеличение температуры полупроводниковой структуры. Причем при небольших значениях

напряженности электрического поля наблюдается нелинейный, близкий к параболическому вид зависимостей изменения температуры (до значений напряженности, не превышающих приблизительно 2,5 кВ/см). При значительном увеличении напряженности электрического поля выше отмеченной величины наблюдаются квазилинейные зависимости.

На рис. 2, *b* представлены полученные путем моделирования зависимости подвижности электронов для описанной выше структуры при значениях концентрации электронов в слое графена $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2). Анализ этих зависимостей, выполненный с учетом формулы (3), показывает, что с ростом напряженности электрического поля происходит монотонное, нелинейное уменьшение подвижности электронов, что объясняется более существенным увеличением напряженности электрического поля по сравнению с ростом средней скорости электронов.

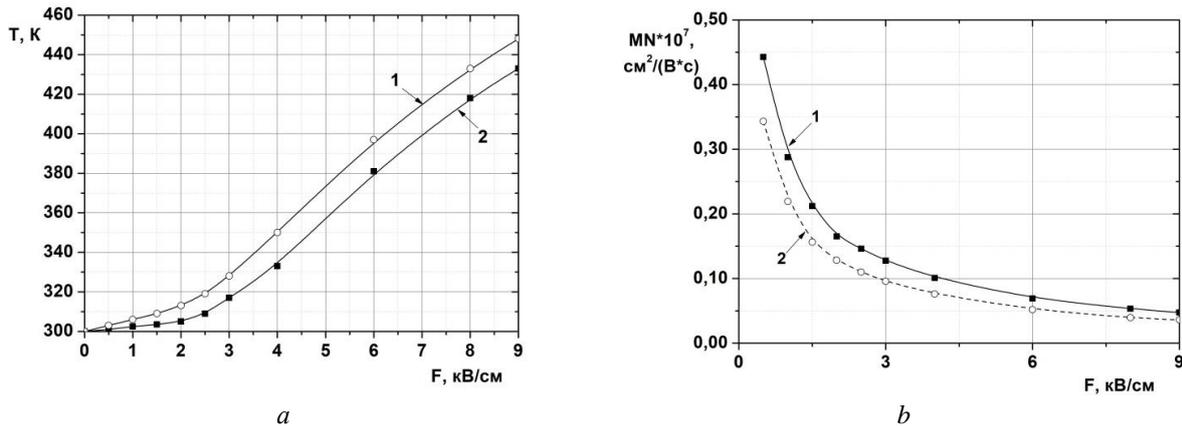


Рис. 2. Зависимости температуры слоев графена и нитрида бора (*a*), подвижности электронов (*b*) от напряженности электрического поля

Fig. 2. Dependence of the temperature of graphene and boron nitride layers (*a*), of the average speed of electrons in a single layer of graphene (*b*) on the electric field strength

Использование метода Монте – Карло позволяет исследовать процессы переноса носителей заряда не только для всей представленной структуры, но и в ряде ее выделенных областей. Особый интерес вызывают процессы переноса электронов в слое графена. С использованием этого подхода получены и показаны на рис. 3 зависимости средних значений энергии и дрейфовой скорости электронов для выделенного слоя графена, расположенного, как описано выше, между слоями из материала h-BN.

На рис. 3, *a* представлены полученные путем моделирования зависимости энергии электронов в одиночном слое графена, входящем в состав описанной выше структуры, при значениях концентрации электронов в слое графена $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2). Анализ этих зависимостей показывает, что с ростом напряженности электрического поля происходит увеличение энергии электронов в одиночном слое графена. Причем при небольших значениях напряженности электрического поля наблюдается нелинейный, параболический вид зависимостей изменения энергии электронов (до значений напряженности, не превышающих приблизительно 2,5 кВ/см). Такой ход зависимости можно трактовать влиянием окружающих слоев материала h-BN в процессе перехода электронов из этих слоев в слой графена и обратно. При значительном увеличении напряженности электрического поля, выше отмеченной величины, средняя энергия возрастает и наблюдаются квазилинейные зависимости, которые близки к зависимостям, описываемых уравнением (1). Анализ этих данных показывает, что здесь строгой линейной зависимости не наблюдается, что говорит о влиянии на слой графена окружающих его областей из материала h-BN, но это влияние становится слабее, чем при более низких значениях напряженности электрического поля.

На рис. 3, *b* представлены полученные путем моделирования зависимости средней скорости электронов в одиночном слое графена, входящем в состав описанной выше структуры, при значениях концентрации электронов в слое графена $3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 1) и $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2). Анализ этих зависимостей показывает, что с ростом напряженности электрического поля происходит монотонное квазилинейное увеличение средней скорости электронов в одиночном слое графена.

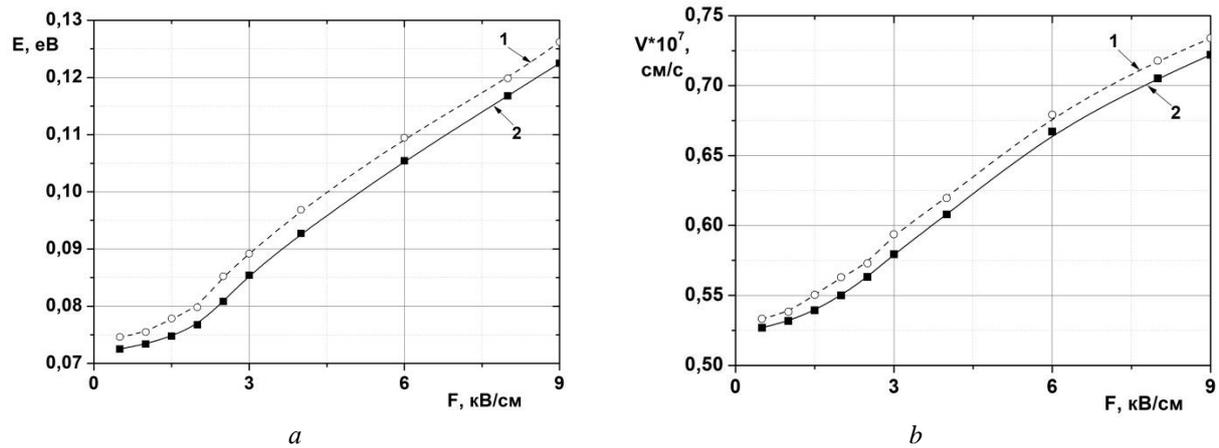


Рис. 3. Зависимости энергии электронов (а) и средней скорости электронов (b) в одиночном слое графена от напряженности электрического поля

Fig. 3. Dependence of the energy (a) and mobility of electrons (b) in a single layer of graphene on the electric field strength

Заключение

Представлены результаты моделирования процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре, содержащей графен и две области из гексагонального BN, с использованием метода Монте – Карло. В результате выполненных исследований были получены наиболее важные характеристики переноса электронов – зависимости средних значений скорости, энергии, подвижности от напряженности электрического поля. Моделирование процессов переноса электронов показало необходимость учета изменения температуры слоев графена и нитрида бора, что наблюдается с увеличением напряженности электрического поля. Анализ полученных зависимостей показал, что при небольших значениях напряженности электрического поля, которые не превышают величину, равную приблизительно 2,5 кВ/см, наблюдается нелинейное изменение температуры структуры. При более значительных значениях напряженности электрического поля наблюдается квазилинейное изменение температуры. Выполненные исследования процессов переноса электронов в слое графена показали на похожий характер изменения величины средней энергии электронов. Отмеченные выше особенности полученных характеристик можно трактовать как результат сложных процессов переноса носителей заряда в слоях графена и гексагонального BN, входящих в состав исследуемой структуры. Опираясь на полученные зависимости характеристик переноса электронов в исследованной структуре, создаются предпосылки применения метода Монте – Карло для определения выходных характеристик в многослойных полупроводниковых приборах, содержащих слои графена, гексагонального BN и других материалов.

Список литературы

1. Stolyarov M., Liu G., Shur M., Balandin A. Suppression of $1/f$ in near-ballistic h-BN-graphene-h-BN heterostructure field-effect transistors. *Applied Physics Letters*. 2015;107:023106. DOI.org/10.1063/1.4926872.
2. Lee K.H., Shin H.J., Lee J., Lee I.Y., Kim G.H., Choi J.Y., Kim S.W. Large-Scale Synthesis of High-Quality Hexagonal Boron Nitride Nanosheets for Large-Area Graphene Electronics. *Nano Letters*. 2012;12:714. DOI.org/10.1021/nl203635v.
3. Свинцов Д.А., Вьюрков В.В., Лукичев В.Ф., Буренков А., Охснер Р. Туннельные полевые транзисторы на основе графена. *Физика и техника полупроводников*. 2013;47(2):244-250.
4. Serov A.Y., Ong Z.-Y., Fischetti M.V., Pop E. Theoretical analysis of high-field transport in graphene on a substrate. *Journal of Applied Physics*. 2014;116:034507-1. DOI.org/10.1063/1.4884614.
5. Hockney R., Eastwood J. *Numerical simulation using particles*. М.; 1987.
6. Шур М. *Современные приборы на основе арсенида галлия*. Москва: Мир; 1991.

7. Yamoah M.A., Yang W., Pop E., Goldhaber-Gordon D. High Velocity in Graphene Encapsulated by Hexagonal Boron Nitride. *Nano*. 2017;11:9914-9919. DOI: 10.1021/acsnano.7b03878.
8. Wang J., Ma F., Sun M. A. Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications. *RSA Advances*. 2017;7:16801. DOI:10.1039/c7ra00260b.
9. *Properties of advanced semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*. Ed. by Levinshtin M.E., Romyantsev S.L., Shur M.S. New York: John Wiley&Sons; 2001.
10. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Интенсивности рассеивания носителей заряда в графене, расположенном на подложке из гексагонального нитрида бора. *Доклады БГУИР*. 2019;7-8(126): 141-148. DOI: <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-141-148>.
11. Муравьев В.В., Мищенко В.Н. Определение интенсивностей рассеивания электронов в одиночном слое графена. *Доклады БГУИР*. 2017;6(108):42-47.
12. Jyotsna C., Jing G. High-field transport and velocity saturation in graphene. *Appl. Phys. Letters*. 2009;95:023120. DOI.org/10.1063/1.3182740.
13. Tian F., Aniruddha K., Huili X., Debdeep J. High-field transport in two-dimensional graphene. *Physical Review*. 2011;B84:125450. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125450.

References

1. Stolyarov M., Liu G., Shur M., Balandin A. Suppression of 1/f in near-ballistic h-BN-graphene-h-BN heterostructure field-effect transistors. *Applied Physics Letters*. 2015;107:023106. DOI.org/10.1063/1.4926872.
2. Lee K.H., Shin H.J., Lee J., Lee I.Y., Kim G.H., Choi J.Y., Kim S.W. Large-Scale Synthesis of High-Quality Hexagonal Boron Nitride Nanosheets for Large-Area Graphene Electronics. *Nano Letters*. 2012;12:714. DOI.org/10.1021/nl203635v.
3. Svintsov D.A., Vyurkov V., Lukichev V.F., Orlikovsky A.A., Burenkov A., Ohsner R. [Tunneling field effect transistors based on graphene]. *Физика и техника полупроводников=Physics and Technology of Semiconductors*. 2013;47(2):224-250. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.115452. (In Russ.)
4. Serov A. Y., Ong Z.-Y., Fischetti M. V., Pop E. Theoretical analysis of high-field transport in graphene on a substrate. *Journal of Applied Physics*. 2014;116:034507-1. DOI.org/10.1063/1.4884614.
5. Hockney R., Eastwood J. *Numerical simulation using particles*. M; 1987.
6. Shur M. [*Sovremennye pribory na osnove arsenida gallija*]. Moscow: Mir; 1991. (in Russ.)
7. Yamoah M. A., Yang W., Pop E., Goldhaber-Gordon D. High Velocity in Graphene Encapsulated by Hexagonal Boron Nitride. *Nano*. 2017;11:9914-9919. DOI: 10.1021/acsnano.7b03878.
8. Wang J., Ma F., Sun M. A. Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications. *RSA Advances*. 2017;7:16801. DOI:10.1039/c7ra00260b.
9. *Properties of advanced semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*. Ed. by Levinshtin M.E., Romyantsev S.L., Shur M.S. New York: John Wiley&Sons; 2001.
10. Murav'ev V.V., Mishhenko V.N. [Intensivnosti rasseivaniya nositelei zariada v graphene, raspologennom na podlogke iz geksogonalnogo nitrida bora]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;7-8(126):141-148. DOI: <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-141-148>. (in Russ.)
11. Murav'ev V.V., Mishhenko V.N. [Opređenje intensivnostej rasseivaniya jelektronov v odinochnom sloe grafena avtorov]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;6(108):42-47. (in Russ.)
12. Jyotsna C., Jing G. High-field transport and velocity saturation in graphene. *Appl. Phys. Letters*. 2009;95:023120. DOI.org/10.1063/1.3182740.
13. Tian F., Aniruddha K., Huili X., Debdeep J. High-field transport in two-dimensional graphene. *Physical Review*. 2011;B84:125450. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125450.

Вклад авторов

Муравьев В.В. предложил идею проведения моделирования процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре, содержащей слой графена, расположенного между областями из гексагонального нитрида бора.

Мищенко В.Н. выполнил моделирование процессов переноса электронов в полупроводниковой структуре, содержащей слой графена, расположенного между областями из гексагонального нитрида бора.

Authors' contribution

Muravyov V.V. proposed the idea of simulating the transfer of electrons in a semiconductor structure containing a layer of graphene, located between the layers of boron nitride.

Mishchenko V.N. simulated electron transfer processes in a semiconductor structure containing a layer of graphene, located between the layers of boron nitride.

Сведения об авторах

Муравьев В.В., д.т.н., чл.-кор. Национальной академии наук Беларуси, профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мищенко В.Н. к.т.н., доцент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-394-55-58;
+375-17-293-80-70;
e-mail: mishchenko@bsuir.by
Мищенко Валерий Николаевич

Information about the authors

Muravyov V.V., D.Sci, Corr. mem. of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Mishchenka V.N. PhD, Associate Professor of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-394-55-58;
+375-17-293-80-70;
e-mail: mishchenko@bsuir.by
Mishchenka Valery Nickolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-79-86>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.78.014.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА УСТАНОВКЕ «УБТО 1801»

СОЛОВЬЁВ Я.А.¹, ПИЛИПЕНКО В.А.¹, ЯКОВЛЕВ В.П.²

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

²ООО «Перспективные инновационные технологии» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 14 октября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Настоящая работа посвящена установлению зависимости температуры нагрева кремниевой пластины при быстрой термической обработке на установке «УБТО 1801» облучением обратной стороны некогерентным потоком света постоянной плотности от мощности ламп и времени нагрева. В результате разработана математическая модель изменения температуры пластины на базе уравнения нестационарной теплопроводности и известных температурных зависимостей теплофизических свойств кремния и степени черноты алюминия и серебра, нанесенных на рабочую поверхность кремниевой пластины. Для экспериментального определения значений численных параметров математической модели кремниевые пластины нагревали единичным импульсом света постоянной мощности до температуры одного из трех фазовых переходов формирования эвтектики алюминий-кремний, плавления алюминия и плавления серебра. Время формирования фазового перехода на поверхности пластин в процессе быстрой термообработки фиксировали пирометрическим методом. В соответствии с разработанной математической моделью определен коэффициент преобразования электрической мощности ламп в плотность мощности светового потока, численное значение которого составило $5,16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. Изменение мощности ламп от 690 до 2740 Вт приводит к изменению температуры кремниевой пластины в процессе быстрой термической обработки от 550 до 930°К соответственно. При этом погрешность прогнозирования температуры пластины в соответствии с разработанной математической моделью составляет менее 2,3 %. Результаты работы могут быть использованы при разработке новых процессов быстрой термообработки кремниевых пластин.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, температура нагрева, математическое моделирование, фазовый переход.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы признательны Хлопкову Н.С., Гринцевичу Е.В., Сарычеву О.Э. за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Для цитирования. Соловьёв Я.А., Пилипенко В.А., Яковлев В.П. Моделирование нагрева кремниевых пластин при быстрой термической обработке на установке «УБТО 1801». Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 79-86.

SIMULATION OF SILICON WAFERS HEATING DURING RAPID THERMAL PROCESSING USING “UBTO 1801” UNIT

JAROSLAV A. SOLOVJOV¹, VLADIMIR A. PILIPENKO¹, VALERY P. YAKOVLEV²

¹JSC “INTEGRAL” – “NTEGRAL” holding managing company (Minsk, Republic of Belarus)

²LLC “Prospective innovation technologies” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 14 October 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The present work is devoted to determination of the dependence of the heating temperature of the silicon wafer on the lamps power and the heating time during rapid thermal processing using “UBTO 1801” unit by irradiating the wafer backside with an incoherent flow of constant density light. As a result, a mathematical model of silicon wafer temperature variation was developed on the basis of the equation of non-stationary thermal conductivity and known temperature dependencies of the thermophysical properties of silicon and the emissivity of aluminum and silver applied to the planar surface of the silicon wafer. For experimental determination of the numerical parameters of the mathematical model, silicon wafers were heated with light single pulse of constant power to the temperature of one of three phase transitions such as aluminum-silicon eutectic formation, aluminum melting and silver melting. The time of phase transition formation on the wafer surface during rapid thermal processing was fixed by pyrometric method. In accordance with the developed mathematical model, we determined the conversion coefficient of the lamps electric power to the light flux power density with the numerical value of $5.16 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$. Increasing the lamps power from 690 to 2740 W leads to an increase in the silicon wafer temperature during rapid thermal processing from 550° to 930°K, respectively. With that, the wafer temperature prediction error in compliance with developed mathematical model makes less than 2.3 %. The work results can be used when developing new procedures of rapid thermal processing for silicon wafers.

Keywords: : rapid thermal processing, heating temperature, mathematical simulation, phase transition.

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

Gratitude. The authors are grateful to Khlopkov N.S., Grintsevich E.V., Sarychev O.E. for the assistance in performing the experiment.

For citation. Solovjov J.A., Pilipenko V.A., Yakovlev V.P. Simulation of silicon wafers heating during rapid thermal processing using “UBTO 1801” unit. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 79-86.

Введение

Быстрая термическая обработка (БТО) кремниевых пластин является одной из ключевых операций в полупроводниковой технологии, значение которой возрастает одновременно с уменьшением размеров элементов интегральных схем [1]. Преимущества БТО перед стационарными тепловыми обработками реализуются благодаря исключительно чистым условиям выполнения процесса в реакторе ограниченного объема, а также минимальному термальному бюджету технологических процессов. Самым распространенным способом БТО является нагрев пластин до заданной температуры некогерентным световым излучением кварцевых галогенных ламп импульсами секундной длительности, который реализует режим теплового баланса, т. е. обеспечивается однородное распределение температуры по объему пластины [2]. Однако в процессе обработки кремниевых пластин с приборными структурами на рабочей стороне формируются слои с различными коэффициентами поглощения и отражения светового потока. Кроме того, механизм поглощения светового излучения кремнием определяется его типом проводимости и уровнем легирования, что создает дополнительные неоднородности поглощения светового потока [3]. Наличие различного рода оптических неоднородностей в процессе БТО облучением с рабочей стороны кремниевой пластины

приводит к возникновению градиентов температуры между ними, а значит, к образованию различных структурных дефектов в кремнии, растрескиванию и отслаиванию пленок диэлектриков и металлов, вызывая полную деградацию формируемых полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Для исключения данных явлений БТО целесообразно проводить с нерабочей стороны пластины, поскольку в этом случае имеет место облучение оптически однородной поверхности и разброс по площади пластины будет определяться только геометрическими размерами камеры [4]. Схема БТО путем облучения кремниевых пластин с обратной стороны некогерентным световым потоком кварцевых галогенных ламп реализована в установке «УБТО 1801», в которой нагрев пластин осуществляется световым импульсом прямоугольной формы с задаваемой мощностью и длительностью. При этом за счет конструктивных параметров камеры неравномерность нагрева пластины не превышает 0,4 %. В процессе БТО контроль температуры рабочей стороны пластины осуществляется с помощью пирометра «Термоскоп-600-1С» и платино-родиевой термопары ТП-0188/2-1-ПП(S) [5].

Однако как термопарный, так и пирометрический контроль температуры поверхности кремниевых пластин при БТО в данных условиях нагрева имеют соответствующие ограничения. На показания термопары существенное влияние оказывает искажение температурного поля пластины в зоне их контакта [6], а также ее тепловая инерция [7]. Пирометрический контроль ограничен нижним порогом чувствительности пирометра, необходимостью учета степени черноты контролируемой поверхности пластины, определяемой материалом покрытия и температурной зависимостью степени его черноты, а также фазовыми изменениями в материале покрытия, также приводящими к скачкообразному изменению его степени черноты [1, 7].

Таким образом, с целью улучшения управляемости процесса нагрева БТО кремниевых пластин в части обеспечения заданных температурно-временных режимов, а также точности контроля температуры поверхности пластины необходимо установить зависимость температуры пластины от электрической мощности ламп и времени процесса.

Настоящая работа посвящена установлению зависимости температуры нагрева кремниевой пластины при БТО на установке «УБТО 1801» облучением обратной стороны некогерентным потоком света постоянной плотности от мощности ламп и времени нагрева.

Постановка задачи

Для процесса нагрева высоколегированной кремниевой пластины световыми импульсами в режиме теплового баланса справедливы следующие допущения [2]:

- температура равномерно распределена по объему пластины;
- тепло выделяется в тонком приповерхностном слое;
- пластина теплоизолирована от подложкодержателя;
- имеют место тепловые потери от поверхности пластины;
- мощность светового импульса постоянна во времени,
- для расчета распространения тепла использовались закономерности нестационарной теплопроводности.

Для данных допущений зависимость температуры кремниевой пластины при БТО описывается уравнением теплопроводности [1, 2]:

$$\rho ch \frac{dT}{dt} = (1 - R) \eta_{el} P_{el} - 2\varepsilon_{Si} \sigma (T^4 - T_{amb}^4), \quad (1)$$

где ρ – плотность кремния, $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$; c – удельная теплоемкость кремния, $\text{Дж}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$; h – толщина кремниевой пластины, см ; T – температура пластины, К ; t – время нагрева, с ; R – коэффициент отражения инфракрасного (ИК) излучения ламп от поверхности нагреваемой пластины, являющийся постоянным и равный 0,3; P_{el} – электрическая мощность ИК ламп, Вт ; η_{el} – коэффициент преобразования электрической мощности ламп нагрева в плотность мощности светового потока, см^2 ; ε_{Si} – степень черноты кремния, являющаяся постоянной и равная 0,7; σ – постоянная Стефана–Больцмана, равная $5,67\cdot 10^{-12}$, $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$; T_{amb} – температура стенок камеры, К .

Таким образом, для математического моделирования температуры нагрева пластины должно быть установлено численное значение параметра η_{el} .

Методика проведения эксперимента

С целью определения температуры пластины использовали известные температуры фазовых переходов: образование эвтектики алюминий-кремний – 850,2 К, плавление алюминия – 933,5 К и плавление серебра – 1235,1 К. Для этого на рабочую сторону высоколегированной пластины марки КЭМ 0,003 (111) толщиной 460 ± 10 мкм с полированной и шлифовано-травленной обратной стороной наносили тонкие пленки алюминия и серебра. Во избежание формирования эвтектики алюминий-кремний при получении точки плавления алюминия перед его нанесением на рабочей поверхности кремниевой пластины формировали слой SiO_2 толщиной порядка 0,1 мкм.

Далее пластины нагревали в камере установки «УБТО 1801» при заданной мощности ИК ламп. Величину мощности ламп подбирали таким образом, чтобы время нагрева до фазового перехода не превышало 40 с. Момент фазового перехода фиксировался по изменению показаний пирометра. Численные значения потребляемой мощности ИК ламп и показаний пирометра «Термоскоп-600-1С» фиксировали системой управления установкой с дискретностью времени $\Delta t = 96$ мс.

Численное интегрирование уравнения (1) с учетом материала покрытия рабочей стороны пластины выполняли в соответствии с выражением

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\left[(1-R)\eta_{el}P_{el} - (\varepsilon_{Si} + \varepsilon_{Me}(T_{i-1}))\sigma(T_{i-1}^4 - T_{amb}^4) \right] \Delta t}{\rho(T_{i-1})c(T_{i-1})h}, \quad (2)$$

где T_0 – начальная температура пластины; n – количество интервалов нагрева длительностью Δt ; ε_{Me} – степень черноты материала покрытия рабочей стороны пластины. Величину начальной температуры пластины T_0 контролировали штатной термопарой ТП-0188/2-1-ПП(S), температуру стенок камеры T_{amb} принимали равной температуре охлаждающей воды на выходе и контролировали встроенным датчиком типа ДТС 054-Pt100.B2.60/0,2.

Численное значение плотности кремния при изменении температуры рассчитывали по общепринятой формуле

$$\rho(T) = \rho_0 \left[1 - 3\alpha(T)(T - T_0) \right], \quad (3)$$

где $\rho_0 = 2,33$, г·см⁻³ – плотность кремния при температуре T_0 ; $\alpha(T)$ – зависимость термического коэффициента линейного расширения кремния от температуры пластины.

Величину $\alpha(T)$, в свою очередь, определяли на основании справочных данных [8] в диапазоне температур от 300 до 1400 К и аппроксимировали полиномом четвертой степени:

$$\alpha(T) = -4,29 \cdot 10^{-19} T^4 + 1,6 \cdot 10^{-14} T^3 - 2,21 \cdot 10^{-11} T^2 + 1,56 \cdot 10^{-8} T - 5,91 \cdot 10^{-7}. \quad (4)$$

Зависимость $c(T)$ в диапазоне температур от 300 до 1400 К определяли на основании справочных данных [8] и аппроксимировали полиномом четвертой степени:

$$c(T) = -8,62 \cdot 10^{-13} T^4 + 3,41 \cdot 10^{-9} T^3 - 4,85 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,10 \cdot 10^{-3} T + 1,32 \cdot 10^{-1}. \quad (5)$$

Для алюминиевого покрытия рабочей стороны пластины численное значение $\varepsilon_{Me}(T)$ на основании справочных данных [9] определяли из выражения

$$\varepsilon_{Me}(T) = 5,14 \cdot 10^{-5} T + 1,31 \cdot 10^{-2}. \quad (6)$$

В случае покрытия рабочей стороны пластины из серебра величину $\varepsilon_{Me}(T)$ на основании справочных данных [9] определяли по формуле

$$\varepsilon_{Me}(T) = 2,50 \cdot 10^{-5} T + 7,42 \cdot 10^{-2}. \quad (7)$$

Решение уравнения (2) относительно параметра η_{el} осуществляли итерационным методом путем подстановки вместо параметра T известной температуры соответствующего фазового перехода материала покрытия рабочей стороны кремниевой пластины, а вместо параметра n – номера интервала нагрева, после которого был зафиксирован фазовый переход.

Результаты и их обсуждение

Анализ динамики нагрева пластин в зависимости от электрической мощности ИК ламп (табл. 1, рис. 1, *a – f*) показывает, что в диапазоне средней потребляемой мощности от 690 до 2740 Вт происходит нагрев пластин на величину от 550 до 930 К соответственно. При этом по показаниям пирометра «Термоскоп-600-1С» (рис. 1, *a – f*) четко фиксируется момент начала фазового перехода. Средняя величина параметра η_{el} составила $5,16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. Следовательно, в исследуемом диапазоне условий проведения процесса БТО ее максимальный разброс не превышает $\pm 4,0 \%$, что может быть обусловлено дисперсией коэффициента отражения нерабочей поверхности пластины, колебаниями мощности нагрева, а также незначительными отклонениями от расчетных значений степени черноты кремния и покрытий, связанных с состоянием поверхности. Полученная величина разброса параметра η_{el} , в свою очередь, приводит к погрешности прогнозирования температуры пластины. Соответствующие расчеты согласно формуле (2) показывают, что при нагреве пластины на 550 К погрешность не превышает 2,3 %, а при нагреве пластины на 930 К – не превышает 2,0 %.

Таблица 1. Результаты расчета параметра η_{el}
Table 1. Results of η_{el} parameter calculation

Температура фазового перехода, К Phase transition temperature, K	Тип обратной стороны пластины Wafer backside type	Средняя электрическая мощность ИК ламп, Вт Average electric power of IR lamps, W	Время нагрева, с Heating time, s	Значение параметра η_{el} , 10^{-3} см^2 Value of η_{el} parameter, 10^{-3} см^2
850,2	полированная (polished)	690,6	34,176	4,93
	шлифовано-травленная (rough)	694,7	39,168	5,04
933,5	полированная (polished)	1015,0	24,384	5,18
	шлифовано-травленная (rough)	1014,6	24,384	5,06
1235,1	полированная (polished)	2579,4	16,320	5,40
	шлифовано-травленная (rough)	2577,3	16,320	5,36

Таким образом, для численного расчета температуры нагрева БТО высоколегированной кремниевой пластины без покрытий на установке «УБТО 1801» целесообразно использовать следующую формулу:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[5,16 \cdot 10^{-3} (1 - R) P_{el} - 2\varepsilon_{Si} \sigma (T_{i-1}^4 - T_{amb}^4)] \Delta t}{\rho(T_{i-1}) c(T_{i-1}) h} \quad (8)$$

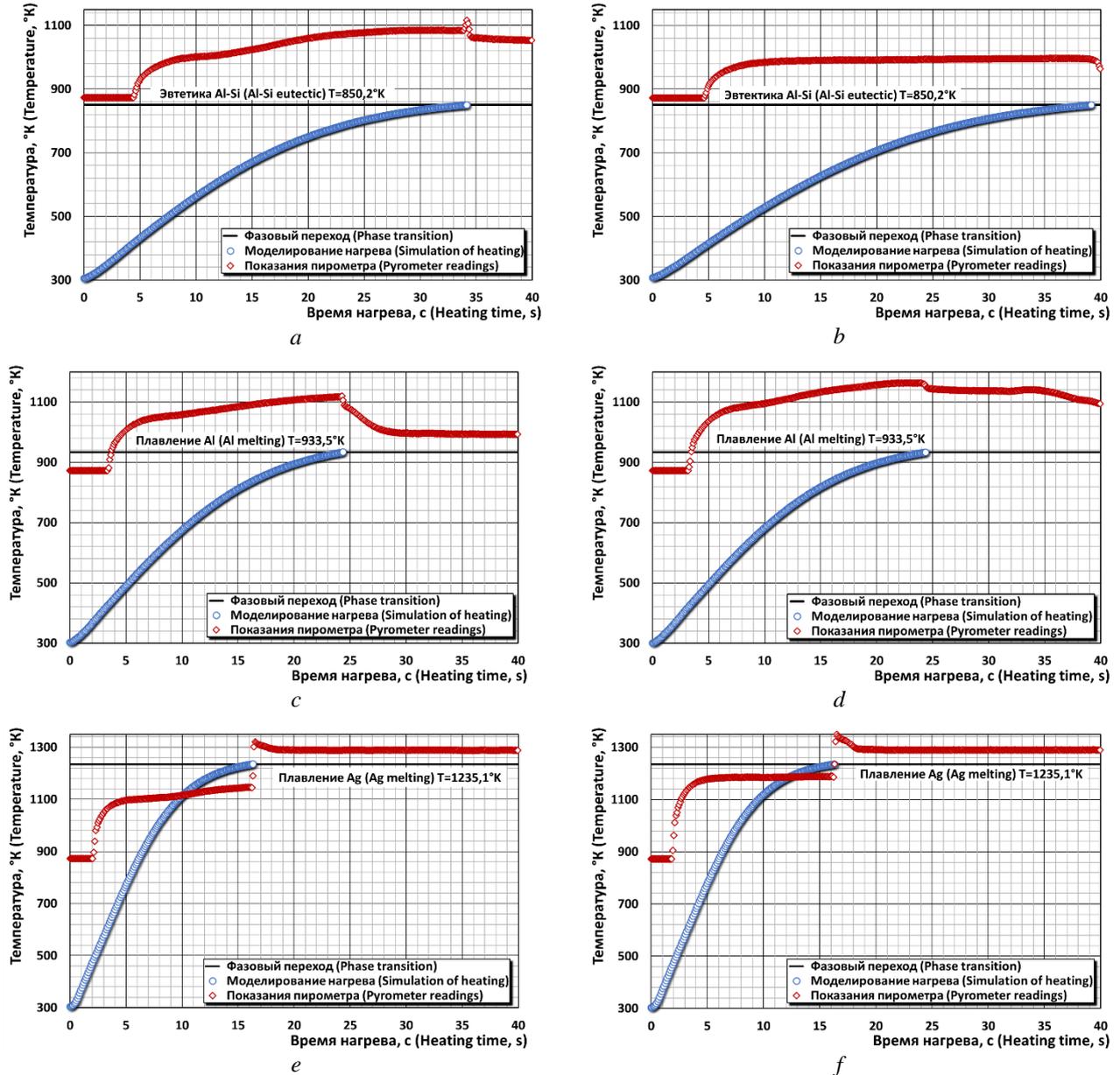


Рис. 1. Результаты моделирования нагрева пластин БТО до температуры фазового перехода:
a, b – эвтектика Al-Si; *c, d* – плавление Al; *e, f* – плавление Ag; *a, c, e* – полированная обратная сторона;
b, d, f – шлифовано-травленная обратная сторона
Fig. 1. Simulation results for wafers RTP heating up to phase transition temperature: *a, b* – Al-Si eutectic;
c, d – Al melting; *e, f* – Ag melting; *a, c, e* – polished backside; *b, d, f* – rough backside

Для численного расчета температуры нагрева БТО высоколегированной кремниевой пластины с покрытием рабочей стороны справедлива формула (2) с использованием установленного численного значения параметра η_{el} :

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[5,16 \cdot 10^{-3} (1-R) P_{el} - (\varepsilon_{Si} + \varepsilon_{Me} (T_{i-1})) \sigma (T_{i-1}^4 - T_{amb}^4)] \Delta t}{\rho(T_{i-1}) c(T_{i-1}) h} \quad (9)$$

Заклучение

Установлены закономерности изменения температуры высоколегированной кремниевой пластины при БТО облучением обратной стороны некогерентным потоком света кварцевых галогенных ламп от мощности ИК ламп и времени нагрева в установке «УБТО 1801».

Путем фиксации пирометрическим методом времени нагрева пластины до температур фазовых переходов эвтектики Al-Si, плавления Al и плавления Ag при БТО импульсом постоянной мощности на базе уравнения нестационарной теплопроводности и известных температурных зависимостей степени черноты алюминия и серебра определен коэффициент преобразования электрической мощности ИК ламп в плотность мощности светового потока, численное значение которого составило $5,16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}$. При изменении температуры кремниевой пластины в процессе БТО в диапазоне от 550 до 930 К погрешность ее прогнозирования в соответствии с разработанной математической моделью составляет менее 2,3 %.

Результаты работы могут быть использованы при разработке новых процессов БТО кремниевых пластин.

Список литературы

1. Doering R., Nishi Y. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2nd edition.* New York: CRC Press; 2008.
2. Пилипенко В.А. *Быстрые термообработки в технологии СБИС.* Минск: Изд. Центр БГУ; 2004.
3. Nesmelova I.M., Astaf'ev N.I., Kulakova N.A. The optical properties of single-crystal silicon in the 3–5- μm region. *Journal of Optical technology.* 2012;79(3):191-193. DOI:10.1364/jot.79.00019.
4. Достанко А.П., Аваков С.М., Голосов Д.А., Емельянов В.В., Завадский С.М., Колос В.В., Ланин В.Л., Мадвейко С.И., Мельников С.Н., Никитюк Ю.В., Петлицкий А.Н., Петухов И.Б., Пилипенко В.А., Плебанович В.И., Солодуха В.А., Соколов С.И., Телеш Е.В., Шершнева Е.Б. *Инновационные технологии и оборудование микроэлектронного производства.* Минск: Беларуская навука; 2020.
5. Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Яковлев В.П. Роботизированная установка быстрой термической обработки для создания изделий электронной техники. *Доклады БГУИР.* 2019;17(4):92-97.
6. Резников А.Н., Резников Л.А. *Тепловые процессы в технологических системах.* С.-Петербург: Лань, 2016.
7. Rozenboom F. *Advanced in Rapid Thermal and Integrated Processing.* Springer Netherlands; 1996.
8. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. *Теплофизические свойства компонентов горючих систем.* Москва: НПО «Информ ТЭИ»; 1992.
9. Avallone E.A., Baumeister T., Sadegh A.M. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 11th edition.* New York: McGraw-Hill; 2007.

References

1. Doering R., Nishi Y. *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2nd edition.* New York: CRC Press; 2008.
2. Pilipenko V.A. [Bystrye termoobrabotki v tehnologii SBIS]. Minsk: Izd. centr BGU; 2004. (In Russ.)
3. Nesmelova I.M., Astaf'ev N.I., Kulakova N.A. The optical properties of single-crystal silicon in the 3–5- μm region. *Journal of Optical technology.* 2012;79(3):191-193. DOI:10.1364/jot.79.00019.
4. Dostanko A.P., Avakov S.M., Golosov D.A., Emel'yanov V.V., Zavadsky S.M., Kolos V.V., Lanin V.L., Madveyko S.I., Mel'nikov S.N., Nikityuk Y.V., Petlitsky A.N., Petukhov I.B., Pilipenko V.A., Plebanovich V.I., Solodukha V.A., Sokolov S.I., Telesh E.V., Shershnev E.B. [Innovatsionnye tehnologii i oborudovanie mikroelektronnogo proizvodstva]. Minsk: Belarusskaya navuka; 2020. (In Russ.)
5. Solodukha V.A., Pilipenko V.A., Yakovlev V.P. [Rapid thermal treatment robotics unit for creation of electronic equipment devices]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2019;17(4):92-97. (In Russ.)
6. Reznikov A.N., Reznikov L.A. [Teplovye protsessy v tehnologicheskikh sistemah]. St.-Petersburg: Lan', 2016. (In Russ.)
7. Rozenboom F. *Advanced in Rapid Thermal and Integrated Processing.* Springer Netherlands; 1996.
8. Sheludjak Y.E., Kashporov L.Y., Malinin L.A., Tsalkov V.N. [Teplofizicheskie svoystva komponentov gorjuchih system]. Moscow: NPO "Iform TEI"; 1992. (In Russ.)
9. Avallone E.A., Baumeister T., Sadegh A.M. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 11th edition.* New York: McGraw-Hill; 2007.

Вклад авторов

Соловьёв Я.А. осуществил постановку задачи, выполнил анализ и интерпретацию результатов.

Пилипенко В.А. выполнил анализ и интерпретацию результатов.

Яковлев В.П. осуществил проведение эксперимента.

Authors' contribution

Solovjov J.A. carried out the statement of the problem, fulfilled the analysis and interpreted the results.

Pilipenko V.A. fulfilled the analysis and interpreted the results.

Yakovlev V.P. carried out the experiment.

Сведения об авторах

Соловьёв Я.А., к.т.н., доцент, заместитель директора Филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, чл.-кор. Национальной академии наук Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикро-анализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Яковлев В.П., к.т.н., директор ООО «Перспективные инновационные технологии».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Корженевского, 16,
Филиал «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
тел. +375-17-212-21-21;
e-mail: jsolovjov@integral.by
Соловьёв Ярослав Александрович

Information about the authors

Solovjov J.A., PhD, Associate Professor, Deputy director of “Transistor” Branch JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company.

Pilipenko V.A., D.Sci, Professor, Corr. mem. of the National Academy of Sciences of Belarus, Deputy director of Science Development of State Center “Belmicroanalysis”, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company.

Yakovlev V.P., PhD, Director of LLC “Prospective innovation technologies”.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo str., 16,
“Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL” –
“INTEGRAL” holding managing company
tel. +375-17-212-21-21;
e-mail: jsolovjov@integral.by
Solovjov Jaroslav Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-87-95>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.18

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА КВАЗИДВУМЕРНЫХ ХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ С НИЗКОРАЗМЕРНЫМ МАГНЕТИЗМОМ

БАРАНОВА М.С., ПРОСКУРОВА П.А.

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

Поступила в редакцию 20 октября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Поиск физических фундаментальных закономерностей, приводящих к устойчивому высокотемпературному ферромагнетизму, является актуальной задачей. Кроме уже синтезированных двумерных материалов, остается широкий перечень возможных структур, стабильность которых предсказана теоретически. В статье представлены результаты изучения электронных свойств соединений на основе халькогенидов переходных металлов MAX_3 ($M = Cr, Fe, A = Ge, Si, X = S, Se, Te$) с наноструктурированным магнетизмом. Исследования проводились с помощью квантово-механического моделирования в специализированном программном комплексе VASP, а также расчетов в рамках модели Гейзенберга. Определены основные магнитные состояния двумерных MAX_3 и соответствующие им зонные энергетические структуры. Установлено, что среди изучаемых систем наноразмерным ферромагнетиком является $CrGeTe_3$. Кроме того, данное соединение является полупроводником с шириной запрещенной зоны равной 0,35 эВ. Остальные материалы являются антиферромагнетиками. Весь магнитный момент в MAX_3 локализован на атомах переходного металла, в частности, на d -орбитали атома переходного металла (и лишь незначительная часть – на p -орбитали халькогена). Для $CrGeTe_3$ проведены расчеты интеграла обменного взаимодействия. Установлены вероятностные механизмы формирования магнитного порядка. Согласно полученным интегралам обменного взаимодействия, в плоскости полупроводника формируется строгий ферромагнитный порядок. Распределение парциальной плотности электронных состояний указывает на гибридизацию между d -орбиталью атома переходного металла и p -орбиталью халькогена. Определено, что более вероятностным является обменное взаимодействие по механизму суперобмена.

Ключевые слова: ab initio моделирование, теория функционала плотности, наноразмерный магнетизм, ферромагнетизм.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Представленные результаты получены в рамках выполнения задач по заданию 2.87 ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», а также по договору с БРФФИ Ф20В-008.

Для цитирования. Баранова М.С., Проскурова П.А. Электронные свойства квазидвумерных халькогенидов переходных металлов с низкоразмерным магнетизмом. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 87-95.

ELECTRONIC PROPERTIES OF QUASI TWO-DIMENSIONAL TRANSITION METALS CHALCOGENIDES WITH LOW-DIMENSIONAL MAGNETISM

MARYIA S. BARANAVA, PALINA A. PRASKURAVA

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

Submitted 20 October 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The search for fundamental physical laws which lead to stable high-temperature ferromagnetism is an urgent task. In addition to the already synthesized two-dimensional materials, there remains a wide list of possible structures, the stability of which is predicted theoretically. The article suggests the results of studying the electronic properties of MAX_3 ($M = Cr, Fe, A = Ge, Si, X = S, Se, Te$) transition metals based compounds with nanostructured magnetism. The research was carried out using quantum mechanical simulation in specialized VASP software and calculations within the Heisenberg model. The ground magnetic states of two-dimensional MAX_3 and the corresponding energy band structures are determined. We found that among the systems under study, $CrGeTe_3$ is a semiconductor nanosized ferromagnet. In addition, one is a semiconductor with a bandgap of 0.35 eV. Other materials are antiferromagnetic. The magnetic moment in MAX_3 is localized on the transition metal atoms: in particular, the main one on the d -orbital of the transition metal atom (and only a small part on the p -orbital of the chalcogen). For $CrGeTe_3$, the exchange interaction integral is calculated. The mechanisms of the formation of magnetic order was established. According to the obtained exchange interaction integrals, a strong ferromagnetic order is formed in the semiconductor plane. The distribution of the projection density of electronic states indicates hybridization between the d -orbital of the transition metal atom and the p -orbital of the chalcogen. The study revealed that the exchange interaction by the mechanism of superexchange is more probabilistic.

Keywords: ab initio simulation, density functional theory, nanoscale magnetism, ferromagnetism.

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

Gratitude. The presented results were obtained within the framework of Assignment 2.87 of the GPSR “Physical Materials Science, Novel Materials and Technologies” and BRFFR Contract Ф20B-008.

For citation. Baranava M.S., Praskurava P.A. Electronic properties of quasi two-dimensional transition metals chalcogenides with low-dimensional magnetism. Doklady BGUIR. 2020; 2020; 18(7): 87-95.

Введение

Упорядоченное расположение магнитных моментов в макроскопических масштабах обуславливает наличие магнитного порядка [1]. В большинстве случаев результатом взаимодействия соседних электронов (обменное взаимодействие) является противоположная направленность спинов, поскольку такое положение энергетически выгодно. Однако в некоторых случаях спины свободных электронов не уравниваются в противоположных направлениях при относительно малых термических флуктуациях. Таким образом, до определенной температуры (температуры Кюри – T_c) локальный порядок может распространяться на макроскопические масштабы. Выше T_c тепловые флуктуации имеют тенденцию смещать магнитные моменты в соседних областях, в результате дальний порядок разрушается [2].

В трехмерной системе при конечной T_c всегда происходит магнитный фазовый переход, в то время как в двумерных системах, когда размерность спина равна трем (изотропная модель Гейзенберга), тепловые флуктуации разрушают дальний магнитный порядок при любой конечной температуре согласно теореме Мермина – Вагнера – Хоэнберга [3]. Иными словами, при ограничении размерности (двумерные и одномерные системы) дальний магнитный порядок, в большинстве случаев, возможен только при $T = 0$ либо вовсе отсутствует. Причиной является

то, что непрерывная симметрия изотропной модели Гейзенберга возбуждает спиновые волны. Спиновые волны имеют конечную плотность состояний в системах с ограниченной размерностью, в связи с чем они достаточно легко возбуждаются. Однако двумерная модель Изинга – Ленца [4] показывает, что в магнитных системах с ограниченной размерностью фазовый переход при конечной температуре возможен. Качественное отличие моделей заключается в учете магнитной анизотропии. Энергетическое преимущество одной из составляющих спинового момента приводит к подавлению тепловых флуктуаций (открывает разрыв в спектре спиновых волн).

В [5] утверждается, что все экспериментально обнаруженные полупроводниковые ферромагнетики до 2014 года были получены только в объемной форме. Предложено много механизмов формирования низкоразмерного [6, 7] ферромагнетизма. В результате однослойный ферромагнетизм был реализован в различных структурах [8–11]. Однако нет двумерных материалов, которые бы проявляли ферромагнетизм при комнатной температуре. Повторим, что в двумерных системах магнитный порядок дальнего действия подавляется термическими флуктуациями, однако эти флуктуации *могут быть нейтрализованы сильной магнитной анизотропией*. Основное правило при проектировании двумерных ферромагнетиков заключается в усилении обменного взаимодействия и одноосной магнитной анизотропии.

В структурах MAX_3 , образованных из слоистых кристаллов халькогенидов переходных металлов, при двумерном ограничении возникает магнитный порядок дальнего действия. Более того, в данном классе материалов был зарегистрирован ферромагнетизм.

Одними из первых двумерных ферромагнитных кристаллов можно считать соединения на основе хрома: $CrGeTe_3$ и CrI_3 [10–11]. $CrGeTe_3$ представляет собой двумерный гейзенберговский ферромагнетик с небольшой магнитной анизотропией (т. е. спиновые моменты могут быть ориентированы во всех направлениях с малой разностью энергии), тогда как CrI_3 является двумерным антиферромагнетиком изинговского типа (т. е. спиновые моменты ориентированы вдоль кристаллографического направления c , возможен внутрислойный ферромагнетизм и межслойный антиферромагнетизм). В [12] представлены результаты моделирования $CrGeTe_3$. Установлено, что соединение имеет ферромагнитный порядок с упорядоченными вдоль направления c спинами. Предсказано, что магнитный порядок сохраняется до температуры 65 К. В [13, 14] экспериментально обнаружен ферромагнетизм в нескольких слоях $CrSiTe_3$ и $CrGeTe_3$. Также продемонстрировано, что магнетизм в двумерных и трехмерных структурных модификациях может быть описан моделью Гейзенберга [12, 15].

Таким образом, халькогениды переходных металлов MAX_3 ($M = Cr, Fe, A = Si, Ge, X = S, Se, Te$) проявляют собственный ферромагнетизм. Данный класс материалов лишен некоторых недостатков другого типа ферромагнетиков – разбавленных магнитных полупроводников (РМП). Преимущество MAX_3 по сравнению с РМП заключается в высокой концентрации атомов переходных металлов (отсутствует ограничение по растворимости), меньшем количестве неконтролируемых дефектов (из-за отсутствия примеси).

Объемный кристалл MAX_3 состоит из слоев, которые связаны посредством слабых сил Ван-дер-Ваальса. Данная особенность материала позволяет синтезировать энергетически стабильные квазидвумерные структуры путем механического отшелушивания. В [5] с помощью расчетов фононного спектра подтверждается стабильность двумерных $CrSiTe_3$, $CrGeTe_3$ и Fe_3GeTe_2 . В работе утверждается, что однослойные материалы не были синтезированы ранее. Стабильность двумерных структур MAX_3 также была подтверждена с помощью расчетов фононных свойств в [16].

Изучение структурных, электронных и магнитных свойств позволит выделить в отдельный ряд перспективные структурные модификации MAX_3 для дальнейшего синтеза и экспериментального изучения.

Методика проведения моделирования

Теория функционала электронной плотности (density-functional theory – DFT) [17] является фундаментальной базой для многих квантово-механических методов моделирования электронных и магнитных свойств [18]. Основным источником ошибок DFT-моделирования заключается в неточном учете корреляционной энергии, которая является одним из слагаемых,

составляющих полную энергию системы. В большей степени это проявляется в материалах с локализованными (узкими) зонами (d -электронами) из-за увеличения доли данной составляющей в энергетической характеристике системы. Самым распространенным способом, помогающим нейтрализовать данный недостаток моделирования, является приближение локальной спиновой плотности (local spin-density approximation) (LSDA+U), которое было использовано в данной работе.

Моделирование любой системы проводилось с предварительной ионной релаксацией с учетом спиновой поляризации. Далее осуществлялись статические самосогласованные расчеты для определения электронных свойств. Моделирование зонных энергетических систем проводилось как для объемных модификаций, так и для двумерных систем в их основном квантовом состоянии. Результаты расчетов основного квантового состояния включали в себя, в том числе, определение основного магнитного порядка. Для двумерных систем энергетические зонные диаграммы получены по контуру М-К-Г-К-М обратного пространства зоны Бриллюэна.

Результаты и их обсуждение

Основными входными данными при квантово-механическом моделировании являются структурное и геометрическое описание моделируемых систем, а также псевдопотенциалы для каждого типа ионов, составляющих изучаемые соединения. Элементарные ячейки объемных MAx_3 состоят из трех слоев, связанных слабыми силами Ван-дер-Ваальса, с АВ стыковкой. Для дальнейшего изучения двумерных модификаций достаточно извлечь первичную информацию о геометрических и структурных свойствах одного из слоев, при этом данные о базисных векторах a и b сохраняются. Кристаллическая структура одного из представителей MAx_3 – $CrGeTe_3$ представлена на рис. 1. Вектор c должен быть увеличен для формирования зазора (вакуумного промежутка) между слоями, который не позволит соседним слоям оказывать энергетическое влияние друг на друга. Данное влияние возникает из-за применяемого в расчетной среде принципа периодичности, а описанный выше подход является общепринятым и множество раз применялся исследователями в целях изучения наноструктурированных материалов.

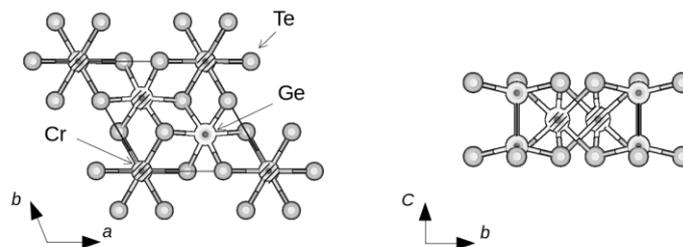


Рис. 1. Кристаллическая структура $CrGeTe_3$
Fig. 1. Crystal structure of $CrGeTe_3$

Все элементарные ячейки проходили стадию структурной релаксации. Оптимизация векторов ячейки и атомных позиций на предварительном этапе проводилась для объемных модификаций без учета спиновой поляризации. Для двумерных ячеек проводилась оптимизация атомных позиций для всех магнитных конфигураций (т. е. с учетом спиновой поляризации). При этом оптимизация векторов ячейки двумерных структур была запрещена, поскольку в противном случае может произойти схлопывание или сжатие вакуумного слоя. Подобный прием применялся авторами ранее, а также был представлен в других исследовательских работах [19].

Результаты расчетов для соединений, данные которых представлены в литературных источниках, находятся в хорошем согласии. В настоящих расчетах для $CrGeTe_3$ были получены следующие постоянные решетки: $a=b=6,85$ Å, $c=21,60$ Å, в то время как экспериментальные значения для $CrGeTe_3$ – $a=b=6,80$ Å, $c=20,37$ Å при 5 К. Для $CrSiTe_3$ в настоящей работе $a=b=6,64$ Å, $c=21,88$ Å; в литературном источнике $a=b=6,77$ Å, $c=20,53$ Å при 1,2 К [5].

CrGeTe₃, как и его кремниевый аналог, является слоистым материалом с АВ гексагональной плотной упаковкой атомов теллура.

С помощью моделирования магнитных свойств определен предпочтительный магнитный порядок, формируемый в каждой двумерной структуре. Для этого были созданы суперячейки размерностью 2×2×1. Для каждого иона переходного металла заданы ориентации магнитного момента (спина). Таким образом, были сформированы три магнитные структуры, одна из которых имела ферромагнитный порядок (ФМ), две другие антиферромагнитный (АФМ1 и АФМ2) (рис. 2). Для всех конфигураций проведены структурные оптимизации. Далее выполнялись статические самосогласованные расчеты. Конечной целью данного моделирования являлось определение значений полной энергии изучаемых систем.

Полученные данные использовались для анализа предпочтительного магнитного порядка в каждой системе. Наиболее вероятное магнитное состояние должно обладать самым низким значением энергии. В табл. 1 представлены данные о формируемых магнитных порядках.

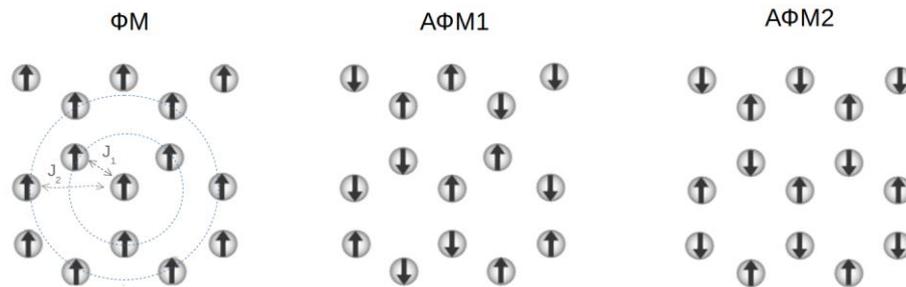


Рис. 2. Ориентация спинов в подрешетке ионов переходных металлов MAX₃ для трех магнитных конфигураций

Fig. 2. Spins orientation in the MAX₃ sublattice of transition metal ions for three magnetic configurations

Таблица 1. Результаты моделирования магнитных и электронных свойств MAX₃

Table 1. Simulation results of MAX₃ magnetic and electronic properties

Соединения Compounds	Магнитный порядок Magnetic order	E_g , эВ E_g , eV	M , μ_B	d_{M-M} , Å	d^*_{M-M} , Å	α_{M-A-M} , град α_{M-A-M} , deg
CrSiS3	АФМ2	0,18	3,26	3,41	5,90	86,72
CrSiSe3	АФМ1	0,20	3,42	3,61	6,24	86,97
CrSiTe3	АФМ1	0,68	3,60	3,91	6,78	88,11
CrGeS3	АФМ2	1,12	3,16	3,49	6,03	89,02
CrGeSe3	АФМ1	0,93	3,42	3,64	6,30	88,12
CrGeTe3	ФМ	0,35	3,61	3,95	6,85	89,24
FeSiS3	АФМ1	M	5,84	3,42	5,92	85,50
FeSiSe3	АФМ1	M	3,78	3,62	6,27	82,69
FeSiTe3	АФМ1	M	3,59	3,77	6,53	84,44
FeGeS3	АФМ2	M	3,80	3,47	6,01	92,95
FeGeSe3	АФМ2	M	3,73	3,66	6,35	92,55
FeGeTe3	АФМ2	M	3,62	3,80	6,59	85,48

Согласно результатам, полученным из квантово-механического моделирования, среди изучаемых соединений ферромагнетиком является только CrGeTe₃. Данный вывод сделан на основании полученных энергетических показателей (полных энергий систем). В работе [14] отмечается, что результаты анализа формируемого магнитного порядка зависят от коэффициента Хаббарда, который применяется в рамках используемой аппроксимации локальной плотности. Однако в настоящем исследовании выбор коэффициента основывается на глубоком анализе литературных источников [20] для всех антиферромагнитных конфигураций. Для ферромагнитного CrGeTe₃ исследования зависимости магнитных свойств от коэффициента Хаббарда представлены ниже.

Для установления зависимости и закономерностей, приводящих к определенному типу магнитного упорядочения, определены такие данные, как межатомное расстояние между

переходным металлом ($M = Cr, Fe$) и его ближайшим одноименным соседом (d_{Me-Me}), а также вторым по удаленности (d_{Me-Me}^*), углы между двумя ближайшими металлическими ионами через атом халькогена (α_{M-A-M}) в градусах (табл. 1).

Характеристики связи (химической) могут подавлять или усиливать магнетизм. Прямой обмен возможен только между двумя ближайшими соседями. Между вторым соседом прямой обмен невозможен из-за большого межатомного расстояния. В двумерных структурах MAX_3 ион переходного металла находится внутри пирамиды из халькогенов и имеет слабую прямую гибридизацию с другими переходными металлами. Таким образом, можно предположить, что обменное взаимодействие между металлами происходит посредством механизмов суперобмена (через атомы халькогена). Следует отметить, что угол между двумя ближайшими соседями в ферромагнитном $CrGeTe_3$ практически прямой.

Анализ распределения намагниченности показал, что весь магнитный момент локализован на атомах переходного металла. Все магнитные ионы в изучаемых системах имеют валентности, соответствующие их стехиометрии (Cr^{3+}, Fe^{3+}). Данные магнитного момента, приходящегося на ион переходного металла, занесены в табл. 1.

В ферромагнитном $CrGeTe_3$ нескомпенсированные по спину электроны в большей степени локализованы на d -орбиталях. При этом происходит гибридизация p -орбиталей халькогена, d -орбитали переходного металла (рис. 3). Такая гибридизация обеспечивает возможность осуществления обменного взаимодействия по механизму суперобмена.

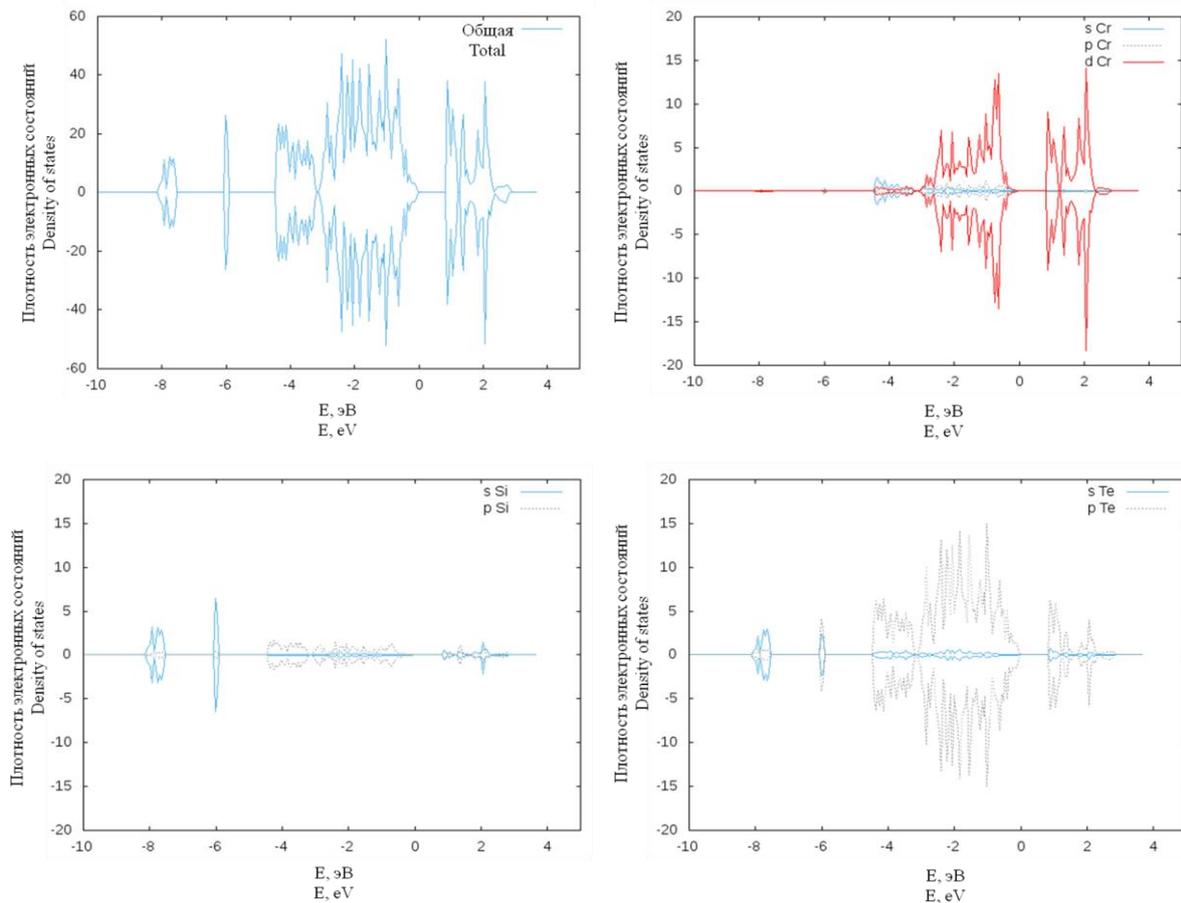


Рис. 3. Парциальная плотность электронных состояний $CrGeTe_3$
Fig. 3. Partial density of electronic states $CrGeTe_3$

Проведены расчеты для определения энергетических зонных диаграмм MAX_3 с учетом полученных результатов об основных магнитных состояниях. Все соединения на основе хрома можно отнести к полупроводникам. Например, $CrGeTe_3$, который является ферромагнетиком, имеет запрещенную зону, равную 0,35 эВ. Учитывая недооценку, которая может быть вызвана из-за применения DFT-методов, запрещенная зона материалов на практике может оказаться больше, вплоть до 20 %. Соединения на основе железа являются металлами при описанных

в данной статье условиях моделирования. Анализ парциальной плотности электронных состояний (рис. 3) позволил установить, что дно зоны проводимости формируется за счет d -орбитали атомов металла, также как s - и p -орбитали А атомов вносят вклад в формирование потолка валентной зоны. Уровень Ферми на представленных распределениях смещен в ноль по оси энергии.

Для более точного анализа магнитных свойств ферромагнитного полупроводника CrGeTe_3 рассчитан интеграл обменного взаимодействия. В табл. 1 представлены результаты расчета. Параметры обменного взаимодействия в CrGeTe_3 рассчитаны между двумя ближайшими ионами хрома (J_1), вторым по отдаленности (J_2) (рис. 2).

Согласно модели Гейзенберга в полное значение энергии системы входят энергетические вклады всех обменных взаимодействий. Таким образом, можно определить обменный интеграл как разницу энергий магнитных конфигураций с различными направлениями спинов. Получены значения обменного интеграла для коэффициентов Хаббарда 0, 3 и 5 эВ (табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчетов обменного интеграла CrGeTe_3
Table 2. Simulation results of CrGeTe_3 exchange integral calculation

Коэффициент Хаббарда, эВ Hubbard coefficient, eV	J_1 , эВ J_1 , eV	J_2 , эВ J_2 , eV
0	$-1,8 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$
3	$-2,4 \cdot 10^{-3}$	$-2,9 \cdot 10^{-6}$
5	$-1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$

При любом U устанавливается ферромагнитный порядок, поскольку обменный интеграл между двумя ближайшими соседями имеет отрицательное значение. Магнитный момент, локализованный на атомах хрома в соединении CrGeTe_3 , составил 3,14 μ_B . Согласно полученным J_2 , обменное взаимодействие со вторым соседним магнитным ионом незначительно, поскольку имеет значение на три порядка меньше, чем значение J_1 . Таким образом, конкуренции обменного взаимодействия не происходит.

Заключение

В статье представлены результаты исследования электронных свойств соединений на основе халькогенидов переходных металлов MAX_3 ($M = \text{Cr, Fe, A} = \text{Ge, Si, X} = \text{S, Se, Te}$) с наноструктурированным магнетизмом. С использованием квантово-механического моделирования в специализированном программном комплексе VASP проведены структурная и геометрическая оптимизации объемных, а также двумерных модификаций с учетом спиновой поляризации. Результаты расчетов постоянных решетки находятся в хорошем согласии с литературными источниками. Установлены основные магнитные состояния: подавляющее большинство соединений имеют антиферромагнитный порядок и только CrGeTe_3 – ферромагнитный. Анализ результатов моделирования позволил установить, что магнитный момент в MAX_3 преимущественно локализован на ионах переходного металла, в частности, на d -орбитали атома переходного металла. Рассчитаны интегралы обменного взаимодействия для ферромагнитного двумерного полупроводника CrGeTe_3 . При любом U (0, 3, 5 эВ) в данном соединении устанавливается ферромагнитный порядок. Магнитный момент, приходящийся на ион хрома, составляет 3,14 μ_B . Расчет расстояний между магнитными ионами, углов связи и парциальной плотности состояний указывает на то, что обменное взаимодействие происходит по механизму суперобмена, поскольку парциальная плотность состояний демонстрирует гибридизацию d -орбитали переходного металла и p -орбитали халькогена, при этом расстояние между магнитным ионом и вторым по отдаленности одноименным соседом составляет 6,85 Å, что исключает прямой обмен, а угол Me-X-Me равен 89,24°. Моделирование энергетических зонных диаграмм показало, что среди изучаемых материалов полупроводниками являются соединения на основе хрома, а металлами – соединения на основе железа.

Список литературы / References

1. Coey J.M.D. *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press; 2010.
2. Gibertini M., Koperski M., Morpurgo A.F., Novoselov K.S. Magnetic 2D materials and heterostructures. *Nature Nanotechnology*. 2019;14(5):408-419. DOI:10.1038/s41565-019-0438-6.
3. Mermin N.D., Wagner H. Absence of Ferromagnetism or Antiferromagnetism in One- or Two-Dimensional Isotropic Heisenberg Models. *Physical Review Letters*. 1966;17(22):1133-1136. DOI:10.1103/physrevlett.17.1133.
4. Niss M. History of the Lenz-Ising Model 1950–1965: from irrelevance to relevance. *Archive for History of Exact Sciences*. 2008;63:243-287. DOI:10.1007/s00407-008-0039-5.
5. Zhuang H.L., Kent P.R.C., Hennig R.G. Strong anisotropy and magnetostriction in the two-dimensional Stoner ferromagnet Fe_3GeTe_2 . *Physical Review B*. 2016;93(13). DOI:10.1103/physrevb.93.134407.
6. Liu S., Yuan X., Zou Y., Sheng Y., Huang C., Zhang E., ... Xiu F. Wafer-scale two-dimensional ferromagnetic Fe_3GeTe_2 thin films grown by molecular beam epitaxy. *Npj 2D Materials and Applications*. 2017;1(1). DOI:10.1038/s41699-017-0033-3.
7. Carteaux V., Ouvrard G., Grenier J.C., Laligant Y. Magnetic structure of the new layered ferromagnetic chromium hexatellurosilicate $\text{Cr}_2\text{Si}_2\text{Te}_6$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1991;94(1,2):127-133. DOI:10.1016/0304-8853(91)90121-p.
8. Li X., Yang J. CrXTe_3 (X = Si, Ge) nanosheets: two dimensional intrinsic ferromagnetic semiconductors. *Journal of Materials Chemistry C*. 2014;2(34):7071. DOI:10.1039/c4tc01193g.
9. Lee J.U., Lee S., Ryoo J.H., Kang S., Kim T.Y., Kim P., Cheong H. Ising-Type Magnetic Ordering in Atomically Thin FePS_3 . *Nano Letters*. 2016;16(12):7433-7438. DOI:10.1021/acs.nanolett.6b03052.
10. Huang B., Clark G., Navarro-Moratalla E., Klein D.R., Cheng R., Seyler K.L., Xu X. Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit. *Nature*. 2017;546(7657):270-273. DOI:10.1038/nature22391.
11. Gong C., Li L., Li Z., Ji H., Stern A., Xia Y., Zhang X. Discovery of intrinsic ferromagnetism in two-dimensional van der Waals crystals. *Nature*. 2017;546(7657):265-269. DOI:10.1038/nature22060.
12. Carteaux V., Brunet D., Ouvrard G., Andre G. Crystallographic, magnetic and electronic structures of new layered ferromagnetic compound $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$. *Journal of physics*. 1995;7(1):69-87.
13. Sun Y., Xiao R.C., Lin G.T., Zhang R.R., Ling L.S., Ma Z.W., Sheng Z.G. Effects of hydrostatic pressure on spin-lattice coupling in two-dimensional ferromagnetic $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$. *Applied Physics Letters*. 2018;112(7):072409. DOI:10.1063/1.5016568.
14. Chittari B.L., Lee D., MacDonald A.H., Hwang E., Jung J. Carrier and strain tunable intrinsic magnetism in two-dimensional MAX_3 transition metal chalcogenides. *Physical Review B*. 2020;101.
15. Casto L.D., Clune A.J., Yokosuk M.O., Musfeldt J.L., Williams T.J., Zhuang H.L., Mandrus D. Strong spin-lattice coupling in CrSiTe_3 . *APL Materials*. 2015;3(4):041515. DOI:10.1063/1.4914134.
16. Lado J.L., Fernández-Rossier J. On the origin of magnetic anisotropy in two dimensional CrI_3 . *2D Materials*. 2017;4(3):035002. DOI:10.1088/2053-1583/aa75ed.
17. Dreizler R., Gross E. *Density Functional Theory*. New York: Plenum Press; 1995.
18. Kresse G. *VASP the guide: tutorial*. Austria: University of Vienna; 2003.
19. Das T., Rocquefelte X., Jobic S. *Absolute Reference Energy to Realign the Band-edges of Inorganic Semiconductors Using First-principles Calculations*. 2020. arXiv:1812.01293.
20. Zhou F., Cococcioni M., Marianetti C.A., Morgan D., Ceder G. First-principles prediction of redox potentials in transition-metal compounds with LDA+U. *Physical Review B*. 2004;70:235121. DOI:10.1103/PhysRevB.70.235121.

Вклад авторов

Баранова М.С. подготовила входные данные для моделирования, выполнила анализ и интерпретацию результатов, а также провела расчет основных магнитных параметров.

Проскурова П.А. провела квантово-механическое моделирование.

Authors' contribution

Baranova M.S. prepared input simulation data, analyzed and interpreted the results, and also calculated basic magnetic parameters.

Praskurova P.A. conducted quantum mechanical simulation.

Сведения об авторах

Баранова М.С., научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Проскурова П.А., студентка кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-84-09;
e-mail: baranova@bsuir.by
Баранова Мария Сергеевна

Information about the authors

Baranova M.S., Researcher of R&D Lab 4.4 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Praskurava P.A., student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-84-09;
e-mail: baranova@bsuir.by
Baranova Maryia Sergeevna

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-96-99>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.333.3, 621.373.9

УНИМОДАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОР

КУРАЕВ А.А., МАТВЕЕНКО В.В.

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

Поступила в редакцию 17 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Введение в строй АЭС в Беларуси ставит широкий круг задач по эффективному использованию электрической энергии в различных электрических системах, приборах и устройствах. Особенно это относится к развитию и совершенствованию электродвигателей – стационарных, транспортных и специального назначения. В настоящее время используются двухполярные двигатели, имеющие коллектор – переключатель обмоток якоря двигателя при его вращении. Однако существует совершенно другой тип двигателя, не требующий коллектора – униполярный электрический двигатель-генератор. Некоторые свойства данного двигателя позволяют использовать его там, где коллекторный двигатель непригоден, например, во взрывоопасных и пожароопасных средах (искрение на коллекторе недопустимо), в прецизионных устройствах, где необходима предельная плавность хода и отсутствие вибрации и т. д. Физико-математические основы униполярного двигателя-генератора (электродинамика движущихся сред, сила Лоренца, униполярная индукция, магнитная гидродинамика) изложены во многих монографиях и учебниках, например, в [1–4]. Задача настоящей статьи – обратить внимание на техническую реализуемость униполярного двигателя-генератора в конструкции с разделенными проводниками в барабане ротора.

Ключевые слова: двигатель-генератор, унимодальный, двухполярный, коллекторный.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кураев А.А., Матвеев В.В. Унимодальный электрический двигатель-генератор. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 96-99.

UNIMODAL ELECTRIC MOTOR-GENERATOR

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

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

Submitted 17 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The commissioning of nuclear power plants in Belarus sets out wide tasking for the efficient usage of electrical energy in various electrical systems, instruments and devices. Specifically, it concerns the stationary

and special-purpose electric motors. At present, they use bipolar motors with a collector – the switch of the motor armature windings during its rotation. However, there is a completely different type of motors that does not require a collector – the unipolar electric motor-generator. Some of its properties allow it to be used where the commutator motor is unsuitable, for example, in explosive and fire hazardous environments (sparking on the collector is unacceptable), in precision devices where extreme smoothness and vibration lack are required, etc. Physico-mathematical foundations of the unipolar motor-generator (moving media electrodynamics, Lorentz force, unipolar induction, magnetohydrodynamics) are described in a number of monographs and textbooks, for example, in [1–4]. The purpose of this article is to pay attention to the technical feasibility of the unipolar motor-generator in a design with separated conductors in the rotor drum.

Keywords: motor-generator, unimodal, bipolar, commutator.

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

For citation. Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Unimodal electric motor-generator. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 96-99.

Введение

Введение в строй АЭС в Беларуси ставит широкий круг задач по эффективному использованию электрической энергии в различных электрических системах, приборах и устройствах. Особенно это относится к развитию и совершенствованию электродвигателей – стационарных, транспортных и специального назначения. В настоящее время используются двухполярные двигатели, имеющие коллектор – переключатель обмоток якоря двигателя при его вращении. Однако существует совершенно другой тип двигателя, не требующий коллектора – униполярный электрический двигатель-генератор. Некоторые свойства данного двигателя позволяют использовать его там, где коллекторный двигатель непригоден, например, во взрывоопасных и пожароопасных средах (искрение на коллекторе недопустимо), в прецизионных устройствах, где необходима предельная плавность хода и отсутствие вибрации и т. д.

Тем не менее конструкции униполярного двигателя не идут далее примитивных демонстрационных схем, иногда для псевдонаучного опровержения второго уравнения Максвелла (авторами, не знакомыми с электродинамикой движущихся сред). Физико-математические основы униполярного двигателя-генератора (электродинамика движущихся сред, сила Лоренца, униполярная индукция, магнитная гидродинамика) изложены во многих монографиях и учебниках, например, в [1–4].

Цель статьи – обратить внимание на техническую реализуемость униполярного двигателя генератора в конструкции с разделенными проводниками в барабане ротора.

Схема конструкции электрического двигателя-генератора

На рис. 1 представлено продольное сечение двигателя-генератора. Здесь: 1 – барабан ротора генератора; 2 – медные диски, замыкающие барабан на выводы 6 и 9; 3 – внешний S-полюс магнитной системы; 4 – N-полюс; 5 – катушки электромагнита (если не используется постоянный магнит); 6 – заземленный полюс питания; 7 – изолирующая прокладка; 8 – ртутные контакты; 9 – медная втулка вывода питания генератора; l – длина проводников барабана ротора; R – радиус барабана ротора.

В соответствии с теорией [1–4] вращающий момент ротора $P = IBR$, где I – суммарный ток проводников ротора, B – радиальная составляющая магнитной индукции магнита на $r = R$.

На рис. 2 показано сечение по линии А–А генератора. Здесь 1 – барабан ротора; 2 – проводники ротора; 3, 4 – полюса магнита; 5 – эпоксидная прокладка, соединяющая механически и изолирующая провода барабана. Как видно из конструкции, азимутальные неоднородности поля и барабана отсутствуют, что обеспечивает двигателю абсолютную плавность хода и отсутствие вибраций при вращении. Из-за отсутствия коллектора исключается искрение при переключении полюсов обычного электродвигателя.

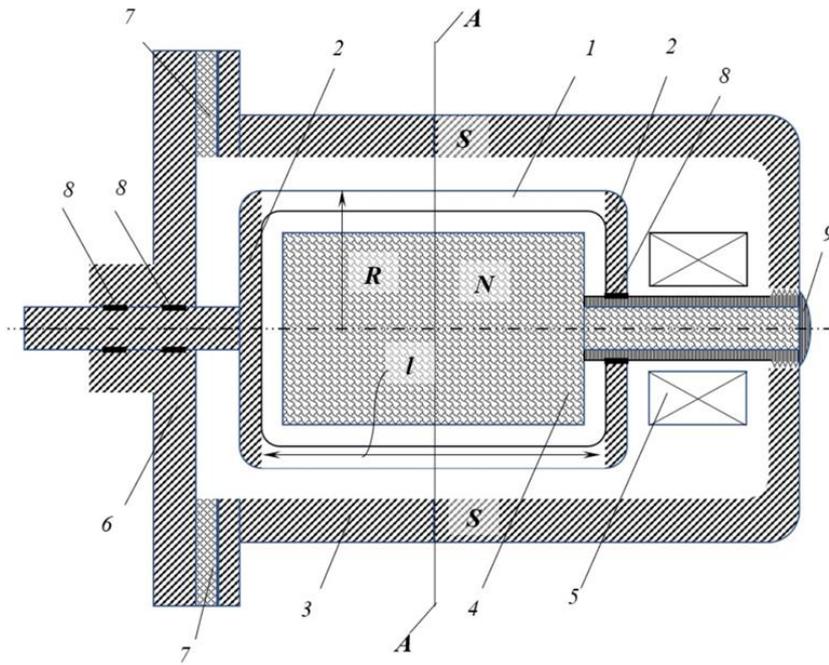


Рис. 1. Схема конструкции электрического двигателя-генератора (продольное сечение)
Fig. 1. Electric motor-generator structural scheme (longitudinal section)

Заметим далее, что двигатель обратим – при вращении от внешнего механического источника ротора двигатель становится генератором. В таком виде он успешно проектировался (со сплошным металлическим барабаном). Так, в [5] сообщается, что в СССР 1939 году был создан униполярный генератор с характеристиками: $P_0 = 7,5$ кВт, $I = 2500$ А, $U = 3$ В. В США после войны построен генератор с характеристиками: $P_0 = 10000$ кВт, $I = 150000$ А, $U = 67$ В. Как видно, единственным недостатком электрического двигателя-генератора являются низкое рабочее напряжение и очень большой ток. Но для некоторых применений это может быть не недостатком, а достоинством (опять-таки во взрывоопасных и пожароопасных средах, на воздушном транспорте, ракетной технике). Но главные достоинства униполярного двигателя – отсутствие вибрации и искрения, что во многих случаях является определяющими требованиями.

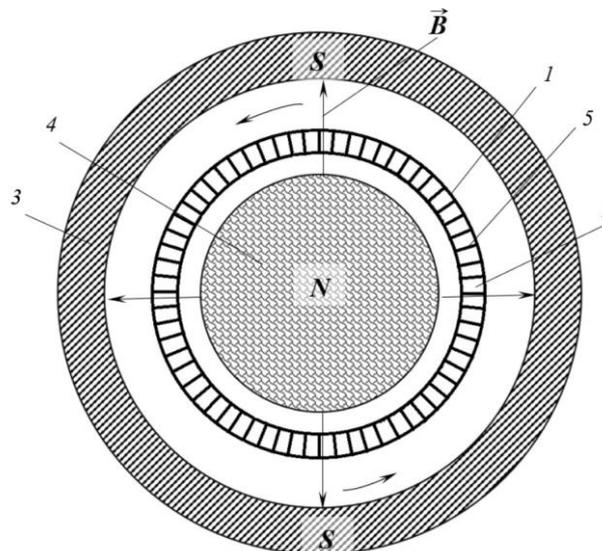


Рис. 2. Поперечное сечение А-А униполярного электрического двигателя-генератора
Fig. 2. Cross section A-A of unipolar electric motor-generator

Список литературы

1. Тамм И.Е. *Основы теории электричества*. Москва: «Наука»; 1956:542.
2. Джексон Дж. *Классическая электродинамика*. Москва: «Мир»; 1965:702.
3. Новожилов Ю.В., Яппа Ю.А. *Электродинамика*. Москва: «Наука»; 1978:352.
4. Дремин И.М. Униполярная индукция. *Физический энциклопедический словарь*. 1966;Т. 5:250-251.
5. Дремин И.М. Униполярная машина. *Физический энциклопедический словарь*. 1966;Т. 5:251.

References

1. Tamm I.E. [*Fundamentals of the theory of electricity*]. Moscow: "Science"; 1956:542. (In Russ.)
2. Jackson J. [*Classical electrodynamics*]. M.: "World"; 1965:702. (In Russ.)
3. Novozhilov Yu.V., Yappa Yu.A. [*Electrodynamics*]. M.: "Science"; 1978:352. (In Russ.)
4. Dremin I.M. [Unipolar induction]. *Physical Encyclopedic Dictionary*. 1966;Vol. 5:250-251. (In Russ.)
5. Dremin I.M [Unipolar machine]. *Physical Encyclopedic Dictionary*. 1966;Vol. 5:251. (In Russ.)

Сведения о вкладе авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвеев В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sci, Professor, Professor of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Matveyenka V.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computational Methods and Programming Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-56;
e-mail kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-89-56;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Kurayev Alexander Alexandrovich

