
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. Прищеп, 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

Козлов С.В., Ву Тхань Ха Потенциальная точность квазиоптимальных радиолокационных измерителей угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой	5
Воробей А.В., Осипов А.Н., Тхостов М.Х-М., Телеш И.А. Экспериментальное обоснование эффективного режима воздействия инфракрасного излучения на организм человека при проведении инфракрасной терапии	14
Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Горушко В.А. Влияние быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры микросхем временных устройств	20
Данилюк А.Л., Трафименко А.Г., Федотов А.К., Прищеп С.Л. Делокализация электронных состояний в n-Si при низких температурах	28
Кишкевич И.В., Рункевич Е.Н., Меженная М.М., Калилец Т.В., Лашетко Р.А., Дик С.К. Экспериментальная апробация методических и аппаратно-программных средств спекл-визуализации в диагностике микроциркуляции поверхностных биотканей человека	36
Баглов А.В., Хорошко Л.С., Яцкевич П.А. Оптимизация конфигурации двухмасштабных оксидных структур для фотокаталитических приложений	42

Проскурова П.А., Гвоздовский Д.Ч., Баранова М.С., Стемпицкий В.Р. Электронные и магнитные свойства перовскитов ABO_3 (A – Ca, Ce, Y, Na; B – Ti, Nb, Fe, Mn, Ta; O)	49
Савёлов П.И., Лившиц Ю.Е. Разработка конструкции мобильной солнечной электростанции.....	57
Ле Динь Ви, Лешок А.А., Долбик А.В., Перко С.Л., Лазарук С.К. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для оптических межсоединений.....	63
Волчѣк В.С., Ловшенко И.Ю., Шандарович В.Т., Дао Динь Ха. Нитрид-галлиевый транзистор с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена.....	72
Дворников О.В., Чеховский В.А., Галкин Я.Д., Кунц А.В., Стемпицкий В.Р., Прокопенко Н.Н. Анализ результатов проектирования считывающей электроники кремниевых умножителей на основе базового матричного кристалла МН2ХА030	81
Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Комаров Ф.Ф., Горушко В.А. Электронно-микроскопические исследования системы Pt-Si при ее быстрой термообработке.....	88
Мордачев В.И., Ционенко Д.А., Абдулхадид Х.Д., Пухир Г.А., Прудник А.М. Эффективность экранирования широкополосных импульсов электромагнитных полей конструкциями экранов на основе иглопробивного материала.....	97

Корректурa текста на русском языке и верстка Л.В. КОНДАКОВА
Корректурa текста на английском языке М.А. ПОЛКАНОВ
Компьютерный дизайн О.В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 05.05.2020. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 10,7. Тираж 100 экз. Заказ 65.
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

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Kozlov S.V., Vu Thanh Ha. Potential accuracy of quasi-optimal radar meters of angular coordinates with scanning multi-channel antenna system	5
Vorobey A.V., Osipov A.N., Thostov M. H-M., Telesh I.A. Experimental substantiation of the effective mode of infrared radiation exposure on human body during infrared therapy.	14
Saladukha V.A., Pilipenko V.A., Gorushko V.A. Influence of the rapid thermal treatment of the gate dielectric on the parameters of integrated circuits of time devices	20
Danilyuk A.L., Trafimenko A.G., Fedotov A.K., Prischepa S.L. Delocalization of electron states in n-Si at low temperatures.....	28
Kishkevich I.V., Runkevich E.N., Mezhennaya M.M., Kalilec T.V., Laschetko R.A., Dzik S.K. Experimental approbation of methodological and hardware-software speck-visualization in diagnosis of microcirculation of human surface biological tissues	36
Baglov A.V., Khoroshko L.S., Yatskevich P.A. Optimization of two-scale oxide structure configuration for photocatalytic applications	42
Praskurava P.A., Hvazdousky D.C., Baranova M.S., Stempitsky V.R. Electronic and magnetic properties of ABO ₃ perovskites (A – Ca, Ce, Y, Na; B – Ti, Nb, Fe, Mn, Ta; O) ...	49
Savelov P.I., Livshic Y.E. Development of the design of mobile solar power plant.....	57
Le Dinh Vi, Leshok A.A., Dolbik A.V., Perko S.L., Lazarouk S.K. Avalanche leds based on nanostructured silicon for optical interconnections	63
Volcheck V.S., Lovshenko I.Yu., Shandarovich V.T., Dao Dinh Ha. Gallium nitride high electron mobility transistor with an effective graphene-based heat removal system.....	72
Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Galkin Y.D., Kunts A.V., Stempitski V.R., Prokopenko N.N. Analysis of the results of designing reading electronics of silicon photomultiplier tubes driven by the base matrix crystal MN2XA030	81

Saladukha V.A., Pilipenko V.A., Komarov F.F., Gorushko V.A. Electron-microscope investigations of the system Pt-Si during its rapid thermal treatment	88
Mordachev V.I., Tsyankenka D.A., Abdulhadi H.D.A., Pukhir H.A., Prudnik A.M. Shielding efficiency of wide-band pulses of electromagnetic radiation by shields based on the needle-punching material	97



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ СО СКАНИРУЮЩЕЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ

КОЗЛОВ С.В., ВУ ТХАНЬ ХА

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

Поступила в редакцию 17 декабря 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Получены аналитические выражения для среднего квадратического отклонения ошибок оценивания угловых координат цели для квазиоптимальных алгоритмов обработки флуктуирующих сигналов в радиолокационных измерителях со сканирующей многоканальной приемной системой в условиях внешних помех. Аналитические оценки базируются на построении и обращении информационной матрицы Фишера при совместной оценке направления прихода и мощности флуктуирующего отраженного сигнала на выходе изотропной приемной антенны и параболической аппроксимации среднего значения решающей статистики в окрестности направления на цель для алгоритма обработки, предусматривающей оценку средней мощности отраженного сигнала методом наименьших квадратов. Показана сходимость точных и приближенных аналитических оценок и результатов компьютерного моделирования. Приведены результаты исследования точности определения угловых координат отраженного сигнала для типовых пространственно-энергетических ситуаций. Показано, что ошибки оценивания угловых координат отраженного сигнала являются несмещенными, причем при малых интервалах корреляции отраженного сигнала плотность вероятности ошибок оценивания азимута цели имеет нормальное распределение, а при больших интервалах корреляции распределение существенно отличается от нормального и приобретает большой положительный эксцесс и асимметрию, значения которых зависят от угловых различий источника помех и цели. Полученные выражения могут быть использованы для оценки эффективности квазиоптимальных радиолокационных измерителей в условиях внешних помех и при комплексном моделировании радиолокационных средств, включающих такие измерители.

Ключевые слова: пространственная компенсация помех, матрица Фишера, статистические характеристики, функция отношения правдоподобия, асимметрия, эксцесс.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Козлов С.В., Ву Тхань Ха. Потенциальная точность квазиоптимальных радиолокационных измерителей угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 5-13.

POTENTIAL ACCURACY OF QUASI-OPTIMAL RADAR METERS OF ANGULAR COORDINATES WITH SCANNING MULTI-CHANNEL ANTENNA SYSTEM

SERGEI V. KOZLOV, VU THANH HA

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

Submitted 17 December 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. We obtained the analytical expressions for the mean square deviation of errors in estimating the angular coordinates of the target for quasi-optimal algorithms of processing the fluctuating signals in radar meters with a scanning multichannel receiving system under external interference. Analytical estimates are based on the construction and circulation of the Fisher information matrix with a joint estimation of the direction of arrival and power of the fluctuating reflected signal at the output of the isotropic receiving antenna and a parabolic approximation of the mean value of the decisive statistic in the vicinity of the target direction for the processing algorithm, which provides for an estimate of the average power of the reflected signal by the least square method. The research demonstrates the convergence of exact and approximate analytical estimates and the results of computer modeling. We present the results of studying the accuracy of determining the angular coordinates of the reflected signal for typical space-energy cases. It is shown that the estimation error of the angular coordinates of the reflected signal are unbiased, and at small intervals of the correlation of the reflected signal the probability density of estimation error of the target azimuth exhibits normal distribution. In case of large correlation intervals, the distribution significantly differs from normal and acquires a large positive kurtosis and asymmetry with their values depending on the angular differences of the interference source and the target. The obtained expressions can be used to evaluate the effectiveness of quasi-optimal radar meters in the conditions of external interference and in the complex modeling of radar facilities with such meters included.

Keywords: spatial interference compensation, Fisher matrix, statistical characteristics, likelihood ratio function, asymmetry, kurtosis.

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

For citation. Kozlov S.V., Vu Thanh Ha. Potential accuracy of quasi-optimal radar meters of angular coordinates with scanning multi-channel antenna system. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 5-13.

Введение

В [1, 2] для модельного случая нефлуктуирующего и реальных случаев дружно- и быстрофлуктуирующего отраженного сигнала (ОС) при отсутствии и наличии мешающих отражений (МО) обоснованы модификации квазиоптимальных алгоритмов оценивания пеленга цели в измерителе угловых координат обзорной радиолокационной станции (РЛС) с подсистемой пространственной компенсации помех на базе многоканальной антенной системы [3]. Статистические характеристики пеленгации ОС для указанных алгоритмов не исследовались. Их получение и исследование является целью настоящей статьи.

Методика исследования потенциальных точностей квазиоптимальных алгоритмов

Для иллюстрации предлагаемого подхода ограничимся случаем отсутствия МО и реализации одноэтапного [2] алгоритма функционирования измерителя. Кроме того, будем полагать, что коэффициент r междупериодной корреляции ОС известен с достаточной точностью.

Оцениваемыми являются азимут $\hat{\alpha}$ и средняя мощность $\hat{\sigma}_c^2$ ОС на выходе изотропной приемной антенны при облучении цели максимумом главного лепестка диаграммы направленности (ДН) передающей антенны [4]. Корреляционная матрица (КМ) \mathbf{K} ошибок оценки параметров сигнала определяется выражением [5] вида

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} D_\alpha & K_{\alpha P} \\ K_{\alpha P} & D_{\sigma_c^2} \end{pmatrix} = -\mathbf{I}_\Phi, \quad (1)$$

где D_α , $D_{\sigma_c^2}$, $K_{\alpha P}$ – дисперсии и корреляционный момент связи ошибок оценивания азимута

и мощности ОС; $\mathbf{I}_\Phi = \begin{pmatrix} A & B \\ B & C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{z} / \alpha, \sigma_c^2)}{\partial \alpha^2} & \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{z} / \alpha, \sigma_c^2)}{\partial \alpha \partial \sigma_c^2} \\ \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{z} / \alpha, \sigma_c^2)}{\partial \alpha \partial \sigma_c^2} & \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{z} / \alpha, \sigma_c^2)}{(\partial \sigma_c^2)^2} \end{pmatrix}$ – матрица Фишера;

$\Psi(\mathbf{z} / \alpha, \sigma_c^2)$ – логарифм функции отношения правдоподобия (ФОР); верхняя черта означает операцию статистического усреднения по ансамблю реализаций векторов $\mathbf{z} = (\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dots, \dot{Z}_I)^T$ отсчетов обеленной по пространству и времени принимаемой реализации; I – число отсчетов (импульсов в пачке) на интервале наблюдения [2].

Для дружно флуктуирующего сигнала [2]

$$\Psi_1(\mathbf{z} / \alpha, \sigma_c^2) = \mathbf{z}^+ (\mathbf{E} - (\mathbf{E} + \sigma_c^2 \mathbf{R}_H(\alpha))^{-1}) \mathbf{z} - \ln |\mathbf{E} + \sigma_c^2 \mathbf{R}_H(\alpha)|, \quad (2)$$

где $\mathbf{R}_H(\alpha)$ – КМ отсчетов ОС единичной мощности с учетом операции обеления с элементами

$$R_{H_{k,m}}(\alpha) = r^{|k-m|} \dot{Z}_{оп_k}(\alpha) Z_{оп_m}^*(\alpha), \quad (3)$$

$$\dot{Z}_{оп_k}(\alpha) = \frac{\dot{F}_0(\alpha_{ak} - \alpha) e^{j2\pi F_{DS} T_r k} \boldsymbol{\omega}_k^+ \mathbf{s}(\alpha_{ak} - \alpha)}{\sqrt{\hat{P}_{ш+\pi_k}}} - \text{отсчеты ожидаемого (опорного) сигнала;}$$

α_{ak} – азимут антенны РЛС при приеме k -го импульса; $\dot{F}_0(\alpha_{ak} - \alpha)$; F_{DS} ; T_r ; $\boldsymbol{\omega}_k^+$, $\mathbf{s}(\alpha_{ak} - \alpha)$; $\hat{P}_{ш+\pi_k} = \boldsymbol{\omega}_k^+ \boldsymbol{\Phi}_k \boldsymbol{\omega}_k$ – ДН передающей антенны; доплеровский сдвиг частоты ОС; период повторения импульсов РЛС; вектор весовых коэффициентов приемных каналов, вектор-столбец диаграмм направленности приемных каналов и оценка мощности взвешенных шумов и нескомпенсированных остатков помех после пространственной компенсации помех соответственно; $\boldsymbol{\Phi}_k$ – КМ помех на выходах приемных каналов; «+» – знак эрмитового сопряжения. Здесь и далее все обозначения, кроме оговариваемых, соответствуют использованным в [1, 2].

ФОР (2) приводит к максимально правдоподобной (МП) оценке вида

$$(\hat{\alpha}, \hat{\sigma}_c^2) = \arg \max_{\alpha, \sigma_c^2} \Psi_1(\mathbf{z} / \alpha, \sigma_c^2), \quad (4)$$

для которой КМ ошибок оценивания параметров соответствует (1).

Заменив в ФОР (1) значение σ_c^2 на его оценку по методу наименьших квадратов

$$\hat{\sigma}_c^2(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^I (|\dot{Z}_i|^2 - \sigma_{ш}^2) |\dot{Z}_{оп_i}(\alpha)|^2}{\sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{оп_i}(\alpha)|^4}, \quad (5)$$

получим упрощенную модификацию решающей статистики вида

$$\Psi_2(\mathbf{z}/\alpha) = \mathbf{z}^+ (\mathbf{E} - (\mathbf{E} + \sigma_c^2(\alpha)\mathbf{R}_H(\alpha))^{-1})\mathbf{z} - \ln|\mathbf{E} + \sigma_c^2(\alpha)\mathbf{R}_H(\alpha)|, \quad (6)$$

с оценкой азимута

$$\hat{\alpha} = \arg \max_{\alpha} \Psi_2(\mathbf{z}/\alpha). \quad (7)$$

Для МП оценки (4) может быть получена матрица Фишера вида (1). Для статистики (6) и оценки (7) нижняя граница Рао – Крамера для дисперсии оценивания азимута:

$$\sigma_{\alpha}^2 = - \left(\frac{\partial^2 \overline{\Psi_2(\mathbf{z}/\alpha)}}{\partial \alpha^2} \Big|_{\alpha=\alpha_c} \right)^{-1} = - \left(\frac{\partial^2 \overline{\Psi_2(\alpha)}}{\partial \alpha^2} \Big|_{\alpha=\alpha_c} \right)^{-1}, \quad (8)$$

где $\overline{\Psi_2(\alpha)} = \overline{\Psi_2(\mathbf{z}/\alpha)}$ – средняя по ансамблю реализацией вектора \mathbf{z} решающая статистика (6). Изменение в (8) порядка операций статистического усреднения и дифференцирования правомочно ввиду их линейности.

Выражения для КМ ошибок оценок максимального правдоподобия

Обозначим в (2)

$$\mathbf{H} = (\mathbf{E} + \sigma_c^2 \mathbf{R}_H(\alpha))^{-1}, \quad \mathbf{D} = \ln |\mathbf{E} + \sigma_c^2 \mathbf{R}_H(\alpha)|, \quad (9)$$

где $\mathbf{R}_H(\alpha) = \mathbf{b}(\alpha)\mathbf{b}^+(\alpha) \otimes \mathbf{R}_r$; $\mathbf{b}(\alpha) = (\dot{Z}_{оп1}(\alpha), \dots, \dot{Z}_{опI}(\alpha))^T$; \mathbf{R}_r – матрица, составленная из междупериодных коэффициентов корреляции ОС с элементами $R_{r,k,m} = r^{|k-m|}$; \otimes – операция поэлементного перемножения матриц.

Используя правила матричного дифференцирования, получим:

$$\mathbf{H}'_{\alpha} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \alpha} = -\sigma_c^2 \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \mathbf{H}; \quad \mathbf{H}''_{\alpha} = \frac{\partial \mathbf{H}'_{\alpha}}{\partial \alpha} = -\sigma_c^2 \left(\mathbf{H}'_{\alpha} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \mathbf{H} + \mathbf{H} \frac{\partial^2 \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha^2} \mathbf{H} + \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \mathbf{H}'_{\alpha} \right);$$

$$\mathbf{H}'_{\sigma_c^2} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \sigma_c^2} = -\mathbf{H} \mathbf{R}_H(\alpha) \mathbf{H}; \quad \mathbf{H}''_{\sigma_c^2} = \frac{\partial \mathbf{H}'_{\sigma_c^2}}{\partial \sigma_c^2} = - \left(\mathbf{H}'_{\sigma_c^2} \mathbf{R}_H(\alpha) \mathbf{H} + \mathbf{H} \mathbf{R}_H(\alpha) \mathbf{H}'_{\sigma_c^2} \right);$$

$$\mathbf{H}''_{\alpha \sigma_c^2} = - \left[\mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \mathbf{H} + \sigma_c^2 \left(\mathbf{H}'_{\sigma_c^2} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \mathbf{H} + \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \mathbf{H}'_{\sigma_c^2} \right) \right];$$

$$\mathbf{D}'_{\alpha} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \alpha} = \sigma_c^2 \text{tr} \left(\mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \right); \quad \mathbf{D}''_{\alpha} = \frac{\partial \mathbf{D}'_{\alpha}}{\partial \alpha} = \sigma_c^2 \text{tr} \left(\mathbf{H}'_{\alpha} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} + \mathbf{H} \frac{\partial^2 \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha^2} \right);$$

$$\mathbf{D}'_{\sigma_c^2} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \sigma_c^2} = \text{tr}(\mathbf{H} \mathbf{R}_H(\alpha)); \quad \mathbf{D}''_{\sigma_c^2} = \frac{\partial \mathbf{D}'_{\sigma_c^2}}{\partial \sigma_c^2} = \text{tr} \left(\mathbf{H}'_{\sigma_c^2} \mathbf{R}_H(\alpha) \right); \quad \mathbf{D}''_{\alpha \sigma_c^2} = \text{tr} \left(\mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \right) + \sigma_c^2 \text{tr} \left(\mathbf{H}'_{\sigma_c^2} \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} \right),$$

$$\text{где } \frac{\partial \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha} = \left(\frac{\partial \mathbf{b}(\alpha)}{\partial \alpha} \mathbf{b}^+(\alpha) + \mathbf{b}(\alpha) \left(\frac{\partial \mathbf{b}(\alpha)}{\partial \alpha} \right)^+ \right) \otimes \mathbf{R}_r;$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{R}_H(\alpha)}{\partial \alpha^2} = \left(\frac{\partial^2 \mathbf{b}(\alpha)}{\partial \alpha^2} \mathbf{b}^+(\alpha) + 2 \frac{\partial \mathbf{b}(\alpha)}{\partial \alpha} \frac{\partial \mathbf{b}^+(\alpha)}{\partial \alpha} + \mathbf{b}(\alpha) \left(\frac{\partial^2 \mathbf{b}(\alpha)}{\partial \alpha^2} \right)^+ \right) \otimes \mathbf{R}_r;$$

$$\frac{\partial \mathbf{b}(\alpha)}{\partial \alpha} \text{ и } \frac{\partial^2 \mathbf{b}(\alpha)}{\partial \alpha^2} \text{ – векторы с } i \text{-ми элементами вида}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\widehat{P}_{\text{ш+п}_i}}} \left(\frac{\partial \dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha} \boldsymbol{\omega}_i^+ \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha) + \dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha) \boldsymbol{\omega}_i^+ \frac{\partial \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha} \right) \text{ и}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\widehat{P}_{\text{ш+п}_i}}} \left(\frac{\partial^2 \dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha^2} \boldsymbol{\omega}_i^+ \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha) + 2 \frac{\partial \dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha} \boldsymbol{\omega}_i^+ \frac{\partial \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha} + \dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha) \boldsymbol{\omega}_i^+ \frac{\partial^2 \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha^2} \right);$$

$$\frac{\partial \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha} = \left(\frac{\partial \dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha}, \frac{\partial \dot{F}_1(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha}, \dots, \frac{\partial \dot{F}_N(\alpha_{ai} - \alpha)}{\partial \alpha} \right)^T.$$

Тогда элементы матрицы Фишера в виде средних значений производных ФОП в точке $\alpha = \alpha_c$; $\sigma_c^2 = P_c$ с учетом некоррелированности нескомпенсированных остатков помех и внутренних шумов и нормировки их суммарной мощности к единице составят

$$A = -(\mathbf{z}^+ \mathbf{H}'_{\alpha} \mathbf{z} + \mathbf{D}'_{\alpha}) = -\sum_i \sum_j H''_{\alpha_{ij}} \overline{Z_i Z_j^*} - \sigma_c^2 \text{tr} \left(\mathbf{H}'_{\alpha} \frac{\partial \mathbf{R}_{\text{H}}(\alpha)}{\partial \alpha} + \mathbf{H} \frac{\partial^2 \mathbf{R}_{\text{H}}(\alpha)}{\partial \alpha^2} \right) =$$

$$= -\sum_i \sum_j H''_{\alpha_{ij}} Q_{i,j} - \sigma_c^2 \text{tr} \left(\mathbf{H}'_{\alpha} \frac{\partial \mathbf{R}_{\text{H}}(\alpha)}{\partial \alpha} + \mathbf{H} \frac{\partial^2 \mathbf{R}_{\text{H}}(\alpha)}{\partial \alpha^2} \right);$$

$$Q_{i,j} = \begin{cases} 1 + \sigma_c^2 b_i(\alpha) b_j^*(\alpha), & i = j \\ r^{|i-j|} \sigma_c^2 b_i(\alpha) b_j^*(\alpha), & i \neq j \end{cases};$$

$$B = -\sum_i \sum_j H''_{\alpha_{ij}} Q_{i,j} - \left[\text{tr} \left(\mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{R}_{\text{H}}(\alpha)}{\partial \alpha} \right) + \sigma_c^2 \text{tr} \left(\mathbf{H}'_{\alpha} \frac{\partial \mathbf{R}_{\text{H}}(\alpha)}{\partial \alpha} \right) \right]; C = -\sum_i \sum_j H''_{\alpha_{ij}} Q_{i,j} - \text{tr} \left(\mathbf{H}'_{\alpha} \mathbf{R}_{\text{H}}(\alpha) \right).$$

Обращая матрицу Фишера и беря результат с обратным знаком, получим:

$$-\mathbf{I}_{\Phi}^{-1} = \frac{1}{B^2 - AC} \begin{pmatrix} C & -B \\ -B & A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{\alpha}^2 & r_{\alpha P} \sigma_{\alpha} \sigma_P \\ r_{\alpha P} \sigma_{\alpha} \sigma_P & \sigma_P^2 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Дисперсии оценивания азимута, мощности сигнала и коэффициент корреляции оценок:

$$\sigma_{\alpha}^2 = \frac{C}{B^2 - AC}; \quad \sigma_P^2 = \frac{A}{B^2 - AC}; \quad r_{\alpha P} = -\frac{B}{\sqrt{AC}}. \quad (11)$$

Дисперсия оценивания азимута для упрощенного алгоритма

Аппроксимируем ФОП (6) в окрестности точки $\alpha = \alpha_c$ (окрестности максимума) параболой вида

$$\Psi_2(\alpha) = a\alpha^2 + b\alpha + c, \quad (12)$$

где вектор $(a, b, c)^T$ коэффициентов является решением системы уравнений

$$\begin{cases} a(\alpha_c - \delta\alpha)^2 + b(\alpha_c - \delta\alpha) + c = \overline{\Psi_2(\alpha_c - \delta\alpha)} = \Psi_-; \\ a\alpha_c^2 + b\alpha_c + c = \overline{\Psi_2(\alpha_c)} = \Psi_0; \\ a(\alpha_c + \delta\alpha)^2 + b(\alpha_c + \delta\alpha) + c = \overline{\Psi_2(\alpha_c + \delta\alpha)} = \Psi_+, \end{cases} \quad (13)$$

а $\overline{\Psi_2(\alpha_c - \delta\alpha)} = \Psi_-$, $\overline{\Psi_2(\alpha_c)} = \Psi_0$, $\overline{\Psi_2(\alpha_c + \delta\alpha)} = \Psi_+$ – средние значения [3] ФОП в точках $\alpha_c - \delta\alpha$, α_c , $\alpha_c + \delta\alpha$ соответственно.

Из (12), (13) имеем

$$a = \frac{\Psi_+ - 2\Psi_0 + \Psi_-}{2\delta\alpha^2}. \quad (14)$$

Так как $\partial^2\Psi_2(\alpha)/\partial\alpha^2 = 2a$, то дисперсия ошибки пеленгации

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{\delta\alpha^2}{-\Psi_+ + 2\Psi_0 - \Psi_-}. \quad (15)$$

Средние значения ФОП (6) в заданных точках составят [4]:

$$\begin{aligned} \Psi_\pm &= \overline{\Psi_2(\mathbf{z}/\alpha_c \pm \delta\alpha)} = \overline{(\mathbf{z}_{\text{П+Ш}} + \mathbf{z}_c)^+ \mathbf{H}^{(\pm)} (\mathbf{z}_{\text{П+Ш}} + \mathbf{z}_c) - \ln|\mathbf{E} + \overline{\sigma_c^2}(\alpha_c \pm \delta\alpha)\mathbf{R}_H(\alpha_c \pm \delta\alpha)|} = \\ &= \sigma_c^2 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I H_{i,j}^{(\pm)} r^{|i-j|} \dot{Z}_{\text{оп}i}(\alpha_c \pm \delta\alpha) Z_{\text{оп}j}^*(\alpha_c \pm \delta\alpha) + \sum_{i=1}^I H_{i,i}^{(\pm)} - \ln|\mathbf{E} + \overline{\sigma_c^2}(\alpha_c \pm \delta\alpha)\mathbf{R}_H(\alpha_c \pm \delta\alpha)|; \quad (16) \end{aligned}$$

$$\Psi_0 = \sigma_c^2 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I H_{i,j}^{(0)} r^{|i-j|} \dot{Z}_{\text{оп}i}(\alpha_c) Z_{\text{оп}j}^*(\alpha_c) + \sum_{i=1}^I H_{i,i}^{(0)} - \ln|\mathbf{E} + \overline{\sigma_c^2}(\alpha_c)\mathbf{R}_H(\alpha_c)|,$$

где $\mathbf{H}^{(\pm)} = \mathbf{E} - (\mathbf{E} + \overline{\sigma_c^2}(\alpha_c \pm \delta\alpha)\mathbf{R}_H(\alpha_c \pm \delta\alpha))^{-1}$; $\mathbf{H}^{(0)} = \mathbf{E} - (\mathbf{E} + \overline{\sigma_c^2}(\alpha_c)\mathbf{R}_H(\alpha_c))^{-1}$;

$$\overline{\sigma_c^2}(\alpha_c \pm \delta\alpha) = \sigma_c^2 \sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{\text{оп}i}(\alpha_c)|^2 |\dot{Z}_{\text{оп}i}(\alpha_c \pm \delta\alpha)|^2 / \sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{\text{оп}i}(\alpha_c \pm \delta\alpha)|^4; \quad \overline{\sigma_c^2}(\alpha_c) = \sigma_c^2. \quad (17)$$

При выводе учтено, что с учетом некоррелированности остатков помехи и шума и нормировки по мощности $\mathbf{z}_{\text{П+Ш}} \mathbf{z}_{\text{П+Ш}}^+ = \mathbf{E}$.

Таким образом, (15) совместно с (16), (17) определяет дисперсию результатов оценивания азимута ОС для упрощенного алгоритма с оценкой мощности ОС методом наименьших квадратов.

Результаты компьютерного моделирования

Проверка полученных аналитических соотношений проводилась путем компьютерного моделирования упрощенного алгоритма (7), получения выборочных математических ожиданий и среднего квадратического отклонения (СКО) ошибок оценивания пеленга цели и их сравнения аналитическими оценками (11) и (15). Моделирование проводилось для случая наличия одного мощного источника помех, угловое положение которого, нормированное к ширине $\Delta\alpha_{0,5}$ главного лепестка ДН основной приемопередающей антенны, составляло величину 0,125...2,5. Исходные данные [3] по РЛС, антенной системе и параметрам зондирующих сигналов принимались в соответствии с [3, 4]. Эффективная площадь рассеяния цели принималась 1 м², интервал корреляции флуктуаций ОС $\tau_c = 1...500$ мс. Источник прицельных по частоте помех воздействовал с дальности 100 км и имел мощность 1 кВт. При указанных параметрах отношение сигнал/шум без помех по одному импульсу пачки в максимум ДН составляет 8,4 дБ, отношение помеха/шум при воздействии помехи по максимуму ДН основного/компенсационного каналов – 74/62 дБ. Корреляционная матрица помех на выходах приемных каналов при моделировании оценивалась по 40 отсчетам.

Результаты моделирования при достаточном (500) числе реализаций в виде нормированных СКО ошибок пеленгации (в процентах к ширине главного лепестка) приведены в табл. 1, где вид оценки «Ф» соответствует оценке (11), «У» – упрощенной оценке (15) и «М» – выборочным значениям СКО при компьютерном моделировании. В табл. 2 приведены данные по смещенности/несмещенности выборочных математических ожиданий (если доверительный интервал покрывал истинное значение, проставлялось «нет», иначе – указывалось математическое ожидание ошибки), коэффициентам асимметрии и эксцесса выборочных распределений.

Таблица 1. Результаты аналитических оценок и компьютерного моделирования
Table 1. Results of analytical estimates and computer modeling

Интервал корреляции ОС, с	Вид оценки	Нормированная СКО ошибок пеленгации × 100 %, при нормированном угловом отклонении источника помехи от источника сигнала				
		0,25	0,5	0,8	1,1	1,3
0,5	Ф	6,4	5,1	3,5	3,1	3,3
	У	6,5	5,1	3,6	3,2	3,6
	М	6,5	5,3	4,3	4,1	4,5
0,1	Ф	7,4	5,7	4,2	3,6	3,9
	У	7,4	5,7	4,1	3,6	4,1
	М	9,7	6,7	5,9	4,8	5,3
0,05	Ф	7,1	5,4	4	3,4	3,9
	У	7,1	5,4	4	3,4	4
	М	8,3	6,4	5,7	4,2	4,9
0,01	Ф	5,8	4,3	3,2	2,7	3,2
	У	5,8	4,2	3,2	2,7	3,2
	М	7,8	4,8	3,8	3	3,4
0,001	Ф	5	3,3	2,5	2	2,3
	У	4,9	3,2	2,5	2	2,3
	М	5,4	3,4	3	2,1	2,8

Как следует из результатов расчетов и моделирования, СКО ошибок пеленгации (11), полученные с использованием матрицы Фишера для максимально правдоподобного алгоритма (4), предполагающего совместную максимизацию ФОП по направлению прихода и мощности ОС, практически совпадают с расчетными СКО ошибки (15) для упрощенного алгоритма (7). Расхождение оценок СКО не превышает 2...3 %. Выборочные СКО по результатам моделирования больше расчетных в среднем на 22 %. Это свидетельствует о том, что алгоритм (7) по крайней мере для рассматриваемых значений отношений сигнал/шум практически эквивалентен алгоритму максимального правдоподобия (4). Различия теоретических и выборочных оценок объясняется влиянием на точность ограниченного объема выборки при оценивании корреляционной матрицы процессов на выходах приемных каналов, погрешностями при поиске максимума ФОП, а также отклонением выборочных распределений от нормального распределения.

Таблица 2. Параметры выборочных распределений
Table 2. Sample distribution parameters

Интервал корреляции ОС, с	Факт смещенности оценки или нормированная средняя ошибка (%) коэффициенты асимметрии / эксцесса				
	0,25	0,5	0,8	1,1	1,3
0,5	<u>нет</u> 2,6 / 0,48	<u>нет</u> 3,2 / 0,23	<u>нет</u> 5,9 / -0,41	<u>нет</u> 7,3 / 0,32	<u>нет</u> 3,9 / 0,9
0,1	<u>нет</u> 1,3 / 0,26	<u>-1,3</u> 1,3 / -0,23	<u>-1,3</u> 1,1 / -0,58	<u>нет</u> 2,5 / 0,48	<u>нет</u> 1,7 / 0,56
0,05	<u>нет</u> 1,2 / 0,1	<u>нет</u> 3,2 / 0,23	<u>-1,3</u> 4,1 / -1,1	<u>нет</u> 2,3 / 0,53	<u>нет</u> 1,8 / 0,35
0,01	<u>нет</u> 0,3 / 0,23	<u>-1,3</u> 0,4 / -0,38	<u>нет</u> 1,1 / -0,37	<u>нет</u> -0,1 / -0,4	<u>нет</u> 0,24 / 0,18
0,001	<u>-1,3</u> -0,1 / 0,16	<u>-1,6</u> -0,08 / 0,25	<u>нет</u> 0,02 / 0	<u>нет</u> 0,1 / 0,2	<u>нет</u> 0,2 / 0,28

Результаты моделирования в большинстве случаев свидетельствуют о несмещенности оценок пеленга. В ситуациях, когда доверительный интервал не покрывает истинное значение, смещение оценки не превышает 1,6 % от ширины главного лепестка ДН антенны основного канала, и им можно пренебречь. При больших интервалах корреляции ОС выборочные распределения заметно отличаются от нормального с большим положительным эксцессом. Значительная часть оценок пеленга группируется возле истинного значения, но одновременно возрастает вероятность значительного (более трех СКО) отклонения оценки от истинного значения.

Заклучение

Приведенный подход и основные расчетные соотношения могут быть очевидным образом преобразованы для двухэтапного квазиоптимального алгоритма оценивания угловых координат при наличии мешающих отражений. При этом мощность нескомпенсированных остатков МО после первого этапа алгоритма следует включить в мощность внутреннего шума и модифицировать основные расчетные соотношения с учетом приема ОС и внешней помехи с учетом весовых коэффициентов устройства череспериодного вычитания.

Полученные выражения могут быть использованы для оценки эффективности квазиоптимальных радиолокационных измерителей в условиях внешних помех и при комплексном моделировании радиолокационных средств с такими измерителями.

Список литературы

1. Козлов С.В., Ву Тхань Ха. Оценивание угловых координат в радиолокационных станциях с подсистемами пространственной компенсации помех. *Доклады БГУИР*. 2019;4:48-56.
2. Козлов С.В., Ву Тхань Ха. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;11:1-29. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.10.
3. Ву Тхань Ха, Козлов С.В. Статистические характеристики обнаружения и оценивания угловых координат целей в обзорных РЛС с многоканальными приемными системами. *Радиолокация, навигация и связь. Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции*. 2019;3:345-355.
4. Ву Тхань Ха, Козлов С.В. Алгоритмы оценивания угловых координат в обзорных РЛС с многоканальными приемными системами. *Радиолокация, навигация и связь. Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции*. 2019;3:102-115.
5. Тихонов В.И. *Статистическая радиотехника*. Москва: Сов. радио; 1966.

References

1. Kozlov S.V., Vu Thanh Ha. [Estimation of angular coordinates in radar stations with subsystems of spatial interference compensation]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;4:48-56. (In Russ.)
2. Kozlov S.V., Vu Thanh Ha. [Algorithms of signal processing in the radar meters of angular coordinates with scanning multi-channel antenna system]. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2019;11:1-29. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.10. (In Russ.)
3. Vu Thanh Ha, Kozlov S.V. [Statistical characteristics of the detection and estimation of angular coordinates targets in surveillance radars with multichannel reception systems]. *Radar, navigation and communication-2019. Proceedings XXV International Scientific and Technical Conference*. 2019;3:345–355. (In Russ.)
4. Vu Thanh Ha, Kozlov S.V. [Algorithms for estimating angular coordinates in review radars with multichannel reception systems]. *Radar, navigation and communication-2019. Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference*. 2019;3:102–115 (In Russ.)
5. Tikhonov V.I. [*Statistical radio engineering*]. Moscow: Sov. radio, 1966. (In Russ.)

Вклад авторов

Козлов С.В. разработал постановку задачи и выполнил анализ полученных результатов.
Ву Тхань Ха разработал методики оценки потенциальной точности пеленгации, получил аналитические выражения для средних квадратических оценок ошибок оценивания угловых координат и выполнил компьютерное моделирование.

Authors' contribution

Kozlov S.V. has developed the problem statement and analyzed the obtained results.
Vu Thanh Ha has developed the techniques for estimating the potential accuracy of direction finding, obtained the analytical expressions for mean quadratic estimates of estimation errors of angular coordinates, and performed computer simulations.

Сведения об авторах

Козлов С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ву Тхань Ха, 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. +375-17-293-89-11;
e-mail: kozlov@bsuir.by
Козлов Сергей Вячеславович

Information about the authors

Kozlov S.V., D.Sci, Associate Professor, Professor of Information Radioengineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Vu Thanh Ha, PG student of Information Radioengineering Department 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
tel. +375-17-293-89-11;
e-mail: kozlov@bsuir.by
Kozlov Sergei Vyacheslavovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-14-19>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 615.831.7; 615.832.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО РЕЖИМА ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРАПИИ*

ВОРОБЕЙ А.В., ОСИПОВ А.Н., ТХОСТОВ М.Х-М., ТЕЛЕШ И.А.

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

Поступила в редакцию 26 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Авторами разработана инфракрасная (ИК) кабина с биотехнической обратной связью, решающая задачи повышения эффективности и безопасности процедуры ИК прогревания. Целевая аудитория для разработанной ИК кабины включает два сегмента: 1) молодые люди, ведущие активный образ жизни (использование ИК кабины в целях оздоровления); 2) люди зрелого и пожилого возраста, в том числе люди с сердечно-сосудистыми заболеваниями (использование ИК кабины с лечебной целью). Проведены исследования по определению эффективного режима воздействия ИК излучения на организм человека. Для оценки эффективности воздействия предложен коэффициент, равный отношению потери веса пользователя к максимальной рабочей температуре воздуха в ИК кабине на уровне тела человека. Установлено, что эффективное прогревание человека происходит при рабочих температурах воздуха внутри ИК кабины (на уровне тела человека) в интервале от 40 до 42 °С. Такой температурный режим уже способствует интенсивному потоотделению, но еще не приводит к дискомфортным ощущениям и нежелательной нагрузке на сердечно-сосудистую систему. Началом ИК прогревания следует считать момент выхода ИК кабины на рабочую температуру 40 °С. На основании мониторинга показателей теплового режима ИК кабины необходимо автоматически поддерживать внутри нее температурный режим от 40 до 42 °С во время периода ИК прогревания. Контроль состояния физиологических параметров пользователя при проведении ИК терапии и автоматическая корректировка мощности ИК излучателей позволят сделать процедуру ИК прогревания безопасной для пользователей. Разработанная ИК кабина может быть использована в санаторно-курортных организациях и учреждениях здравоохранения Республики Беларусь.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, инфракрасная кабина, мониторинг физиологических показателей человека, эффективный режим работы инфракрасной кабины, потоотделение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Воробей А.В., Осипов А.Н., Тхостов М.Х-М., Телеш И.А. Экспериментальное обоснование эффективного режима воздействия инфракрасного излучения на организм человека при проведении инфракрасной терапии. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 14-19.

* Статья рекомендована для опубликования организационным комитетом Белорусско-Китайского конкурса научно-технического творчества студентов (г. Минск, 22 ноября – 27 декабря 2019 г.).

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE EFFECTIVE MODE OF INFRARED RADIATION EXPOSURE ON HUMAN BODY DURING INFRARED THERAPY*

ANASTASIYA V. VOROBAY, ANATOLIY N. OSIPOV, MICHAEL H-M. THOSTOV,
INNA A. TELESH

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

Submitted 26 January 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The authors developed an infrared (IR) cabin with biotechnical feedback, which solves the problems of increasing the efficiency and safety of IR heating procedure. The target audience for the developed IR cabin includes two groups: 1) young people who embrace an active lifestyle (using the IR cabin for health purposes); 2) mature and elderly people, including those with cardiovascular diseases (using the IR cabin for therapeutic purposes). The research conducted determines the effective mode of infrared radiation exposure to a human body. To assess the effectiveness of exposure the authors propose a coefficient equal to the ratio of weight loss of the user to the maximum operating temperature in the infrared cabin at body level. It is established that a person experiences effective heating at the working temperature of air inside the IR cabin (at body level) in the range from 40 to 42 °C. This temperature regime already contributes to intense sweating, but does not yet lead to discomfort and undesirable load on the cardiovascular system. The beginning of the IR heating should be considered the moment when the IR cabin reaches the operating temperature of 40 °C. Based on the monitoring of indicators of the thermal conditions of the IR cabin, it is necessary to automatically maintain the temperature range from 40 to 42 °C during IR heating. Control of the user's physiological parameters during IR therapy and automatic correction of the power of IR radiators will make the IR heating procedure safe for users. The developed IR cabin can be used in health resort and healthcare institutions of the Republic of Belarus.

Keywords: infrared radiation, infrared cabin, near infrared range, monitoring of human parameters, effective operating mode of infrared cabin, sweating.

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

For citation. Vorobay A.V., Osipov A.N., Thostov M. H-M., Telesh I.A. Experimental substantiation of the effective mode of infrared radiation exposure on human body during infrared therapy. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 14-19.

Введение

Инфракрасная кабина предназначена для быстрого, эффективного и глубокого внутреннего прогрева организма человека инфракрасным (тепловым) излучением до интенсивного потоотделения [1]. В табл. 1 представлены существующие аналоги ИК кабины и их характеристики. Недостатками аналогов являются: высокая рабочая температура ИК кабины, отсутствие контроля за состоянием физиологических показателей пользователя, высокое потребление мощности при проведении ИК терапии, преимущественно сидячее положение пользователя при проведении ИК терапии¹.

Коллективом авторов (М.Х-М. Тхостов, А.Н. Осипов, М.М. Меженная, В.Ю. Драпеза, А.В. Воробей) разработана инновационная инфракрасная кабина с биотехнической обратной связью, решающая задачу повышения эффективности и безопасности физиотерапевтической

*The manuscript has been recommended for publication by the Organizing Committee of the Belarusian-Chinese Competition of Scientific and Technical Creativity of Students (Minsk, November 22 - December 27, 2019).

¹ Mezhenneya M.M., Vorobay A.V., Drapeza V.Y., Osipov A.N., Dick S.K., Thostov M. X.-M. Profile Forming of Infrared Cabin User's Biomedical Indicators. ICNBME-2019: 4-я Международная конференция по нанотехнологиям и биомедицинской инженерии. 2019; 77: 421-425.

процедуры ИК прогревания [1]. По сравнению с существующими аналогами разработанная ИК кабина обладает следующими преимуществами: коротковолновой диапазон ИК излучения (0,75–1,5 мкм), низкий рабочий диапазон температур ИК кабины (40–42 °С), низкое энергопотребление (потребляемая мощность составляет 0,4 кВт/ч), автоматическое управление мощностью ИК излучателей на основании регистрации физиологических показателей пользователя в реальном режиме времени [2], удобство конструкции (небольшой вес ИК кабины – 11 кг) [1].

Таблица 1. Существующие аналоги ИК кабины и их характеристики
Table 1. Existing analogues of the infrared cabin and their characteristics

Бренд ИК кабины IR cabin brand	Диапазон ИК излучения, мкм IR radiation range, μm	Рабочая температура, °С Operating temperature, °C	Рабочее положение ИК кабины Operating position of IR cabin	Мощность, Вт Power, W	Контроль теплового режима Thermal conditions control	Контроль состояния человека Monitoring of human state	Размещение человека Position of person
Harvia (Финляндия)	4–17	60	вертикальное	1340–1820	нет	нет	сидя/стоя
WELLNESS (Австрия)	4–17	40–60	вертикальное	1500–1750	нет	нет	сидя/стоя
Balio (Россия)	4–4,5	До 45	вертикальное	550–825	нет	нет	сидя
TW (Германия)	4–4,5	60–65	вертикальное	600–800	автоматический	нет	сидя
Коу (Россия)	2–10	35–50	вертикальное	1500–1820	нет	нет	сидя/стоя
Uborg (Россия)	0,7–3	35–47	вертикальное	1500–1850	нет	нет	сидя/стоя
KLAFS (Германия)	4–4,5	40–45	вертикальное	1280–1900	автоматический	нет	сидя/лежа

С целью результативного прогревания организма человека (для интенсивного выведения токсинов за счет усиленного потоотделения) требуется экспериментально установить эффективный режим воздействия инфракрасного излучения на организм человека с последующей его реализацией в разработанной ИК кабине.

Основные результаты исследований, их научная и практическая значимость

Для исследования воздействия ИК излучения на физиологические параметры человека были проведены три серии экспериментов. В рамках всех экспериментов пользователь размещался в горизонтально расположенной ИК кабине. На теле пользователя фиксировались датчики температуры, пульса и давления для контроля физиологических параметров. Далее выполнялось включение ИК кабины и датчиков теплового режима. В рамках исследования проводились и анализировались следующие процессы: разогрев ИК кабины, собственно ИК прогревание, а также восстановление физиологических показателей пользователя по окончании процедуры. В течение каждого этапа пользователь находился в ИК кабине, выполнялась регистрация параметров теплового режима, а также физиологических показателей человека. До начала и после окончания исследования измерялся вес пользователя для оценки интенсивности потоотделения, что является косвенным показателем эффективности процедуры ИК терапии.

В первой серии экспериментов приняло участие 8 человек (7 мужчин, 1 женщина, средний возраст – 21 год). Суммарное время разогрева ИК кабины и ИК прогревания каждого испытуемого составило 20 минут, при этом температура окружающей среды равнялась 22 °С. Температура воздуха внутри ИК кабины в области тела человека после 10 минут процедуры составляла 37–38 °С, а к концу терапии равнялась 40–42 °С. За время ИК терапии верхнее давление уменьшилось на $4,13 \pm 6,15$ мм.рт.ст., нижнее давление уменьшилось на $13,25 \pm 13,75$ мм.рт.ст. При этом потеря веса составила -368 ± 342 г.

Во второй серии экспериментов участвовало 10 человек (7 мужчин и 3 женщины, средний возраст – 22 года). Суммарное время процедуры каждого испытуемого составило 30 минут, при этом температура окружающей среды равнялась 17 °С. Температура воздуха внутри ИК кабины в области тела человека после 10 минут процедуры составляла 34–36 °С, а к концу терапии равнялась 38–40 °С. За время ИК терапии верхнее давление уменьшилось на $14,57 \pm 14,94$ мм.рт.ст., нижнее давление уменьшилось на $16,00 \pm 9,78$ мм.рт.ст. При этом потеря веса составила всего -93 ± 53 г.

В третьей серии экспериментов участвовало 5 человек (5 мужчин, средний возраст – 22 года). Суммарное время терапии каждого испытуемого составило 50 минут, при этом температура окружающей среды составляла 21 °С. Температура воздуха внутри ИК кабины в области тела человека после 10 минут процедуры составляла 37–38 °С, а к концу процедуры равнялась 40–42 °С. Верхнее артериальное давление уменьшилось на $3,20 \pm 8,96$ мм.рт.ст., а нижнее артериальное давление уменьшилось на $5,40 \pm 11,52$ мм.рт.ст. При этом потеря веса составила -418 ± 171 г, что значительно больше, чем в предыдущих исследованиях.

Для оценки эффективности режима воздействия ИК излучения на организм человека предложен коэффициент K , равный отношению потери веса пользователя ΔW к максимальной рабочей температуре воздуха в ИК кабине на уровне тела человека $T_{\max}^{\text{air near body}}$:

$$K = \frac{\Delta W}{T_{\max}^{\text{air near body}}}.$$

Основные результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные результаты исследований
Table 2. Main research results

Параметры исследований Research parameters		Результаты исследований Research results		
Исследование		1	2	3
Количество испытуемых, человек		8	10	5
Время процедуры, минут		20	30	50
Температура окружающей среды, °С		22	17	21
Рабочий диапазон температуры, °С	После 10 минут	37–38	34–36	37–38
	В конце процедуры	40–42	38–40	40–42
Температура головы (после окончания процедуры), °С		31–32	30,5	29–30,5
Температура человека вдоль туловища (после окончания процедуры), °С		40	38–39	38–39
Вес, г		-368 ± 342	-93 ± 53	-418 ± 171
Давление верхнее, мм.рт.ст.		$-4,13 \pm 6,15$	$-14,57 \pm 14,94$	$-3,20 \pm 8,96$
Давление нижнее, мм.рт.ст.		$-13,25 \pm 13,75$	$-16,00 \pm 9,78$	$-5,40 \pm 11,52$
Пuls, ударов в минуту		$12,63 \pm 9,16$	$14,00 \pm 13,08$	$20,60 \pm 9,29$
Коэффициент эффективности (К), г/°С		8,76	2,33	9,95

Заключение

Авторами разработана ИК кабина с биотехнической обратной связью. Проведены исследования по определению эффективного режима воздействия ИК излучения на организм человека. Для оценки эффективности воздействия предложен коэффициент, равный отношению потери веса пользователя к максимальной рабочей температуре воздуха в ИК кабине на уровне тела человека. По результатам трех серий экспериментов сделаны выводы: эффективное прогревание человека происходит при рабочих температурах воздуха внутри ИК кабины (на уровне тела человека) в интервале от 40 до 42 °С; началом ИК прогревания следует считать момент выхода ИК кабины на рабочую температуру 40 °С; время разогрева (и, соответственно, время выхода на рабочую температуру) зависит от температуры окружающей среды; на основании мониторинга показателей теплового режима ИК кабины

необходимо автоматически поддерживать внутри нее температурный режим от 40 до 42 °С во время периода ИК прогревания; длительность процедуры собственно ИК прогревания определяется врачом, при этом рекомендуемой является длительность в 30 минут; контроль состояния физиологических параметров пользователя при проведении ИК терапии и автоматическая корректировка мощности ИК излучателей позволит сделать ИК терапию безопасной для пользователей. Разработанная ИК кабина может быть использована в санаторно-курортных организациях и учреждениях здравоохранения Республики Беларусь.

Список литературы

1. Осипов А.Н., Тхостов М.Х.-М., Меженная М.М., Давыдов М.В., Драпеза В.Ю., Стетюкевич Н.И., Шевцов В.Ф., Кульчицкий В.А. Инфракрасная кабина с автоматическим управлением параметрами воздействия на основе физиологических показателей пользователя. *Новости медико-биологических наук*. 2017;15:66-71.

References

1. Osipov A.N., Thostov M.X.-M., Mezhenaya M.M., Kulchitsky V.A., Davydov M.V., Kotov D.A., Stetyukevich N.I., Shevtsov V.F., Davydova N.S., Drapeza V.Y. [Infrared cabin with automatic control of exposure parameters based on the physiological parameters of the user]. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk = News of biomedical sciences*. 2017;15:66-71. (In Russ.)

Вклад авторов

Воробей А.В. разработала методики исследований, приняла участие в проведении исследований, анализе результатов, разработке алгоритмов и практических рекомендаций к проведению ИК терапии по результатам исследований.

Осипов А.Н. выполнил постановку задач, научное руководство.

Тхостов М.Х.-М. осуществил технический контроль за проведением исследований.

Телеш И.А. выполнил обобщение и интерпретацию результатов исследований.

Authors' contribution

Vorobey A.V. has developed the methodology of the research, contributed to the research, the analysis of results, the development of algorithms and practical recommendations for conducting IR therapy based on the research results.

Osipov A.N. has set out the problems and acted as a scientific advisor.

Thostov M.H.-M. has carried out technical control over the research.

Telesh I.A. has performed generalization and interpretation of the results.

Сведения об авторах

Воробей А.В., магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Осипов А.Н., к.т.н., доцент, проректор по научной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тхостов М.Х.-М., научный сотрудник кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Телеш И.А. к.г.н., доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Vorobey A.V., master student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Osipov A.N., PhD, Associate Professor, Vice-Rector for Research of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Thostov M.H.-M., Research Associate of Electronic equipment and Technology Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Telesh I.A., PhD, Associate Professor of Human Engineering and Ergonomics 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. : +375-33-670-50-77;
e-mail: vorobey@bsuir.by
Воробей Анастасия Владимировна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-33-670-50-77;
e-mail: vorobey@bsuir.by
Vorobey Anastasiya Vladimirovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-20-27>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 234.538.9116549

ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОСХЕМ ВРЕМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

СОЛОДУХА В.А., ПИЛИПЕНКО В.А., ГОРУШКО В.А.

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

Поступила в редакцию 6 апреля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика при температуре $\sim 1100^\circ\text{C}$ на электрические параметры программируемого временного устройства с коррекцией 512ПС8. В качестве анализируемых параметров данной микросхемы были выбраны пробивное напряжение, ток утечки затвора, величина заряда пробоя подзатворного диэлектрика, а также проведены его термополевые испытания. Пробивное напряжение p -канального тестового транзистора измерялось путем подачи линейной развертки напряжения от 0 до -100 В с шагом $-0,5$ В при заземленных стоке и истоке. Ток утечки затвора $I_{з\text{ут}}$ определялся при напряжении затвора -20 В. Для оценки зарядовых свойств подзатворного диэлектрика приборов проводились термополевые испытания. Для оценки качества и надежности подзатворного диэлектрика проводился контроль заряда пробоя (Q_{bd}). Показано, что быстрая термическая обработка подзатворного диэлектрика при температуре $\sim 1100^\circ\text{C}$ в течение 7 с при наличии его на нерабочей стороне обеспечивает величину заряда пробоя $2,040$ Кл/см², а при его отсутствии – $2,230$ Кл/см², в то время как при стандартном процессе создания данной микросхемы эта величина составляет $1,230$ Кл/см². Это означает, что наиболее эффективное влияние на повышение качества и надежности подзатворного диэлектрика оказывает его быстрая термообработка при отсутствии двуокиси кремния на нерабочей стороне пластины. Проведение такой обработки позволяет, по сравнению со стандартным процессом их изготовления, уменьшить ток утечки затвора в 5,29 раза, зарядовые состояния в 3,50 раза и повысить надежность в 1,07 раза p -канального транзистора, а для n -канального транзистора данные величины составляют 10,67, 3,50 и 1,81 раза соответственно. Установлено, что повышение надежности КМОП микросхем временных устройств при быстрой термообработке подзатворного диэлектрика обусловлено увеличением его заряда пробоя за счет формирования более совершенной микроструктуры диэлектрика, приводящей к перестройке зарядовых состояний как в его объеме, так и на границе с кремнием.

Ключевые слова: быстрый термический отжиг, пробивное напряжение, ток утечки, надежность.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Горушко В.А. Влияние быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры микросхем временных устройств. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 20-27.

INFLUENCE OF THE RAPID THERMAL TREATMENT OF THE GATE DIELECTRIC ON THE PARAMETERS OF INTEGRATED CIRCUITS OF TIME DEVICES

VITALY A. SALADUKHA, VLADIMIR A. PILIPENKO, VALENTINA A. GORUSHKO

JSC "Integral" – "Integral" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 6 April 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper is dedicated to influence of the rapid thermal treatment of the gate dielectric at a temperature of ~ 1100 °C on the electrical parameters of the programmable time device with a correction of 512PS8. As the analyzed parameters of the given integrated circuit, the authors have selected breakdown voltage, gate leakage current, charge value of the gate dielectric breakdown with its thermal field tests performed. The breakdown voltage of the p -channel of the test transistor was measured by applying the linear voltage sweep from 0 to -100 V with the step of $-0,5$ V with the grounded drain and source. The leakage current of the gate $I_{g\text{leak}}$ was determined at the gate voltage of -20 V. For evaluation of the charge properties of the gate dielectric of devices the, the thermal field tests were performed. The quality and reliability of the gate dielectric the authors the breakdown charge control was carried out (Q_{bd}). It is shown that the rapid thermal treatment of the gate dielectric at a temperature of ~ 1100 °C during 7 s with its presence on the non-working side ensures the breakdown charge value of $2,040$ C/cm², and with its absence – $2,230$ C/cm², while during the standard process of creating the given integrated circuit this value constitutes $1,230$ C/cm². This means that the most efficient influence on the improvement of quality and reliability of the gate dielectric is ensured by its rapid thermal treatment when missing the silicon dioxide on the non-working side of the wafer. As compared with the standard process of their fabrication, carrying out such treatment allows 5,29 times reduction of the gate leakage current, 3,50 times reduction of the charge states and 1,07 times enhancement of the reliability of the p -channel transistor, and for the n -channel transistor the given values constitute 10,67, 3,50 and 1,81 times, respectively. It is established that the reliability improvement for the CMOS integrated circuits of time devices during the rapid thermal treatment of the gate dielectric is determined by a step-up of its breakdown charge owing to the more perfect microstructure of dielectric, resulting in the rebuild of the charge states both in the bulk and on the boundary with silicon.

Keywords: rapid thermal annealing, breakdown voltage, leakage current, reliability.

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

For citation. Saladukha V.A., Pilipenko V.A., Gorushko V.A. Influence of the rapid thermal treatment of the gate dielectric on the parameters of integrated circuits of time devices. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 20-27.

Введение

С уменьшением топологических размеров интегральных микросхем повышаются требования к их надежности, которая во многом определяется свойствами и стабильностью параметров диэлектрических слоев. Одной из причин, снижающих надежность изделий электронной техники, является нестабильность зарядовых свойств диэлектрических пленок и их границы раздела с полупроводником. Это в основном связано с использованием в технологическом процессе длительных термических обработок, которые находят широкое применение, в частности, при формировании подзатворного диэлектрика. Существенным недостатком термически выращенного слоя двуокиси кремния относится высокая подвижность в ней ионов, например, Na^+ , K^+ , H^+ [1]. Перемещение ионных загрязнений по толщине диэлектрического покрытия под действием электрического поля и температур $60\text{--}125$ °C в процессе эксплуатации схем приводит к изменению зарядовых свойств диэлектрика, что вызывает отказ микросхем из-за изменения величины порогового напряжения МОП-транзисторов, возникновения токов утечки между активными компонентами в кремнии [2].

Другим недостатком является нестабильность заряда в термически выращенном окисле, связанная с наличием ловушек в объеме, вызывающих захват ими носителей заряда [3].

Среди обработок, вызывающих стабилизацию величины заряда, наибольшее распространение получили низкотемпературные отжиги при 350–550 °С в среде водорода или инертной среде, содержащей пары воды [4]. Атомы водорода во время отжига диффундируют вплоть до поверхности раздела кремний–диоксид кремния, где образуют ковалентные связи с ненасыщенными атомами кремния. Такие обработки стали инструментом целенаправленного изменения характеристик приборов, прежде всего за счет эффективного уменьшения скорости поверхностной генерации и, следовательно, возможности увеличения коэффициента усиления транзистора. Для стабилизации заряда проводится также отжиг в инертной среде при температуре порядка 1100 °С в течение одного часа. Однако в технологии производства СБИС такой отжиг неприемлем из-за чрезмерной разгонки примесей в ранее сформированных в кремнии активных структурах. Тем не менее современный технологический процесс производства СБИС требует решения этой проблемы, так как данный вид нестабильности во многом определяет надежность работы приборов.

Одним из возможных путей улучшения параметров диэлектрических пленок является использование в технологическом процессе создания полупроводниковых приборов и интегральных микросхем быстрых термических обработок, позволяющих на несколько порядков уменьшить время воздействия высоких температур на создаваемые полупроводниковые структуры, тем самым повысить надежность и стойкость изделий электронной техники к дестабилизирующим факторам.

Цель настоящей работы – исследование влияния быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры программируемого временного устройства с коррекцией 512ПС8.

Объекты и методика эксперимента

Для исследования влияния быстрой термообработки подзатворного диэлектрика при температуре ~1100 °С на параметры интегральных микросхем была выбрана микросхема программируемого временного устройства с коррекцией 512ПС8. Данная микросхема предназначена для использования в радиоэлектронной аппаратуре специального назначения. Она имеет в своем составе *p*- и *n*-канальные транзисторы с толщиной подзатворного диэлектрика 75±5 нм и включает в свой состав 1400 элементов, выполненных по КМОП технологии с карманом *p*-типа. Быстрая термическая обработка подзатворного диэлектрика проводилась в естественных атмосферных условиях с нерабочей стороны пластины некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев пластин до температуры ~1100 °С.

В качестве анализируемых параметров данной микросхемы были выбраны пробивное напряжение, ток утечки затвора, величина заряда пробоя подзатворного диэлектрика, а также проведены его термополевые испытания.

Пробивное напряжение и ток утечки затвора определялись на комплексе прецизионных измерений вольт-амперных (*I-V*) и вольт-фарадных (*C-V*) характеристик В1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP ф. Cascade. Пробивное напряжение *p*-канального тестового транзистора измерялось путем подачи линейной развертки напряжения от 0 до –100 В с шагом –0,5 В при заземленных стоке и истоке. Ток утечки затвора $I_{з\text{ут}}$ определялся при напряжении затвора –20 В.

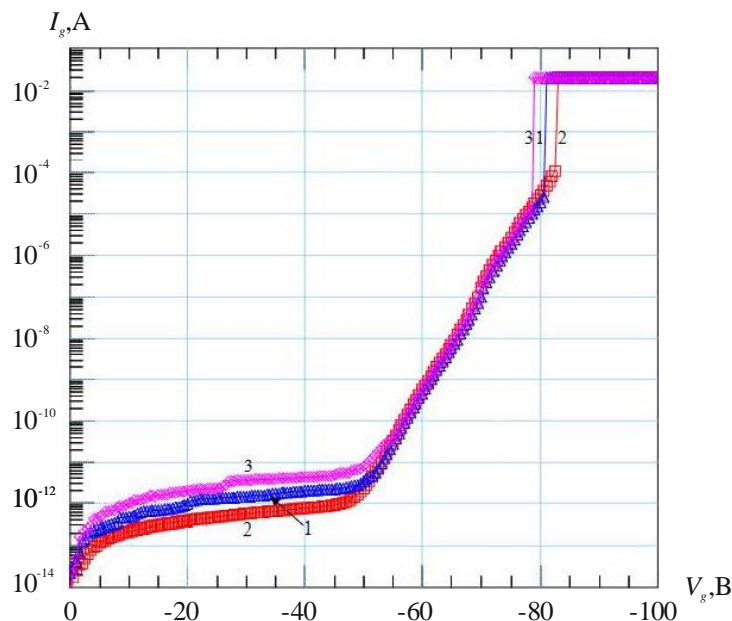
Для оценки зарядовых свойств подзатворного диэлектрика приборов проводились термополевые испытания. На первом этапе в рабочем режиме транзистора определялась исходная допороговая характеристика в триодном включении путем подачи на сток постоянного напряжения –0,1 В и развертки напряжения на затворе от 0 до –3,6 В с шагом –0,02 В относительно истока, закороченного на карман, и фиксировалось напряжение на затворе при токе стока 100 нА. Во время термополевых испытаний на затвор подавалось напряжение 15 В относительно заземленных стока и истока. Далее пластина нагревалась до температуры 200 °С, при которой выдерживалась для установки теплового баланса, после

чего в течение 5 мин на затвор подавалось напряжение 9,5 В при заземленных истоке и стоке, что обеспечивало напряженность поля в подзатворном диэлектрике $E = 2$ МВ/см. При данном поле нагрев отключался и пластина остывала до 40 °С под напряжением 9,5 В и снималась допороговая вольт-амперная характеристика в том же порядке, как и на первом этапе, с фиксацией порогового напряжения (V_{th} тпи). Исходя из измеренных параметров порогового напряжения, рассчитывалось значение сдвига порогового напряжения $\Delta V_{th} \Delta V_{th} = V_{th \text{ тпи}} - V_{th \text{ исх}}$.

Результаты исследования и их обсуждение

Температура кремниевой пластины при быстрой термической обработке (БТО) зависит от качества нерабочей стороны, которая подвергается воздействию некогерентного излучения галогенных ламп. Наличие на ней диэлектрической пленки, которая образуется в процессе формирования подзатворного диэлектрика, будет оказывать влияние на конечную температуру обрабатываемой пластины, а следовательно, на свойства подзатворного диэлектрика. В связи с этим на части пластин перед БТО диэлектрическая пленка с нерабочей стороны удалялась. Далее на пластинах изготавливались p - и n -канальные транзисторы и проводился сравнительный анализ параметров приборов, изготовленных по стандартной технологии и с БТО.

Анализ вольт-амперных характеристик (рис. 1) и полученных на их основании данных (табл. 1) показал, что ток утечки на микросхемах, проходивших обработку подзатворного диэлектрика без удаления SiO_2 с нерабочей стороны пластины, в 2,12 раза меньше, а пробивное напряжение в 1,03 раза выше, чем на микросхемах, изготовленных по стандартной технологии. В случае микросхем, обработанных без наличия SiO_2 на нерабочей стороне пластины, ток утечки подзатворного диэлектрика в 5,29 раза меньше, а пробивное напряжение выше в 1,05 раза. Такое поведение данных параметров в зависимости от наличия диэлектрической пленки с нерабочей стороны пластины и без нее обусловлено различной температурой нагрева пластины в процессе БТО при одинаковых длительностях импульса. В первом случае конечная температура обработки ниже из-за увеличения коэффициента отражения от облучаемой поверхности пластины, что не позволяет достичь структурного совершенства подзатворного диэлектрика и стабилизировать его зарядовые свойства.



1 – с SiO_2 на облучаемой стороне, 2 – без SiO_2 на облучаемой стороне, 3 – стандартная технология

Рис. 1. Вольт-амперные характеристики p -канального транзистора в ИМС 512ПС8, изготовленной с и без БТО подзатворного диэлектрика

1 – with SiO_2 on the irradiated side, 2 – without SiO_2 on the irradiated side, 3 – standard technology

Fig. 1. IV-parameters of the p -channel transistor in IC 512ПС8, fabricated with and without RTT gate dielectric

Таблица 1. Электрические характеристики *p*-канального транзистора в ИМС 512ПС8, изготовленных по стандартной технологии и с применением БТО подзатворного диэлектрика при наличии на нерабочей стороне SiO₂ и без него

Table 1. Electrical characteristics of the *p*-channel transistor in the IMS 512PS8, manufactured according to standard technology and with the use of RTT gate dielectric with and without SiO₂ on the non-working side

Параметры	Тип технологического процесса		
	Стандартный	БТО с SiO ₂	БТО без SiO ₂
Ток утечки затвора, пА	2,01	0,95	0,38
Пробивное напряжение затвора (при $I_3 = 1$ мА), В	-78,53	-80,52	-82,52

Сопоставление результатов измерения термополевой стабильности микросхем 512ПС8 с расчетными значениями сдвига порогового напряжения показало, что данная величина для микросхем, прошедших БТО подзатворного диэлектрика с двуокисью кремния на нерабочей стороне, составляет -4 мВ и -2 мВ без нее, а в случае стандартного процесса – минус 7 мВ. Это означает, что микросхемы, прошедшие БТО подзатворного диэлектрика, имеют более низкое зарядовое состояние по сравнению со стандартным технологическим процессом, который приводит к его активации [5, 6].

Для оценки качества и надежности подзатворного диэлектрика проводился контроль заряда пробоя (Q_{bd}) путем пропускания тока через диэлектрик и фиксации заряда, прошедшего через структуру. Далее строилось распределение Вейбула и определялся пробой по дефектам диэлектрика.

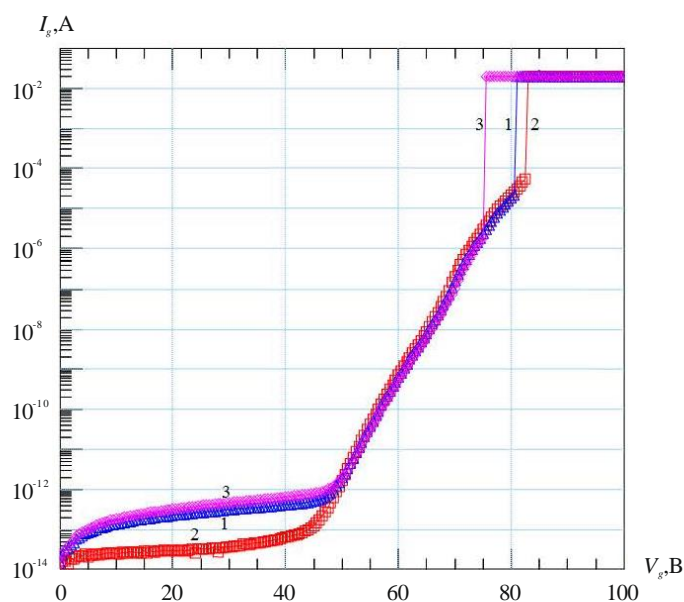
Оценка величины заряда пробоя подзатворного диэлектрика, показала, что проведение БТО подзатворного диэлектрика при его наличии на нерабочей стороне пластины обеспечивает величину заряда пробоя 0,169 Кл/см², а при его отсутствии – 0,237 Кл/см². В то же время на микросхемах, не проходивших БТО подзатворного диэлектрика, значение данной величины составило 0,220 Кл/см². Это означает, что в случае БТО подзатворного диэлектрика без его наличия на нерабочей стороне пластины качество и надежность изготавливаемых на его основе микросхем выше по сравнению со стандартным процессом их изготовления.

Столь низкий заряд пробоя подзатворного диэлектрика при БТО в случае наличия диэлектрика с нерабочей стороны пластины обусловлен более низкой температурой ее нагрева из-за увеличения коэффициента отражения от облучаемой поверхности. При этом разброс толщины окисла по площади пластины приводит к неравномерному ее нагреву, вызывая возникновение более высоких градиентов температуры и рост деформационного потенциала, а следовательно, уменьшение величины заряда пробоя подзатворного диэлектрика по сравнению с его величиной в микросхемах, изготовленных по стандартному технологическому процессу.

Исследования аналогичных параметров были проведены и для *n*-канального транзистора данной микросхемы, за исключением термополевых испытаний подзатворного диэлектрика, которые для данной схемы были проведены ранее на *p*-канальном транзисторе. Измерение порогового напряжения и тока утечки проводилось в тех же режимах, что и для *p*-канального транзистора.

Анализ вольт-амперных характеристик (рис. 2) и полученных на их основании данных (табл. 2) показал, что ток утечки на микросхемах, проходивших обработку подзатворного диэлектрика при его наличии на нерабочей стороне пластины, в 1,45 раза меньше, а пробивное напряжение в 1,07 раза выше, чем на микросхемах, изготовленных по стандартной технологии, а при его отсутствии данные изменения составили 10,67 и 1,10 соответственно [5, 6].

Проведение исследований по влиянию БТО подзатворного диэлектрика *n*-канального транзистора данной микросхемы на величину заряда его пробоя показало, что обработка подзатворного диэлектрика при наличии его на нерабочей стороне обеспечивает величину заряда пробоя 2,040 Кл/см², а при его отсутствии – 2,230 Кл/см², в то время как при стандартном процессе создания данной микросхемы эта величина составляет 1,230 Кл/см². Это означает, что наиболее эффективное влияние на повышение качества и надежности подзатворного диэлектрика оказывает его БТО при отсутствии двуокиси кремния на нерабочей стороне пластины.



1 – с SiO₂ на облучаемой стороне, 2 – без SiO₂ на облучаемой стороне, 3 – стандартная технология
Рис. 2. Вольт-амперные характеристики *n*-канального транзистора в ИМС 512ПС8, изготовленной с и без БТО подзатворного диэлектрика

1 – with SiO₂ on the irradiated side, 2 – without SiO₂ on the irradiated side, 3 – standard technology
Fig. 2. Current-voltage characteristics of the *n*-channel transistor in IMS 512PS8, fabricated with and without RTT gate dielectric

Таблица 2. Электрические характеристики *n*-канального транзистора в ИМС 512ПС8, изготовленных по стандартной технологии и с применением БТО подзатворного диэлектрика при наличии на нерабочей стороне SiO₂ и без него

Table 2. Electrical characteristics of the *n*-channel transistor in the IMS 512PS8 manufactured according to standard technology and with the use of a RTT gate dielectric with and without SiO₂ on the non-working side

Параметры	Тип технологического процесса		
	стандартный	БТО с SiO ₂	БТО без SiO ₂
Ток утечки затвора, пА	0,32	0,22	0,03
Пробивное напряжение затвора (при I ₃ = 1 мА), В	75,03	80,53	82,52

Заключение

Использование в технологическом маршруте создания программируемых КМОП микросхем временных устройств с коррекцией 512ПС8 быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика при температуре ~1100°C без его наличия на нерабочей стороне пластины позволяет, по сравнению со стандартным процессом их изготовления, уменьшить ток утечки затвора в 5,29 раза, зарядовые состояния в 3,50 раз и повысить надежность в 1,07 раза *p*-канального транзистора, а для *n*-канального транзистора данные величины составляют 10,67, 3,50 и 1,81 раза соответственно

Список литературы

1. Акулин С.А., Бордаков Е.В. Методика контроля подвижного заряда в диэлектрических пленках. *Электронная техника*. 1978;3:24.
2. Буйко Л.Д., Овсянников В.А., Ухов В.А., Чигирь Г.Г. Исследование токов утечки биполярных микросхем, обусловленных обогащением поверхности полупроводника. *Электронная техника*. 1978;2:93.
3. Переведенцев А.В., Сопов О.В., Ногин В.М. Новое представление явлений нестабильности порогового напряжения МДП-транзистора при отрицательном напряжении затвора. *Электронная техника*. 1978;5:117.

4. Горбань А.П., Литовченко В.Г., Пейков П.Х. Влияние низкотемпературных обработок на электрические и рекомбинационные свойства систем кремний-двуокись кремния. *Полупроводниковая техника и микроэлектроника*. 1972;10:7.
5. Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Белоус А.И., Ефименко С.А. *Основы силовой электроники*. Москва: Техносфера; 2019.
6. Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Горушко В.А., Филипеня В.А. Влияние быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры микросхем временных устройств. *Современные информационные и электронные технологии Труды XX Международной научно-практической конференции*. 2019;116-117.

References

1. Akulin S.A., Bordakov E.V. [Technique for monitoring a mobile charge in dielectric films]. *Jelektronnaja tehnika = Electronic equipment*. 1978;3:24. (In Russ.)
2. Buyko L.D., Ovsyannikov V.A., Ukhov V.A., Chigir G.G. [Investigation of leakage currents of bipolar microcircuits due to the enrichment of the surface of a semiconductor]. *Jelektronnaja tehnika = Electronic equipment*. 1978;2:93. (In Russ.)
3. Perevedentsev A.V., Sopov O.V., Nogin V.M. [A new representation of the instability of the threshold voltage of an MOS transistor with a negative gate voltage]. *Jelektronnaja tehnika = Electronic equipment*. 1978;5:117. (In Russ.)
4. Gorban A.P., Litovchenko V.G., Peykov P.Kh. [The effect of low temperature treatments on the electrical and recombination properties of silicon-silicon dioxide systems]. *Poluprovodnikovaja tehnika i mikroelektronika = Semiconductor technology and microelectronics*. 1972;10:7. (In Russ.)
5. Solodukha V.A., Pilipenko V.A., Belous A.I., Efimenko S.A. [The basics of power electronics]. Moscow: Technosphere; 2019. (In Russ.)
6. Solodukha V.A., Pilipenko V.A., Gorushko V.A., Filipenya V.A. [The effect of rapid heat treatment of a gate dielectric on the parameters of microcircuits of temporary devices]. *Modern Information and Electronic Technologies. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference*. 2019;116-117. (In Russ.)

Вклад авторов

Солодуха В.А. провел анализ полученных результатов.
Пилипенко В.А. провел исследования электрических параметров микросхемы программируемого временного устройства с коррекцией 512ПС8.
Горушко В.А. подготовила образцы для проведения исследований.

Authors' contribution

Solodukha V.A. has conducted the analysis of the results.
Pilipenko V.A. has studied the electrical parameters of the integrated circuit of the programmable time device with 512PS8 correlation.
Gorushko V.A. has prepared the samples for the research.

Сведения об авторах

Солодуха В.А., к.т.н., генеральный директор ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корр. НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Горушко В.А., ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Information about the authors

Saladukha V.A., PhD, General Manager of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Pilipenka U.A., D.Sci., Professor, Corresponding Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Science Research of the State Centre “Belmicroanalysis” Affiliate RDC “Belmicrosystems” of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Harushka V.A., Leading Engineer of the State Centre “Belmicroanalysis” Affiliate RDC “Belmicrosystems” of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company..

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121 А,
ОАО «Интеграл» – управляющая компания
холдинга ОАО «Интеграл»
тел. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Пилипенко Владимир Александрович

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa str., 121 A,
JSC “Integral” – “Integral” Holding
Managing Company
tel. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Pilipenko Vladimir Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-28-35>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.312.6

ДЕЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В n-Si ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

ДАНИЛЮК А.Л.¹, ТРАФИМЕНКО А.Г.¹, ФЕДОТОВ А.К.², ПРИЩЕПА С.Л.¹

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

²Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 30 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Приводятся данные измерений транспортных свойств Si, легированного Sb, в температурном диапазоне 1,9–3,0 К и при плотностях токов $J < 0,2$ А/см². На основе анализа вольт-амперных характеристик получены значения сопротивления при разных плотностях токов. Обнаружено, что с увеличением тока изменяется знак температурного коэффициента сопротивления. При значениях $J < 0,045$ А/см² температурный коэффициент сопротивления положительный, а с превышением плотности тока значения 0,045 А/см² он становится отрицательным. Для объяснения этого токового кроссовера в знаке температурного коэффициента сопротивления были проведены холловские измерения при температуре 2 К, позволившие определить значения концентрации носителей заряда и их подвижность. На основе этих измерений и с учетом модели концентрационной нестабильности были получены токовые зависимости таких параметров, описывающих электрический транспорт в полупроводниках, как энергия активации, неравновесная концентрация носителей заряда, подвижность и время рассеяния электронов проводимости. В результате проведенного анализа было установлено, что изменение знака температурного коэффициента сопротивления с ростом тока можно объяснить обменом электронами между верхней зоной Хаббарда, формирующейся за счет захвата инжектируемых электронов нейтральными атомами примеси, и краем зоны проводимости. При этом происходит делокализация электронных состояний с ростом тока. Полученные данные хорошо согласуются с выдвинутой гипотезой. Проведено рассмотрение возможных механизмов делокализации путем анализа времени рассеяния электронов. В результате установлено, что электрон-электронные взаимодействия, вызванные кулоновским потенциалом, являются доминирующими.

Ключевые слова: токовая нестабильность, делокализация, верхняя зона Хаббарда, температурный коэффициент сопротивления.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Данилюк А.Л., Трафименко А.Г., Федотов А.К., Прищеп С.Л. Делокализация электронных состояний в n-Si при низких температурах. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 28-35.

DELOCALIZATION OF ELECTRON STATES IN n-Si AT LOW TEMPERATURES

ALEXANDER L. DANILYUK¹, ANTON G. TRAFIMENKO¹, ALEXANDER K. FEDOTOV²,
SERGHEJ L. PRISCHEPA¹

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

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

Submitted 30 January 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. We report on the electric transport properties of Si heavily doped with Sb in the temperature range of 1.9 – 3.0 K and at current density of $J < 0.2$ A/cm². Based on the analysis of the current – voltage characteristics, the resistance values at different current densities are obtained. It was found that an increase in current changes the sign of the temperature coefficient of resistance. At $J < 0,045$ A/cm², the temperature coefficient of resistance is positive, whereas when the current density exceeds the value of 0,045 A/cm² it becomes negative. To explain this current crossover in the sign of the temperature coefficient of resistance, we performed Hall measurements at a temperature of 2 K, which allowed us to determine the values of the concentration of charge carriers and their mobility. Based on these measurements and taking into account the concentration instability model, we obtained current dependences of the parameters describing the electric transport in semiconductors, such as activation energy, non-equilibrium concentration of charge carriers, mobility, and scattering time of conduction electrons. As a result of the analysis, it was found that the change in the sign of the temperature coefficient of resistance with an increase in current can be explained by the exchange of electrons between the upper Hubbard band, formed by the capture of injected electrons by neutral impurity atoms, and the edge of the conduction band. In this case, delocalization of electronic states occurs with an increase in current. The data obtained are in good agreement with the proposed hypothesis. Possible delocalization mechanisms are considered by analyzing the electron scattering time. As a result, it was found that electron-electron interactions caused by the Coulomb potential are dominant.

Keywords: current instability, delocalization, upper Hubbard band, temperature coefficient of resistance.

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

For citation. Danilyuk A.L., Trafimenko A.G., Fedotov A.K., Prischepa S.L. Delocalization of electron states in n-Si at low temperatures. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 28-35.

Введение

Исследование транспортных свойств в легированном Si и наноструктур на основе Si очень важно для кремниевой наноэлектроники, квантовых вычислений, энергонезависимой памяти и логики с малой потребляемой мощностью и энергией переключения [1]. Значительное развитие получили такие наноструктуры, как спиновые транзисторы [2], логические вентили [3], наноструктуры с единичными атомами легирующей примеси [4]. Для достижения дальнейшего прогресса кремниевой наноэлектроники одним из эффективных путей является адаптация нелинейных процессов. В частности, использование эффекта отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) при малых значениях напряженности электрического поля E является одним из перспективных подходов для проектирования новых электронных устройств [5]. Для более глубокого понимания физики возникновения ОДС при малых значениях E необходимо проанализировать процессы, предшествующие области ОДС. В данной работе, основываясь на токовых и температурных зависимостях сопротивления, полученных из вольтамперных характеристик (ВАХ), $R(J) = dE/dJ$, проанализированы различные электрофизические параметры, позволяющие обсудить механизмы возникновения токовой нестабильности и изменения знака температурного коэффициента сопротивления (ТКС) в области ВАХ, предшествующей ОДС.

Результаты

Образцы представляли собой пластины монокристаллического Si, легированного Sb (10^{18} см^{-3}). Для проведения транспортных и холловских измерений использовались припаянные индиевые омические контакты. Образцы помещались в криогенную вставку (Cryogenic Ltd., London) со сверхпроводящим магнитом. Подробнее детали эксперимента описаны в работах [5, 6].

На вставке к рис. 1 показаны низкотемпературные ВАХ, на которых видна область токовой неустойчивости, предшествующая ОДС. При понижении температуры область, предшествующая ОДС, расширяется, ВАХ приближаются к оси E и вытягиваются вдоль нее. На основе измеренных ВАХ были построены зависимости $R(J)$ при разных температурах. Они приведены на рис. 1. Очевидно, что ТКС меняет свой знак, с отрицательного при $J \leq 0,045 \text{ А/см}^2$ до положительного при $J \geq 0,045 \text{ А/см}^2$.

В области, близкой к току перехода к ОДС, были проведены холловские измерения. Они показали, что при $J = 0,02 \text{ А/см}^2$ и $T = 2 \text{ К}$ концентрация электронов проводимости составляет $n = (6 \pm 0,75) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, их подвижность равна $\mu \approx 15,4 \pm 2,3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а время рассеяния $\tau \approx 2 \text{ фс}$.

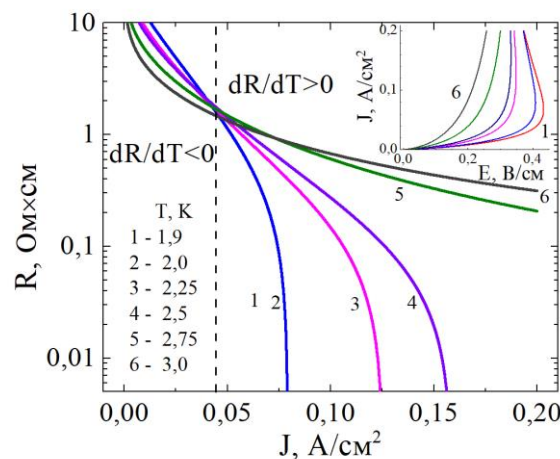


Рис. 1. Зависимости $R(J)$ при разных температурах. Вертикальная штриховая линия разделяет области с разными знаками ТКС. На вставке показаны измеренные ВАХ

Fig. 1. $R(J)$ dependencies at different temperatures. The vertical dashed line separates regions with different signs of the TCR. The inset shows the measured current-voltage characteristics

Обсуждение

Обнаруженный кроссовер в знаке ТКС при росте тока свидетельствует о следующих физических процессах. На начальных участках ВАХ механизм переноса заряда в основном активационного типа вследствие захвата носителей заряда нейтральными D^0 состояниями нижней зоны Хаббарда и их трансформации в D^- состояния верхней зоны Хаббарда (ВЗХ) [6]. В этом случае наблюдается отрицательный ТКС [5, 6]. Рост тока сопровождается резким уменьшением R и кроссовером к положительному знаку ТКС. Подобный кроссовер указывает на возможное изменение механизма переноса заряда, от активационного по локализованным D^- состояниям до делокализованного по зоне проводимости. При этом смена механизма обусловлена увеличением концентрации носителей заряда, инжектируемых в образец. Достижение определенного значения неравновесной концентрации может служить триггером для делокализации D^- состояний вследствие кулоновского взаимодействия.

Для подтверждения этих качественных рассуждений авторами был проведен количественный анализ данных. Поскольку вблизи области ОДС R резко уменьшается, то и энергия активации ε_a должна уменьшаться. Поэтому была применена модель концентрационной нестабильности в полупроводниках [7]. В рамках этой модели предполагается, что рост концентрации электронов проводимости приводит к уменьшению ε_a ,

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a0} - (n/n_k)kT, \quad (1)$$

где n_k – концентрация, при которой энергия активации уменьшается на kT . Из уравнения (1) можно получить токовые зависимости $\varepsilon_a(J)$. Этот результат представлен на рис. 2. Видно, что характер токовой зависимости энергии активации различается для $J < 0,055 \text{ A/cm}^2$ и $J > 0,06 \text{ A/cm}^2$. Более сильное снижение ε_a с ростом тока в первой области при $T = 3 \text{ K}$ сменяется более сильным снижением во второй области уже при $T = 1,9 \text{ K}$.

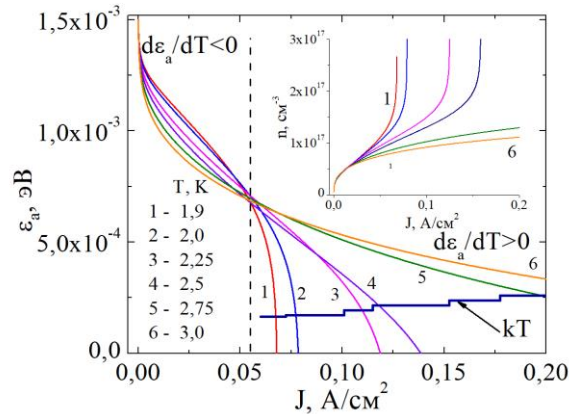


Рис. 2. Зависимости $\varepsilon_a(J)$ при разных температурах. Вертикальная штриховая линия разделяет области с разными знаками $d\varepsilon_a/dT$. На вставке показаны зависимости $n(J)$

Fig. 2. $\varepsilon_a(J)$ dependencies at different temperatures. The vertical dashed line separates regions with different signs of the $d\varepsilon_a/dT$. The inset shows the $n(J)$ dependencies

Из анализа уравнения (1) получили отношение $n/n_k = 2,78 \pm 0,6$ при $J = 0,02 \text{ A/cm}^2$ и $T = 2 \text{ K}$. Исходя из экспериментально определенной из холловских измерений концентрации n , рассчитано $n_k = (2,5 \pm 0,45) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, что позволило получить значения n при разных J . Этот результат показан на вставке к рис. 2. Полученные $R(J)$ и $n(J)$ зависимости позволили установить изменение подвижности μ и времени рассеяния электронов τ с током. Этот результат приведен на рис. 3. Видно, что μ растет с ростом J , несмотря на рост n . Это обусловлено более резким падением R с ростом J по сравнению с увеличением концентрации с током. Особенно хорошо это видно при $T = 1,9 \text{ K}$, при которой резкий рост μ наблюдается при меньших значениях J по сравнению с более высокими температурами. Время рассеяния составляет $1,5 \text{ fs}$ при $J = 0,02 \text{ A/cm}^2$, зависит от T и увеличивается до 1 ps с ростом тока. Такое изменение τ указывает на изменение механизма рассеяния при приближении к области ОДС.

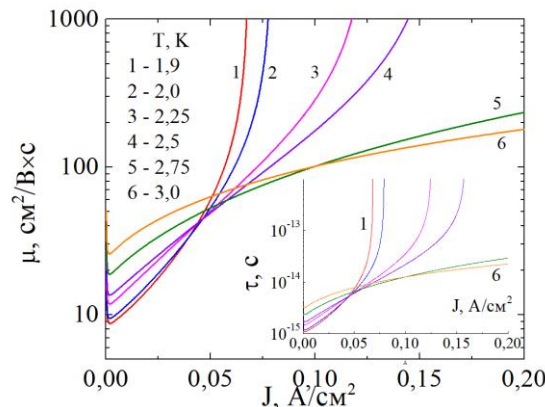


Рис. 3. Зависимость μ от J при разных T . На вставке показана зависимость τ от J

Fig. 3. μ versus J at different T . The inset shows τ versus J

Полученные токовые зависимости ε_a , n , μ и τ свидетельствуют о том, что наиболее вероятный механизм токовой нестабильности вблизи области ОДС – кулоновское отталкивание между электронами D⁻ состояний и зоны проводимости. Вследствие этого взаимодействия в ВЗХ и в зоне проводимости возникает флуктуирующий потенциал. Как результат, эти зоны перекрываются в соответствии с моделью [7]. Ниже будут рассмотрены более подробно механизмы такого уширения зон.

С микроскопической точки зрения перекрывание зон может быть описано на основании следующих рассуждений. Электроны D⁻ состояний обладают конечной энергией связи ε_a . В системе с хаотически распределенными кулоновскими зарядами всегда найдутся такие D⁻ состояния, чья энергия кулоновского взаимодействия с другими электронами на D⁻ состояниях и/или электронами из зоны проводимости превысит энергию ε_a . В этом случае электрон с D⁻ состояния перейдет в минимум потенциала на краю зоны проводимости. Рассматривая лишь попарное взаимодействие, концентрацию таких электронов n_{ic} можно оценить из выражения $n_{ic} = \int_{\varepsilon_n}^{\infty} q(\varepsilon) d\varepsilon$, где $q(\varepsilon)$ – плотность числа D⁻ состояний, электроны

которых испытывают кулоновское взаимодействие ε с соседями [8]. Для рассматриваемой системы мы определили, что $q(\varepsilon) = 4\pi\xi n_t(n_t+n)r^2(dr/d\varepsilon)$, где n_t – концентрация D⁻ состояний, $\varepsilon = (2q/kr)\exp(-\beta r)$, k – абсолютная диэлектрическая проницаемость Si, β – обратная длина экранирования, ξ – коэффициент, учитывающий отношение между электронами на D⁻ состояниях и электронами проводимости, $\xi = 1 - (1/2)/\{1 + \exp[(n-n_t)/n_{t0}]\}$, n_{t0} – параметр уширения перехода от $n < n_t$ к $n > n_t$. При $n < n_t$, $\xi = 1/2$, в то время как при $n > n_t$, $\xi \rightarrow 1$. Оценки изменения отношения n_{ic}/n_t с концентрацией n при $T = 1,9-2,5$ К показали, что оно изменяется в пределах 15–20 % для $J < 0,06$ А/см², а при $J = 0,06 - 0,08$ А/см² оно возрастает почти до 100 %.

На основе полученных зависимостей $n(J)$ были оценены время жизни электронов относительно захвата на D⁰ центры с концентрацией N_{D0} и концентрация n_t таких электронов (т. е. концентрация D⁻ состояний). Время жизни определялось из выражения $\tau_{if} = 1/(R_n N_{D0})$ [13], где R_n – скорость захвата. С учетом уравнения баланса для n_t получаем

$$\tau_{if} = \frac{1}{R_n N_d} \left(1 + \frac{n R_n}{G} \right), \quad (2)$$

где N_d – концентрация доноров, $G = G_0 \exp(-\varepsilon_a/kT)$ – вероятность генерации электрона с D⁻ состояния в зону проводимости, G_0 – частотный фактор, определяющий вибрационный спектр примесного центра. Для Sb в Si $G_0 = (2 - 3) \times 10^{13}$ Гц [10]. Для оценки скорости захвата на D⁰ центры применяли модель захвата электрона на водородоподобный нейтральный донор с испусканием акустического фонона [11]. Поскольку отрицательно заряженный D⁻ центр существует только в синглетном состоянии, то при отсутствии поляризации свободных носителей заряда и примесных центров захват может осуществляться только в одной четверти общего количества актов столкновения, что приводит к следующему выражению [11]:

$$R_n = \zeta \frac{\pi^3}{16l_n} \left(\frac{2\varepsilon_a}{m_d} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h}{2\pi m_d s} \right)^3 \psi(\varepsilon_a), \quad (3)$$

где $\zeta = 1,1$, l_0 – длина свободного пробега электрона, s – скорость звука в Si, m_d – масса плотности состояний, а волновая функция $\psi(\varepsilon_a) = \frac{4}{\pi^2} \left[\arctan(\chi^{-1}) + \chi / (\chi^2 + 1) \right]^2$, $\chi = (2m_d s^2 \varepsilon_a)^{1/2} / (\varepsilon_a + \varepsilon_n)$, где ε_n – термическая энергия электронов. Полученная зависимость $\tau_{if}(n)$ приведена на рис. 4. Параметры модели захвата электронов на нейтральной примеси в Si были: $\varepsilon_n = (0,214 - 0,27)$ мэВ, $m_d = 0,33m_0$, $s = 9,15 \times 10^5$ см/с, $l_0 = 7,5 \times 10^{-4}$ см [11]. Из рис. 4 видно, что время жизни слабо зависит от J и T вплоть до $J \approx 0,055$ А/см². При более высоких J

значения τ_{lf} увеличиваются в несколько раз. Это соответствует уменьшению скорости захвата на состояниях в ВЗХ. На вставке к рис. 4 показана зависимость $n_t(J)$. При низких плотностях токов концентрация D^- состояний максимальна, что подтверждает доминирование механизма захвата инжектированных электронов с образованием D^- состояний в ВЗХ. С ростом J наблюдается снижение n_t . Особенно заметным этот процесс становится вблизи перехода к области ОДС. Эффект температуры проявляется в том, что при низких T концентрация n_t выше при малых токах, а резкое снижение величины n_t с ростом тока сменяется на более плавное уменьшение с ростом температуры. Подобное поведение коррелирует с уменьшением активационной энергии при росте J и свидетельствует о том, что делокализация D^- состояний становится более очевидной со снижением температуры, поскольку концентрационная неустойчивость происходит при меньших J . Полученные зависимости $n_t(J)$ однозначно указывают на то, что токовые зависимости электрофизических параметров коррелируют с перераспределением электронов между ВЗХ и зоной проводимости. Это соотношение меняется с ростом тока и переходом в область ОДС.

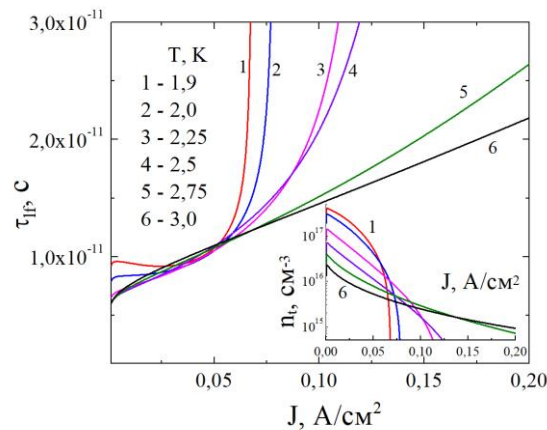


Рис. 4. Зависимость τ_{lf} от J при разных температурах. На вставке показана зависимость n_t от J
Fig. 4. τ_{lf} versus J at different T . Inset: n_t versus J at different T

Для того чтобы идентифицировать механизм электронного рассеяния, авторами был проведен анализ времени рассеяния (время релаксации импульса) τ . Установлено, что электроны проводимости в рассматриваемом случае обладают малой энергией (характерное значение тепловой энергии составляет $\epsilon_n < 0,3$ мэВ). Кроме того, вследствие низкой энергии связи D^- состояний локализованные электроны характеризуются относительно большим боровским радиусом, равным 8,5 нм. В этой связи разумно предположить, что основным механизмом рассеяния электронов на D^- состояниях есть электрон-электронное рассеяние. Особенностью данного механизма является тот факт, что электроны проводимости термализованы, а электроны D^- состояний связаны. С учетом этого была выбрана модель столкновения электрона со стационарной мишенью [12] с численными поправками [13]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{nq^4L}{4 \times 2^{3/2} \pi k^2 m_n^2 \epsilon_n^{3/2}}, \quad (4)$$

где q – заряд электрона, m_n – эффективная масса электрона проводимости, L – функция, зависящая от тепловой энергии электрона и длины экранирования. Было получено, что время рассеяния составляет 1–3 фс, что находится в хорошем согласии с экспериментальными данными. С ростом J растет и время рассеяния τ из-за падения концентрации D^- центров. При $J > 0,05$ А/см², когда τ увеличивается до 40–60 фс, происходит изменение механизма рассеяния – доминирующим становится рассеяние на нейтральных центрах.

Заключение

В работе продемонстрировано, что в некомпенсированном Si отрицательный ТКС обусловлен активационным механизмом, в то время как положительный ТКС вызван уменьшением подвижности электронов вследствие увеличения количества центров рассеяния, соответствующих D⁻ состояниям. Указанные эффекты обусловлены зарядовой нестабильностью, управляемой током. Полученные результаты перспективны для создания новых энергоэффективных элементов логики на основе кремниевых наноструктур.

Список литературы / References

1. Dobrosavljević V., Trivedi N., Valles J.M.Jr. *Conductor-Insulator Quantum Phase Transitions*. Oxford University Press; 2012.
2. Huang B., Monsma D.J., Appelbaum I. Experimental Realization of a Silicon Spin Field-Effect Transistor. *Appl. Phys. Lett.* 2007;91(7):072501. DOI: 10.1063/1.2770656.
3. Dery H., Dalal P., Cywiński Ł., Sham L.J. Spin-Based Logic in Semiconductors for Reconfigurable Large-Scale Circuits. *Nature*. 2007;447:573-576. DOI: 10.1038/nature05833.
4. Moraru D., Udhiarto A., Anwar M., Nowak R., Jablonski R., Hamid E., Tarido J.C., Mizuno T., Tabe M. Atom Devices Based on Single Dopants in Silicon Nanostructures. *Nanoscale Res. Lett.* 2011;6(1):479. DOI: 10.1186/1556-276X-6-479.
5. Danilyuk A.L., Trafimenko A.G., Fedotov A.K., Svito I.A., Prischepa S.L. Negative Differential Resistance in n-Type Noncompensated Silicon at Low Temperature. *Appl. Phys. Lett.* 2016;109(22):222104. DOI: 10.1063/1.4968825.
6. Danilyuk A.L., Trafimenko A.G., Fedotov A.K., Svito I.A., Prischepa S.L. Low Temperature Conductivity in n-Type Noncompensated Silicon below Insulator-Metal Transition. *Adv. Cond. Matt. Phys.* 2017;2017:5038462. DOI: 10.1155/2017/5038462.
7. Sandomirskii V.B., Sushanov A.A., Zdan A.G. [Phenomenological Theory of Concentration Instability in Semiconductors]. *Sov. Phys. JETP*, 1970;31(5):902-907. (in Russ.) Сандомирский В.Б., Сушанов А.А., Ждан А.Г. Феноменологическая теория концентрационной нестабильности в полупроводниках. *ЖЭТФ*. 1970;58(5):1683-1694.
8. Petrov P.V., Ivanov Yu.L., Averkiev N.S. [Spin and Charge Effects due to Positively Charged Acceptors in GaAs/AlGaAs Quantum Wells]. *Low Temp. Phys.* 2015;41(2):90-97. DOI: 10.1063/1.4913583. (in Russ.) Петров П.В., Иванов Ю.И., Аверкиев Н.С. Спиновые и зарядовые явления, связанные с положительно заряженными акцепторами в квантовых ямах GaAs/AlGaAs. *Физика низких температур*. 2015;41(2):119-128.
9. *Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices*. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons; 1981.
10. Pajot B., Kauppinen J., Anttila R. High Resolution Study of the Group V Impurities Absorption in Silicon. *Sol. St. Comm.* 1979;31(10):759-763. DOI: 10.1016/0038-1098(79)90784-1.
11. Abakumov V.N., Perel V.I., Yassievich I.N. *Nonradiative Recombination in Semiconductors, Modern Problems in Condensed Matter Sciences*, Vol. 33, edited by Agranovich V.M. and Maradudin A.A. North Holland, Amsterdam; 1991.
12. Ridley B.K. *Quantum Processes in Semiconductors*. Clarendon Press, Oxford; 1982.
13. Abrahams E. Electron-Electron Scattering in Alkali Metals. *Phys. Rev.* 1954;95(3):839-840. DOI: 10.1103/PhysRev.95.839.

Вклад авторов

Данилюк А.Л. обосновал применимость физических моделей, провел расчеты электрофизических параметров и их токовые зависимости в исследованных образцах, интерпретировал полученные результаты.

Трафименко А.Г. провел анализ вольт-амперных характеристик, определил их аналитический вид, принял участие в моделировании электрофизических параметров.

Федотов А.К. провел измерения электрофизических свойств, рассчитал концентрацию и подвижность электронов из холловских измерений, а также принимал участие в обсуждении результатов и построении физических моделей.

Прищепка С.Л. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принимал участие в интерпретации результатов.

Authors' contribution

Danilyuk A.L. has substantiated the applicability of physical models, performed calculations of electrophysical parameters and their current dependences in the studied samples, and interpreted the obtained results.

Trafimenko A.G. has carried out analysis of current voltage characteristics, determined their analytical expression, participated in simulation of the electrophysical parameters.

Fedotov A.K. has carried out measurements of electrophysical properties, calculated the concentration and mobility of electrons from the Hall measurements, and participated in the discussion of the results and the elaboration of physical models.

Prischepa S.L. has set out the problems to be solved during the research and participated in the interpretation of the results.

Сведения об авторах

Данилюк А.Л., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры микро- и нанозлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Трафименко А.Г., младший научный сотрудник Центра нанозлектроники и новых материалов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Федотов А.К., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики перспективных материалов Института ядерных проблем Белорусского государственного университета.

Прищепа С.Л., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры защиты информации 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. +375-17-293-23-17;
e-mail: prischepa@bsuir.by
Прищепа Сергей Леонидович

Information about the authors

Danilyuk A.L., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Trafimenko A.G., Junior Researcher of Center of Nanoelectronics and Novel Materials of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Fedotov A.K., D.Sci., Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Physics of Prospective Materials, Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Prischepa S.L., D.Sci., Professor, Professor of Information Security Department 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
tel. +375-17-293-23-17;
e-mail: prischepa@bsuir.by
Prischepa Serghej Leonidovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-36-41>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 615.831.7; 615.832.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ СПЕКЛ-ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ДИАГНОСТИКЕ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ БИОТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА*

КИШКЕВИЧ И.В., РУНКЕВИЧ Е.Н., МЕЖЕННАЯ М.М., КАЛИЛЕЦ Т.В.,
ЛАЦЕТКО Р.А., ДИК С.К.

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

Поступила в редакцию 31 января 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В современной клинической практике крайне актуальны оценка состояния микроциркуляции крови и диагностика микроциркуляторных расстройств при самых различных заболеваниях: в кардиологии, диабетологии, при онкологии, в дерматологии, стоматологии, хирургии и реаниматологии. Расстройства микроциркуляции весьма разнообразны как по своему патогенезу, так и по клиническим проявлениям. Поэтому в клинике различных заболеваний и экстремальных состояний, а также при коррекции микроциркуляторных нарушений необходимы методы как оперативной оценки состояния кровотока на тканевом уровне, так и длительного его мониторинга. Интерес к исследованию микрососудистого русла системы кровообращения обусловлен значительной ролью капилляров в осуществлении основных процессов жизнедеятельности организма, в трофическом обеспечении органов и их непосредственном участии в тканевом и клеточном дыхании. От согласованной работы сердца, крупных кровеносных магистралей и сосудов микроциркуляции в целом зависят здоровье и продолжительность жизни человека. Авторами изучены современные оптические методы диагностики микроциркуляции. Обоснована целесообразность применения метода спекл-визуализации для неинвазивной экспресс-оценки состояния микроциркуляторного русла поверхностных биотканей человека. Для реализации метода спекл-визуализации разработано методические и программное обеспечение. Экспериментально обоснованы параметры обработки, наиболее оптимальные с точки зрения соотношения пространственно-временного разрешения и времени вычислений. Целью данной работы является экспериментальная апробация разработанного методического и аппаратного обеспечения спекл-визуализации для диагностики микроциркуляции поверхностных биотканей человека. Проведены исследования состояния микроциркуляции в поверхностных сосудах кожи при прохождении физиотерапевтических процедур и при имитации патологии. Результаты проведенных исследований доказали целесообразность использования разработанного программного обеспечения для качественной диагностики состояния микроциркуляции поверхностных биотканей человека: выявлены первичные изменения в микроциркуляции, обеспечена визуализация дальнейших изменений, происходящих в процессе прохождения физиотерапевтических процедур.

Ключевые слова: микроциркуляция крови, кровоток, спекл-визуализация, спекл-изображение, контраст, неинвазивная диагностика, перфузия тканей.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

* Статья рекомендована для опубликования организационным комитетом Белорусско-Китайского конкурса научно-технического творчества студентов (г. Минск, 22 ноября – 27 декабря 2019 г.).

Для цитирования. Кишкевич И.В., Рункевич Е.Н., Меженная М.М., Калилец Т.В., Лащетко Р.А., Дик С.К. Экспериментальная апробация методических и аппаратно-программных средств спекл-визуализации в диагностике микроциркуляции поверхностных биотканей человека. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 36-41.

EXPERIMENTAL APPROBATION OF METHODOLOGICAL AND HARDWARE-SOFTWARE SPECK-VISUALIZATION IN DIAGNOSIS OF MICROCIRCULATION OF HUMAN SURFACE BIOLOGICAL TISSUES*

INNA V. KISHKEVICH, KATERINA N. RUNKEVICH, MARINA M. MEZHENNAYA,
TATYANA V. KALILEC, RUSLAN A. LASCHETKO, SERGEI K. DZIK

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

Submitted 31 January 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. In modern clinical practice, the assessment of the state of blood microcirculation and the diagnosis of microcirculatory disorders are extremely relevant in a variety of diseases: in cardiology, diabetology, oncology, dermatology, dentistry, surgery and resuscitation. Microcirculatory disorders are very diverse both in their pathogenesis and in clinical manifestations. Therefore, in the pattern of various diseases and extreme conditions, as well as in the correction of microcirculatory disorders the methods are needed for both operative assessment of the state of blood flow at tissue level and for its long-term monitoring. The interest in the study of the microvascular bed of the circulatory system is sparked by the significant role of capillaries in the implementation of the basic processes of the body's vital activity, in the trophic support of organs and their direct participation in tissue and cellular respiration. The health and life expectancy of a person depend on the coordinated work of the heart, large blood lines, and microcirculation vessels. The authors have studied modern optical methods for diagnosing microcirculation. The feasibility of using the speckle imaging method for noninvasive rapid assessment of the state of the microvasculature of human surface biological tissues has been substantiated. To implement the speckle-visualization method, methodological and software have been developed. The processing parameters that are most optimal from the point of view of the ratio of spatio-temporal resolution and computation time have been experimentally substantiated. The purpose of this work is the experimental testing of the developed methodological and hardware speckle imaging for the diagnosis of microcirculation of human surface biological tissues. The authors have carried out the studies of the state of microcirculation in the superficial blood vessels of the skin during physiotherapeutic procedures and in the imitation of pathology. The results of the studies have proved the feasibility of using the developed software for a high-quality diagnosis of the state of microcirculation of human surface biological tissues: primary changes in microcirculation are revealed, further changes to occur during physiotherapeutic procedures are visualized.

Keywords: blood microcirculation, bloodstream, speckle visualization, speckle image, contrast, tissue perfusion.

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

For citation. Kishkevich I.V., Runkevich E.N., Mezhennaya M.M., Kalilec T.V., Laschetko R.A., Dzik S.K. Experimental approbation of methodological and hardware-software speck-visualization in diagnosis of microcirculation of human surface biological tissues. Doklady BSUIR. 2020; 18(3): 36-41.

Введение

Для реализации метода спекл-визуализации авторами разработано методическое и аппаратно-программное обеспечение (рис. 1) [1]. Экспериментально обоснованы параметры

*The manuscript has been recommended for publication by the Organizing Committee of the Belarusian-Chinese Competition of Scientific and Technical Creativity of Students (Minsk, November 22 - December 27, 2019).

обработки. Наиболее показательными параметрами обработки являются: пространственная обработка с размером окна 5×5 ; временная обработка с количеством кадров, равным 21; пространственно-временная обработка в кубе $5 \times 5 \times 7$ [2]. В целом пространственная обработка имеет существенный недостаток – она уменьшает пространственное разрешение спекл-изображений. Временная обработка подходит для идентификации движущихся частиц, т. е. для оценки общего уровня микроциркуляции в исследуемой области, а пространственно-временная передает топологию поверхностных кровеносных сосудов.

Основные результаты исследований, их научная и практическая значимость

С целью выявления изменений в состоянии микроциркуляции в норме и при патологии были проведены исследования кровотока на основе метода спекл-визуализации при механических повреждениях поверхностных тканей. Имитацией патологии послужило механическое воздействие (нанесение царапин) на выделенные участки (размер 40×40 мм) поверхностных тканей испытуемых. В испытаниях приняли участие 10 человек: 4 женщины, 6 мужчин. Средний возраст 22 года. Регистрировалось исходное состояние микроциркуляции исследуемых участков кожи (0 мин), после завершения сеанса (10 мин) и спустя 20 мин. Наблюдались визуальные изменения на исследуемых участках после нанесения механических повреждений. Полученные спекл-изображения (рис. 1) показывают, что ведущей реакцией микроциркулярного кровотока в условиях дисфункции кожи явилось снижение интенсивности микроциркуляции, связанное с процессом гемостаза (свертывание крови).

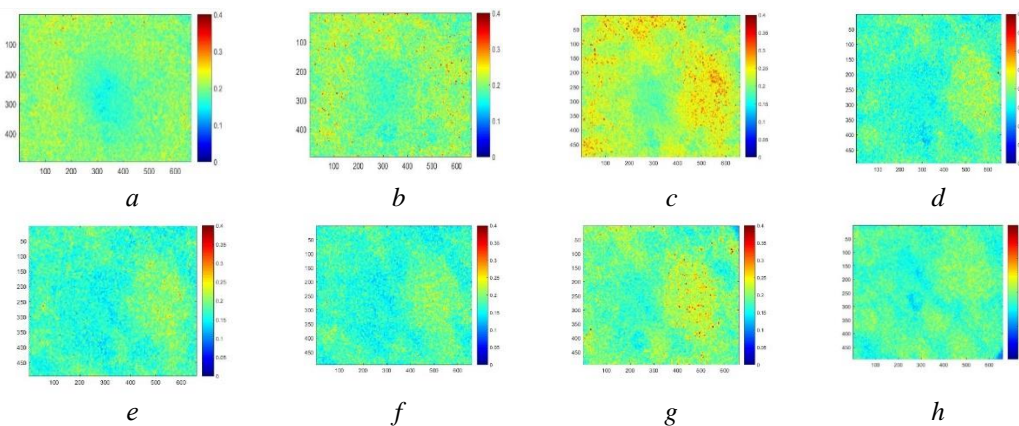


Рис. 1. Спекл-изображения микроциркуляции испытуемого В (участок кожи запястье), полученные в результате пространственно-временной обработки, до нанесения повреждений (а), непосредственно после нанесения повреждений (б), через 5 мин после нанесения повреждений (с), через 10 мин после нанесения повреждений (д), через 15 мин после нанесения повреждений (е), через 20 мин после нанесения повреждений (ф), через 25 мин нанесения повреждений (г), через 30 мин после нанесения повреждений (h)

Fig. 1. Speckle images of microcirculation obtained as a result of spatio-temporal processing of test subject B (wrist skin area) before damage (a), immediately after damage (b), 5 min after damage (c), 10 min after application damage (d), 15 minutes after causing damage (e), 20 minutes after causing damage (f), after 25 minutes of causing damage (g), after 30 minutes of causing damage (h)

Исследования состояния микроциркуляции человека при проведении физиотерапевтических процедур проводились на базе инфракрасной (ИК) камеры для низкоинтенсивного воздействия на тело человека. В испытаниях приняли участие 15 человек: 9 женщин, 6 мужчин. Средний возраст 22 года. Объектом исследования являлся участок кожи на запястье и ладони правой руки пациента в форме квадрата 40×40 мм. Расстояния от источника света, а также от объектива камеры до исследуемого участка составляли 400 мм. Продолжительность сеанса составила 30 мин. Температура внутри кабины во время сеанса составляла 39°C . Регистрировалось исходное состояние микроциркуляции исследуемых участков кожи (0 мин), после завершения сеанса (5, 10, 15 мин) и спустя 20 минут. Визуальных изменений на исследуемых участках после проведения процедуры не наблюдалось.

Полученные спекл-изображения показывают, что ведущей реакцией микроциркулярного кровотока в условиях гипертермии явилась его выраженная интенсификация (рис. 3).

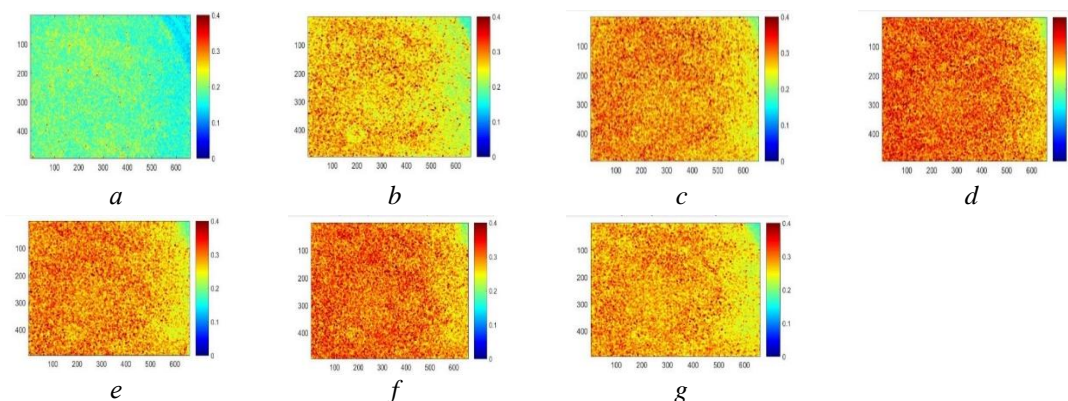


Рис. 2. Спекл-изображения микроциркуляции испытуемого А (участок кожи запястье), полученные в результате пространственно-временной обработки, до проведения сеанса ИК терапии (а), непосредственно после окончания сеанса ИК терапии (b), через 5 мин после окончания сеанса ИК терапии (c), через 10 мин после окончания сеанса ИК терапии (d), через 15 мин после окончания сеанса ИК терапии (e), через 20 мин после окончания сеанса ИК терапии (f), через 25 мин после окончания сеанса ИК терапии (g)

Fig. 2. Speckle images of microcirculation obtained as a result of spatio-temporal processing of test subject A (wrist skin area) before the IR therapy session (a), immediately after the end of the IR therapy session (b), 5 minutes after the end of the IR therapy session (c), 10 minutes after the end of the IR therapy session (d), 15 minutes after the end of the IR therapy session (e), 20 minutes after the end of the IR therapy session (f), 25 minutes after the end of the IR therapy session (g)

В табл. 1, 2 представлены значения среднего контраста испытуемых В, А.

Таблица 1. Значение среднего контраста испытуемого В (на участке кожи запястье) при имитации патологии
Table 1. The value of the average contrast of test subject B (on the wrist) at simulating pathology

До нанесения механических повреждений	Непосредственно после нанесения механических повреждений	Через 5 мин после нанесения механических повреждений	Через 10 мин после нанесения механических повреждений	Через 15 мин после нанесения механических повреждений	Через 20 мин после нанесения механических повреждений	Через 25 мин после нанесения механических повреждений	Через 30 мин после нанесения механических повреждений
0,198	0,2	0,223	0,176	0,173	0,172	0,193	0,179

Таблица 2. Значение среднего контраста испытуемого А (на участке кожи запястье) при проведении инфракрасной терапии

Table 2. The value of the average contrast of the test subject A (on the wrist) at infrared therapy

До проведения ИК терапии	Непосредственно после окончания сеанса ИК терапии	Через 5 мин после окончания сеанса ИК терапии	Через 10 мин после окончания сеанса ИК терапии	Через 15 мин после окончания сеанса ИК терапии	Через 20 мин после окончания сеанса ИК терапии	Через 25 мин после окончания сеанса ИК терапии
0,186	0,263	0,284	0,303	0,286	0,299	0,276

Заключение

Разработанное авторами методическое и аппаратно-программное обеспечение спекл-визуализации апробировано в двух сериях экспериментов по оценке состояния кровотока поверхностных тканей человека: исследование кровотока на основе метода спекл-визуализации при механических повреждениях поверхностных тканей; исследование кровотока при инфракрасной терапии. В результате исследований кровотока при механических

повреждениях поверхностных тканей установлено, что ведущей реакцией микроциркулярного русла в условиях дисфункции кожи явилось снижение интенсивности микроциркуляции, что согласуется с протекающими процессами гемостаза (свертывание крови). В результате исследований кровотока при инфракрасной терапии установлено, что ведущей реакцией микроциркулярного русла явилась его выраженная интенсификация, что отвечает условиям гипертермии.

На основании проведенных исследований доказана целесообразность применения разработанного устройства спекл-визуализации для быстрой неинвазивной диагностики микроциркуляции поверхностных тканей, включая получение оптических изображений интенсивности поверхностного кровотока и количественную его оценку на основе автоматического расчета контраста спекл-картин.

Список литературы

1. Дик С.К., Гордейчук Т.В., Завацкий Д.А., Мелик-Касумов Т.Б., Павлють Т.О., Счастливая Н.И., Рункевич Е.Н., Кишкевич И.В. Диагностика микроциркуляции поверхностных биотканей при артрите на основе метода динамического измерения биоспеклов. *Доклады БГУИР*. 2016;7(101).
2. Меженная М.М., Рункевич Е.Н., Кишкевич И.В., Калилец Т.В., Дик С.К., Лихачевский Д.В., Лащетко Р.А. Расчет контраста спекл-изображений: методическое обеспечение и программная реализация. *Доклады БГУИР*. 2018;7(117).

References

1. Dzik S.K., Gordeychuk T.V., Zavatsky D.A., Melik-Kasumov T.B., Pavlyut T.O., Schastnaya N.I., Runkevich E.N., Kishkevich I.V. [Diagnosis of microcirculation of surface biological tissues in arthritis based on the method of dynamic measurement of bio-speckles]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2016;7(101). (in Russ.)
2. Mezhennaya M.M., Runkevich E.N., Kishkevich I.V., Kalilets T.V., Dzik S.K., Likhachevsky D.V., Lashetko R.A. [Calculation of the contrast of speckle images: methodological support and software implementation]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2018;7(117). (in Russ.)

Вклад авторов

Кишкевич И.В. разработала методическое обеспечение для анализа спекл-изображений.
Рункевич Е.Н. провела исследование кровотока на основе метода спекл-визуализации при механических повреждениях поверхностных тканей.

Меженная М.М. руководила разработкой программного обеспечения для анализа спекл-изображений.

Калилец Т.В. руководила проведением исследований, разработала аппаратно-программные средства для их проведения, выполнила анализ результатов.

Лащетко Р.А. выполнил обработку данных.

Дик С.К. сформулировал задачу, подлежащую решению в процессе исследования.

Authors' contribution

Kishkevich I.V. has developed methodological support for speckle image analysis.

Runkevich E.N. has conducted the study of blood flow based on speckle imaging for mechanical damage to surface tissues.

Mezhennaya M.M. led the development of speckle image analysis software.

Kalilec T.V. led the research, developed hardware and software for their conduct, and performed the analysis of their results.

Lashetko R.A. has performed data processing.

Dzik S.K. has formulated the problem to be solved in the research.

Сведения об авторах

Кишкевич И.В., магистр техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Рункевич Е.Н., инженер кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Меженная М.М., к.т.н., доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Калилец Т.В., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лашетко Р.А., магистрант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дик С.К., к.ф.м., 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.: +375-29-660-73-37;
e-mail: kishkevich.inna@gmail.com
Кишкевич Инна Вячеславовна

Information about the authors

Kishkevich I.V., master of Engineering and Technology of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Runkevich E.N., Electronics Engineer of Engineering Psychology and Ergonomics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Mezhennaya M.M., PhD, Associate Professor of Engineering Psychology and Ergonomics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kalilec T.V., PG student of Engineering Psychology and Ergonomics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Laschetko R.A., master student of Electronic Technics and Technology Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dzik S.K., PhD, Associate Professor 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
tel.: +375-29-660-73-37;
e-mail: kishkevich.inna@gmail.com
Kishkevich Inna Vyacheslavovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-42-48>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 532.51::62-45

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ДВУХМАСШТАБНЫХ ОКСИДНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ*

БАГЛОВ А.В., ХОРОШКО Л.С., ЯЦКЕВИЧ П.А.

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

Поступила в редакцию 12 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Фотокаталитически активные материалы являются весьма востребованными в свете современных тенденций повышения экологичности процессов производства и жизнедеятельности. Эффективными фотокатализаторами являются оксиды некоторых металлов (титана, вольфрама, цинка и др.), которые могут быть получены электрохимическими методами. Дополнительное использование фотолитографии с целью создания на поверхности фотокатализатора неровностей с заданной конфигурацией повышает эффективность очистки водных растворов под воздействием ультрафиолетового и видимого излучения. Целью данной работы является исследование влияния структурирования подложки на скорость протекания потока жидкости в ее присутствии в рамках модельного эксперимента. Моделирование в программном пакете *COMSOL Multiphysics*[®] проводили методом конечных элементов в приближении абсолютно несжимаемой жидкости и k - ϵ модели турбулентности. Полученные результаты позволили прогнозировать повышение эффективности фотокаталитической очистки воды в проточной системе в присутствии фотокатализатора с поверхностью, содержащей конфигурационные элементы в виде ребер с зазорами. Оптимальные размеры ребер по результатам оценки скорости потока жидкости и области эффективного перемешивания составили: высота ребра $h = 0,25$ – 1 мм, ширина ребра $w = 1$ мм, межреберный зазор $g = 5$ мм. Миллиметровый диапазон размеров конфигурационных элементов делает их изготовление более простым по сравнению с элементами микронных и субмикронных размеров и способствует расширению вариантов применяемых технологий для получения фотокаталитически активных подложек. Помимо фотолитографии и электрохимических методов также возможно использование химического травления и золь-гель технологии для получения комбинированных фотокатализаторов с заданной конфигурацией поверхности.

Ключевые слова: фотокатализ, структурирование, моделирование, поверхность, проточный реактор, очистка воды.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Баглов А.В., Хорошко Л.С., Яцкевич П.А. Оптимизация конфигурации двухмасштабных оксидных структур для фотокаталитических приложений. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 42-48.

* Статья рекомендована для опубликования организационным комитетом Белорусско-Китайского конкурса научно-технического творчества студентов (г. Минск, 22 ноября – 27 декабря 2019 г.).

OPTIMIZATION OF TWO-SCALE OXIDE STRUCTURE CONFIGURATION FOR PHOTOCATALYTIC APPLICATIONS*

ALEKSEY V. BAGLOV, LIUDMILA S. KHOROSHKO, PAVEL A. YATSKEVICH

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

Submitted 12 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Photocatalytic active materials are very popular in the modern trend of increasing the environmental friendliness of production processes and vital activities. Effective photocatalysts are the oxides of certain metals (titanium, tungsten, zinc, etc.), which can be obtained by electrochemical methods. The additional use of photolithography to force irregularities on the surface of the photocatalyst with a given configuration increases the efficiency of purifying aqueous solutions under the influence of ultraviolet and visible radiation. The purpose of this work is to study the effect of substrate structuring on the liquid flow as part of a model experiment. Modeling in the *COMSOL Multiphysics*® software package was performed using the finite element method in the approximation of an absolutely incompressible fluid and a $k-\varepsilon$ turbulence model. The results obtained made it possible to increase the efficiency of photocatalytic water purification in a flow system in the presence of a photocatalyst with a surface containing configuration elements in the form of ribs with gaps. The optimal dimensions of the ribs according to the results of estimating the liquid flow rate and the region of effective mixing were: rib height $h = 0.25-1$ mm, rib width $w = 1$ mm, intercostal gap $g = 5$ mm. The millimeter range of configuration elements' dimensions makes their manufacture simpler in comparison with the elements of micron and submicron dimensions and helps to expand the options for the technologies used to produce photocatalytic active substrates. In addition to photolithography and electrochemical methods, it is also possible to use chemical etching and sol-gel technology to obtain combined photocatalysts with a given surface configuration.

Keywords: photocatalysis, structuring, modeling, surface, flow reactor, water purification.

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

For citation. Baglov A.V., Khoroshko L.S., Yatskevich P.A. Optimization of two-scale oxide structure configuration for photocatalytic applications. *Doklady BGUIR*. 2020; 18(3): 42-48.

Введение

Фотокаталитическая очистка воды от органических загрязнений удерживает интерес многих исследователей в течение ряда последних лет. С точки зрения реализации процесса очистки привлекательно применение иммобилизованных фотокатализаторов, формируемых в виде пленок на различных подложках, поскольку такой способ исключает последующую фильтрацию растворов от частиц фотокатализатора после проведения фотокатализа. Широкий ряд оксидных соединений проявляет фотокаталитическую активность в сочетании с возможностью их формирования золь-гель методом и методом электрохимического анодирования [1–3].

Конфигурация поверхности играет значительную роль в эффективности разложения загрязняющих агентов на пленочных иммобилизованных фотокатализаторах, формируемых золь-гель методом. За счет микроструктурирования поверхности подложки можно дополнительно увеличить эффективную площадь формируемого золь-гель методом покрытия. Микроструктурирование подложек пористого анодного оксида алюминия с использованием фотолитографии и анизотропного химического травления позволяет увеличить фотокаталитическую эффективность формируемых на них ксерогелей диоксида титана в несколько раз [4].

*The manuscript has been recommended for publication by the Organizing Committee of the Belarusian-Chinese Competition of Scientific and Technical Creativity of Students (Minsk, November 22 - December 27, 2019).

В проточных системах очистки воды с принудительной накачкой важно учитывать эффект взаимодействия потока жидкости со структурой фотокатализатора на подложке, поскольку конфигурация последнего влияет на скорость потока жидкости у поверхности фотокатализатора. Если в системе не будет обеспечиваться перемешивание жидкости в области протекания фотоиндуцированных химических реакций, которая локализована вблизи поверхности фотокатализатора, то эффективность всей системы будет значительно снижена. К сожалению, в литературе содержится недостаточно сведений об особенностях взаимодействия фотокатализатора с потоком жидкости.

Как правило, на практике используются системы с иммобилизованным микро- и наноструктурированным фотокатализатором, величина неоднородностей поверхности которого много меньше толщины протекающего потока жидкости и сравнима с той областью, в которой протекают фотоиндуцированные реакции. В таких двухмасштабных системах важно исследовать закономерности и свойства взаимодействия потоков жидкости с неоднородностями фотокатализатора, а также установить их взаимосвязь с глобальными гидродинамическими свойствами системы в целом. Понимание особенностей фотокатализа для двухмасштабных структур особенно актуально при практическом использовании микро- и наноструктурированных фотокатализаторов. В данной работе авторы исследовали двумерную модель фотокатализатора на подложке, взаимодействующего с принудительно подаваемым потоком жидкости в реактор, как в ранее опубликованной работе [5], где была предложена конструкция лабораторного макета.

Методика проведения эксперимента

В предлагаемой модели фотокатализатор представляет собой сплошную массивную плоскую подложку, поверхность которой модифицирована таким образом, что на ней сформирован массив выступающих элементов – ребер – прямоугольного профиля. Подложка вставляется в паз держателя на дне реактора таким образом, что только ребра выступают над держателем и взаимодействуют с потоком жидкости (рис. 1). Подобную структуру фотокатализатора можно получить как направленным электрохимическим окислением, например, титана, через маску, полученную с применением фотолитографии, так и золь-гель методом путем последовательного наращивания слоев через аналогичную маску либо на предварительно структурированной подложке. В качестве параметров моделирования использовались следующие величины: высота ребра h , ширина ребра w и зазора между ними g . Толщина потока жидкости равна высоте реакционной камеры и составляет 10 мм, скорость потока жидкости на входе 0,5 м/с. Численное моделирование проводилось методом конечных элементов в приближении абсолютно несжимаемой жидкости и k - ϵ модели турбулентности, реализованных в модуле «Вычислительная гидродинамика» программного пакета *COMSOL Multiphysics*[®]. Модель k - ϵ является широко используемой в прикладной научной и инженерной работе для моделирования потока вблизи плохо обтекаемого тела. В ней вводятся два дополнительных уравнения, связанных с кинетической энергией турбулентности k и скоростью диссипации этой энергии ϵ . Буферный слой при этом не моделируется, скорость потока у стенки описывается пристеночными функциями. Программная реализация данной модели обладает высокой сходимостью и малыми требованиями к памяти. Данная модель оптимальна для рассмотрения задач внешнего обтекания жидкостью тел со сложной геометрией поверхности, таких как рассматриваемая подложка.

Следует отметить, что свойства потока жидкости, такие как скорость и давление, во всех зазорах практически одинаковы. Так как между скоростью и давлением существует сильная прямая корреляция с коэффициентом, близким к 1, для анализа достаточно использовать лишь один параметр – скорость. Для оценки будем использовать значения скорости потока жидкости через сечение, проходящее через центр зазора, ближайшего к центру камеры, на уровне половины высоты ребра и на высоте ребра. Дополнительно определим высоту влияния ребер на поток жидкости, которая представляет собой расстояние в миллиметрах от дна зазора до точки, где скорость потока составляет 80 % начальной скорости. Также определим максимальную скорость потока и область ее локализации.

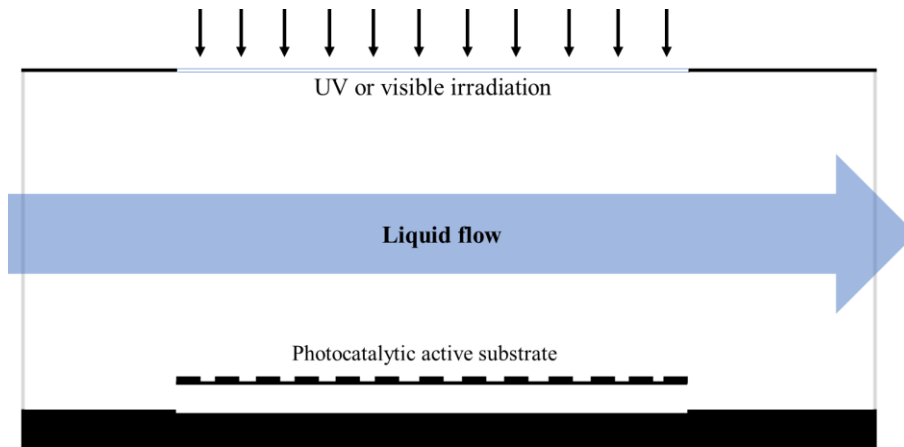


Рис. 1. Схема тестирования фотокаталитической активности
Fig. 1. Photocatalysis activity testing scheme

Результаты и их обсуждение

Добавление фотокатализатора в систему приводит к значительной перестройке структуры потока жидкости (рис. 2). Без преград в виде ребер фотокатализатора скорость потока жидкости, даже в пристеночных областях, составляет не менее 0,3 м/с. Добавление фотокатализатора приводит искривлению потока жидкости и созданию избыточного давления на верхнюю стенку. Скорость потока жидкости возрастает на 10–20 % с одновременной потерей аксиальной симметрии. Толщина потока, имеющего максимальную скорость, составляет 3–4 мм и зависит от высоты ребер и ширины зазора между ними. Верхняя сторона ребер фотокатализатора остается в области с достаточной скоростью потока жидкости, большей чем 0,1 м/с. Однако, несмотря на то что вклад верхней грани в общую площадь фотокатализатора меньше, чем вклад боковых стенок ребер и зазора, следует отдельно учитывать геометрию потока жидкости в межреберных зазорах (рис. 2, *b*). При выбранной форме профиля ширина ребра не оказывает значимого влияния на движение жидкости, так как в этом случае важна форма профиля и высота. На этом основании было зафиксировано значение ширины ребер на величине 1 мм. Результаты моделирования протекания жидкости при фиксированных значениях h и w и варьировании ширины зазора в диапазоне 1–5 мм с шагом 1 мм представлены в табл. 1.

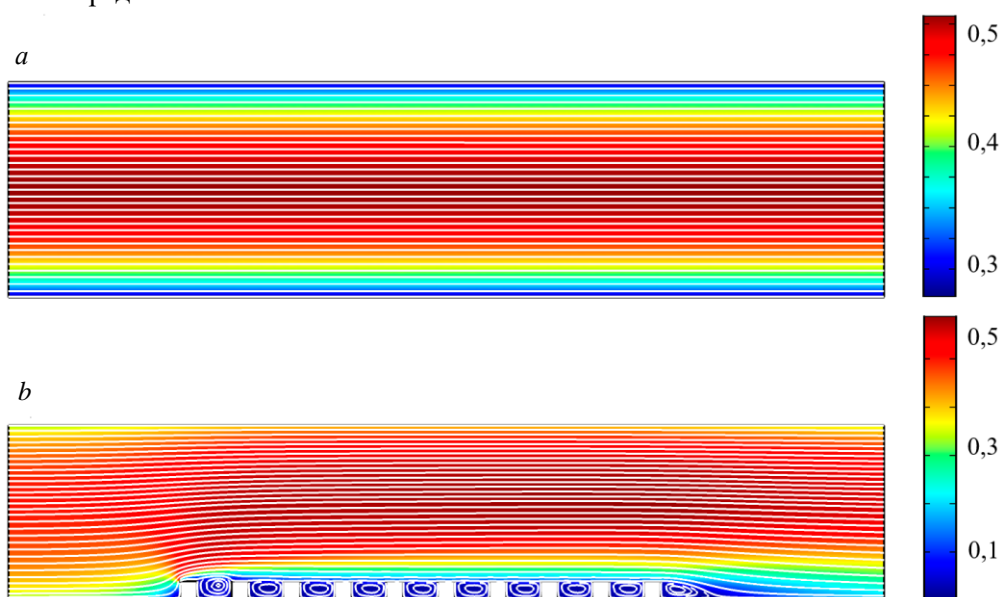


Рис. 2. Конфигурация потока жидкости: *a* – исходная; *b* – при введении структурированной подложки
Fig. 2. The configuration of liquid flow: *a* – initial; *b* – with insertion of a structured substrate

Результаты приведены для ребер с параметрами $h = 1$ мм и $h = 0,25$ мм, $w = 1$ мм, поскольку промежуточные значения для высот ребра 0,75 и 0,5 мм подтверждают тенденцию к увеличению скорости протекания жидкости в межреберном зазоре.

Согласно полученным результатам, скорость потока жидкости в центральной точке межреберного пространства меняется слабо, но возрастает при ширине зазора 3–5 мм, что объясняется появлением более сложной структуры распределения скоростей движения жидкости (рис. 3). Хорошо заметно, что с увеличением ширины зазора с 1 до 5 мм происходит образование областей с низкой скоростью и областей с высокой скоростью протекания жидкости. В то же время влияние массива ребер на движение потока воды в целом практически отсутствует, так как максимальная скорость потока жидкости (около 0,6 м/с) локализована в области толщиной около 3 мм и свойственна всем исследованным случаям. Для экономии материала целесообразно использовать ребра меньшей высоты, тем не менее более высокие ребра также не замедляют глобально процесс протекания жидкости.

Таблица 1. Параметры потока жидкости в условиях протекания над массивом ребер шириной $w = 1$ мм и различной высотой h и величиной межреберного зазора g

Table 1. Liquid flow parameters under conditions when flow over the ribs array with wide $w = 1$ mm and of various heights h and interribs gap g

Ширина межреберного зазора g , мм	Скорость потока на высоте половины ребра, м/с	Скорость потока на высоте ребра, м/с	Высота влияния массива ребер, мм	Максимальная скорость потока, м/с	Положение области с максимальной скоростью, мм
Для ребер $h = 1$ мм					
1	0,017	0,090	2,2	0,58	4,6–7,1
2	0,020	0,110	2,3	0,58	4,2–7,5
3	0,012	0,115	2,4	0,59	4,2–7,9
4	0,018	0,116	2,6	0,60	4,9–7,3
5	0,032	0,121	2,7	0,60	4,9–7,6
Для ребер $h = 0,25$ мм					
1	0,020	0,061	1,4	0,53	3,7–6,9
2	0,057	0,087	1,6	0,54	3,9–6,9
3	0,087	0,110	1,7	0,54	3,9–6,9
4	0,110	0,130	1,7	0,54	3,8–6,8
5	0,128	0,148	1,8	0,54	3,8–6,8

В случае ребра с высотой 1 мм скорость потока жидкости изменяется неравномерно, что может быть связано с особенностями методики измерений, так как при близких параметрах ребра и межреберного зазора в зазоре образуются области с низкой подвижностью, локализованные вблизи центра зазора. С увеличением ширины зазора области смещаются по ходу прокачки жидкости и ближе к основанию зазора (рис. 3, *c*). Уменьшение высоты ребер фотокатализатора уменьшает неоднородность потока жидкости, что положительно сказывается на эффективности работы насоса в такой системе, предотвращая чрезмерный износ ввиду повышения усилий накачки. Учитывая, что обычно фотоактивация химических реакций происходит рассеянным светом, когда боковые стенки ребер также участвуют в процессе очистки жидкости, рационально использовать структуры с небольшой высотой ребер и зазором между ними, в 3–5 раз большими, чем высота. Следует отметить, что данное правило вполне может работать и в случае ребер микронного и субмикронного размера, однако, подтверждение этого является одной из задач дальнейших исследований.

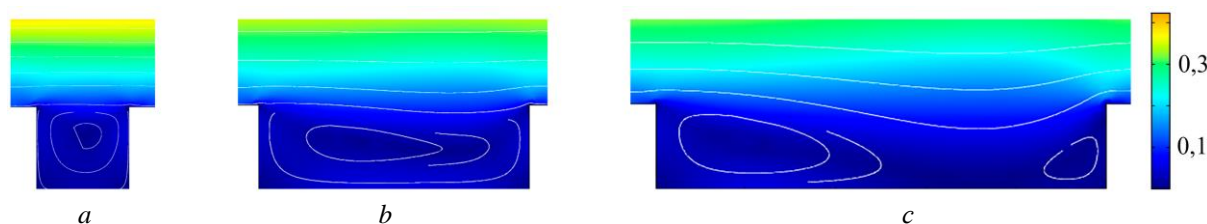


Рис. 3. Эволюция строения потока жидкости в зависимости от ширины зазора: $a - 1$ мм; $b - 3$ мм; $c - 5$ мм

Fig. 3. Evolution of liquid flow depending on the gap width: $a - 1$ mm; $b - 3$ mm; $c - 5$ mm

Заключение

Моделирование потоков жидкости в присутствии фотокатализатора с прямоугольным профилем поверхности, высотой ребер 0,25–1 мм и шириной межреберного зазора 1–5 мм показало, что наиболее перспективным является использование структур с меньшей высотой ребра и межреберным зазором, в 3–5 раз превышающим высоту ребра, так как в этом случае внутри зазора образуется усложненная структура потока, обеспечивающая большую эффективность фотокатализатора за счет улучшенной конвекции загрязнителя в реакционном слое вблизи поверхности фотокатализатора.

Анализ структур с различной конфигурацией поверхности показал сравнимую эффективность влияния на перемешивание равнозначных потоков жидкости турбулентностей, появляющихся на микроструктурированных подложках с ширинами прямоугольных выступов и расстоянием между ними порядка нескольких миллиметров. Оптимальными параметрами ребер для структурированной поверхности являются следующие: высота ребра $h = 0,25–1$ мм, ширина ребра $w = 1$ мм, межреберный зазор $g = 5$ мм. Очевидно, что подобная конфигурация может быть получена с применением фотолитографии и электрохимического анодирования фотокаталитически активных металлов, таких как титан и др. Миллиметровый размер ребер позволяет также изготавливать фотокаталитически активные подложки с применением золь-гель метода. В этом случае на предварительно структурированную алюминиевую подложку наносится золь или суспензия, содержащая фотокатализатор [6]. Такие структуры демонстрируют также антибактериальную активность и могут быть использованы в лабораторных проточных системах очистки воды.

Список литературы

1. Баглов А.В., Шевцова Т.А., Хорошко Л.С., Дудчик Н.В., Дроздова Е.В., Борисенко В.Е. Формирование иммобилизованного наноструктурированного диоксида титана, обладающего антибактериальными свойствами. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2019;63(2):157-163. DOI: 10.29235/1561-8323-2019-63-2-157-163.
2. Linnik O., Khoroshko L. Non-Porous Nitrogen and Ruthenium Co-Doped Titania Films for Photocatalysis. *International Journal of Nanoscience*. 2019;18(3-4):194043-1-194043-5. DOI: 10.1142/S0219581X1940043X.
3. Zhou X., Liu N., Schmuki P. Photocatalysis with TiO₂ nanotubes: “colorful” reactivity and designing site-specific photocatalytic centers into TiO₂ nanotubes. *ACS Catalysis*. 2017;7(5):3210-3235. DOI: 10.1021/acscatal.6b03709.
4. Khoroshko L., Gaponenko N., Krutko E., Kulak A. Photocatalytic activity of TiO₂ and SrTiO₃ xerogels embedded in porous anodic alumina. in *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. Editors: Borisenko V.E., Gaponenko S.V., Gurin V.S., Kam C.H. Singapore:World Scientific Publ. 2015:377-380. DOI: 10.1142/9789814696524_0092.
5. Баглов А.В., Радионов А.А., Чубенко Е.Б., Зайцев В.А., Борисенко В.Е. Установка для фотокаталитической очистки воды от органических загрязнений в проточном реакторе. *Доклады БГУИР*. 2018;4(114):45-50.
6. Baglov, A.V., Denisov, N.M., Borisenko, V.E., Uglov V.V., Malashevich A.A. Photocatalytic activity of nanostructured titania coatings on aluminum substrates. *Inorganic Materials*. 2017;53:1180-1184. DOI: 10.1134/S0020168517110036.

References

1. Baglov A.V., Shevtsova T.A., Khoroshko L.S., Dudchik N.V., Drozdova A.V., Borisenko V.E. [Forming immobilized nanostructured titanium dioxide having antibacterial properties]. *The Doklady of the National Academy of Science of Belarus*. 2019;63(2):157-163. DOI: 10.29235/1561-8323-2019-63-2-157-163. (In Russ.)
2. Linnik O., Khoroshko L. Non-Porous Nitrogen and Ruthenium Co-Doped Titania Films for Photocatalysis. *International Journal of Nanoscience*. 2019;18(3-4):194043-1-194043-5. DOI: 10.1142/S0219581X1940043X.
3. Zhou X., Liu N., Schmuki P. Photocatalysis with TiO₂ nanotubes: “colorful” reactivity and designing site-specific photocatalytic centers into TiO₂ nanotubes. *ACS Catalysis*. 2017;7(5):3210-3235. DOI: 10.1021/acscatal.6b03709.
4. Khoroshko L., Gaponenko N., Krutko E., Kulak A. Photocatalytic activity of TiO₂ and SrTiO₃ xerogels embedded in porous anodic alumina. in *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. Editors:

- Borisenko V.E., Gaponenko S.V., Gurin V.S., Kam C.H. Singapore:World Scientific Publ. 2015:377-380. DOI: 10.1142/9789814696524_0092.
5. Baglov A.V., Radionov A.A., Chubenko E.B., Zaycev V.A., Borisenko V.E. [Installation for photocatalytic water purification from organic pollution in the flow reactor]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2018;(4):45-50. (In Russ.)
 6. Baglov A.V., Denisov N.M., Borisenko V.E., Uglov V.V., Malashevich A.A. Photocatalytic activity of nanostructured titania coatings on aluminum substrates. *Inorganic Materials*. 2017;53:1180-1184. DOI: 10.1134/S0020168517110036.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в разработку концепции и планирование представленной научной работы, получение данных, их анализ и интерпретацию и предполагают дальнейшее использование полученных результатов по договоренности.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to the development of the concept and planning of the research, data acquisition, analysis and interpretation. The authors suggest further use of the results by agreement.

Сведения об авторах

Баглов А.В., научный сотрудник Центра 4.11 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Хорошко Л.С., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник НИЛ «Нанопотоника» НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Яцкевич П.А., студент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Baglov A.V., Researcher of Center 4.11 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Khoroshko L.S., PhD, Senior Researcher of SRL "Nanophotonics" of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Yatskevich P.A., student of Micro- and nanoelectronics 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. +375-17-293-88-69;
e-mail: L_Khoroshko@bsuir.by
Хорошко Людмила Сергеевна

Address for correspondence

220013. Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-69;
e-mail: L_Khoroshko@bsuir.by
Khoroshko Liudmila Sergeevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-49-56>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.18

ЭЛЕКТРОННЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПЕРОВСКИТОВ ABO_3 ($A - Ca, Ce, Y, Na; B - Ti, Nb, Fe, Mn, Ta; O$)^{*}

ПРОСКУРОВА П.А., ГВОЗДОВСКИЙ Д.Ч., БАРАНОВА М.С., СТЕМПИЦКИЙ В.Р.

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

Поступила в редакцию 12 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В работе представлены результаты квантово-механического компьютерного моделирования, проведенного с целью исследования электронных и магнитных свойств двадцати кристаллических структур на основе перовскитов переходных металлов, имеющих общую формулу ABO_3 , где A – ион Ca, Ce, Y, Na ; B – ион Ti, Ta, Nb, Mn, Fe ; O – ион кислорода, для оценки возможности применения данной группы материалов в устройствах современной электроники. Систематизация фундаментальных характеристик позволит в дальнейшем описать физические механизмы, протекающие в структурах. Расчеты фундаментальных свойств кристаллов выполнялись с использованием современных первопринципных методов, основанных на теории функционала плотности (Density Functional Theory – DFT). В качестве среды моделирования использовался программный пакет VASP (Vienna *Ab initio* Simulation Package), который предназначен для выполнения квантово-механических расчетов. В результате моделирования установлены следующие характеристики перовскитов переходных металлов: элементарные ячейки ABO_3 имеют кубическую сингонию; ряд соединений обладает магнитным моментом (от 0,26 до 4,39 μ_B); анализ зонных диаграмм свидетельствует о наличии соединений с полупроводниковым (запрещенная зона от 1,65 до 2,99 эВ) и металлическим типом проводимости. Среди соединений с полупроводниковым типом проводимости преобладают непрямозонные полупроводники. Прямозонный тип проводимости установлен только у одного соединения – $CeTiO_3$. Полученные результаты количественно и качественно характеризуют электронные и магнитные свойства кристаллических структур на основе перовскитов ABO_3 и могут быть использованы при разработке методов расчетов основных электрофизических параметров перспективных компонентов электроники.

Ключевые слова: *ab initio* моделирование, теория функционала плотности, метод проекционных присоединенных волн, кристалл перовскита, магнитный момент, полупроводник.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Представленные результаты получены в рамках выполнения задач задания 2.81 ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии». Для проведения компьютерного моделирования использовался вычислительный кластер БГУИР.

Для цитирования. Проскурова П.А., Гвоздовский Д.Ч., Баранова М.С., Стемпицкий В.Р. Электронные и магнитные свойства перовскитов ABO_3 ($A - Ca, Ce, Y, Na; B - Ti, Nb, Fe, Mn, Ta; O$). Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 49-56.

^{*} Статья рекомендована для опубликования организационным комитетом Белорусско-Китайского конкурса научно-технического творчества студентов (г. Минск, 22 ноября – 27 декабря 2019 г.).

ELECTRONIC AND MAGNETIC PROPERTIES OF ABO_3 PEROVSKITES (A – Ca, Ce, Y, Na; B – Ti, Nb, Fe, Mn, Ta; O)*

PALINA A. PRASKURAVA, DZMITRY C. HVAZDOUSKY, MARYIA S. BARANAVA,
VIKTOR R. STEMPIISKY

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

Submitted 12 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The article presents the results of quantum-mechanical computer simulation. The purpose of studying the electronic and magnetic properties of twenty crystalline structures based on perovskites of transition metals with the general formula ABO_3 (where A – Ca, Ce, Y, Na; B – Ti, Ta, Nb, Mn, Fe ion; O – oxygen ion) is to assess the possibility of using this group of materials in modern electronic devices. Systematization of fundamental characteristics will allow further describing of the physical mechanisms that occur in structures. Calculations of the fundamental properties of crystals were performed using first-principle methods based on the density functional theory (Density Functional Theory - DFT). The VASP software package (Vienna *Ab initio* Simulation Package) was used as the simulation tool, which is designed to perform quantum-mechanical calculations. As a result of the simulation, the following characteristics of perovskites of transition metals were established: ABO_3 unit cells have cubic syngony; a number of compounds have a magnetic moment (from 0.26 to 4.39 μ_B); an analysis of the band structures shows the presence of compounds with a semiconductor (band gap from 1.65 to 2.99 eV) and metallic type of conductivity. The direct-gap type of conductivity was established for only $CeTiO_3$ compound. The results obtained quantitatively and qualitatively characterize the electronic and magnetic properties of crystalline structures based on ABO_3 perovskites and can be used to develop methods for calculating the basic electrophysical parameters of promising electronic components.

Keywords: *ab initio* simulation, density functional theory, projector-augmented wave method, perovskite crystal, magnetic moment, semiconductor.

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

Gratitude. The presented results were obtained within the framework of Task 2.81 of the GPSR “Physical Materials Science, Novel Materials and Technologies”. The BSUIR computing cluster was used for computer.

For citation. Praskurava P.A., Hvazdousky D.C., Baranova M.S., Stempitsky V.R. Electronic and magnetic properties of ABO_3 perovskites (A – Ca, Ce, Y, Na; B – Ti, Nb, Fe, Mn, Ta; O). *Doklady BGUIR*. 2020; 18(3): 49-56.

Введение

Материалы со структурой перовскитов привлекают пристальное внимание из-за перспективности использования в солнечных элементах. Существенным ограничением практического использования перовскитов является низкая термодинамическая стабильность.

В [1] описано применение перовскитов в качестве материалов компонентов фотовольтаики. Отмечается возможность достижения высокого значения коэффициента полезного действия по сравнению с аналогичными компонентами, основанными на кремниевой технологии. В [2] предложено применение перовскитов при изготовлении светодиодов для дальнейшего использования в микроэлектронике. В [3–5] предложено использовать данные материалы в качестве активного слоя фотоприемников. Отмечается высокая чувствительность подобных компонентов.

Органические перовскиты не могут выдерживать длительные высокие температуры и, таким образом, представляют проблему долговременной стабильности для работающего

*The manuscript has been recommended for publication by the Organizing Committee of the Belarusian-Chinese Competition of Scientific and Technical Creativity of Students (Minsk, November 22 - December 27, 2019).

устройства [6, 7]. В работе [8] показано, что солнечные элементы на основе тонких пленок неорганических перовскитов CsPbBr_3 обладают большим напряжением холостого хода (1,32 эВ). Этот результат указывает на то, что высокая производительность перовскитов заключается не в органической составляющей, что еще раз подтверждает высокую перспективность неорганических перовскитов.

Практическая значимость исследования перовскитов определяется их энергетической эффективностью. Однако в литературных источниках недостаточно данных об управлении энергетической эффективностью с сохранением стабильности материала. Таким образом, изучение фундаментальных свойств с целью выявления закономерностей, позволяющих управлять энергетической эффективностью данного класса материалов, является актуальной задачей.

Методика проведения моделирования

В качестве среды моделирования систем на основе перовскитов использовался программный пакет VASP (Vienna Ab initio Simulation Package), который предназначен для выполнения квантово-механических расчетов *ab initio* методом. Расчеты фундаментальных электронных свойств периодических структур в программном пакете выполняются на основании теории функционала плотности (density functional theory – DFT). Для учета электронных волновых функций выбран подход проекционных присоединенных волн (PAW) [9]. Наименьшая разница между рассчитанными и экспериментальными значениями параметров кристаллических решеток выбранных перовскитов соответствует функционалу GGA в сочетании со схемой дисперсионной коррекции Грина [10] и поправками Бекке – Джонсона (PBE-D3(BJ)). В этом случае можно добиться лучшего соотношения между затратами машинного времени (ресурсов) и отклонением результатов моделирования от экспериментальных данных.

Электронные волновые функции учитывались с помощью базисного набора плоских волн с энергией обрезания 700 эВ, выбранной исходя из тестовых расчетов по сходимости. Критерий сходимости считался достигнутым, когда разница между двумя предыдущими шагами не превышала 10^{-6} эВ. Интегрирование в импульсном пространстве осуществлялось по сетке k -точек $5 \times 5 \times 5$, сгенерированной по Gamma-схеме. Для проведения квантово-механического моделирования созданы элементарные ячейки ABO_3 . На рис. 1 представлена примитивная ячейка ABO_3 , где А – атом Ca, Ce, Y или Na; В – атом Ti, Nb, Fe, Mn или Ta.

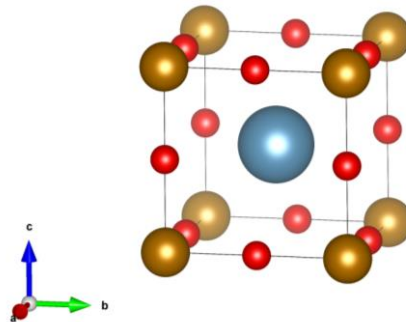


Рис. 1. Примитивная ячейка кристалла ABO_3
Fig. 1. Primitive cell of ABO_3 crystal

Результаты и их обсуждение

По результатам квантово-механической структурной оптимизации установлены свойства кристаллической решетки перовскитов, отвечающие основному энергетическому состоянию. Элементарные ячейки ABO_3 имеют кубическую сингонию. В центре кубической элементарной ячейки расположен ион «А», по углам – ионы «В», а в середине каждой из граней – ион кислорода (рис. 1). В ходе проведения моделирования с учетом спиновой поляризации установлено, что ряд соединений обладают магнитным моментом (от 0,26 до 4,39 μ_B). В табл. 1 представлены результаты расчетов полного магнитного момента μ_B на структурную единицу (ABO_3 , где «А» и «В» – ионы металлов).

Таблица 1. Полный магнитный момент μ_B на структурную единицу ABO_3
Table 1. Total magnetic moment μ_B per ABO_3 structural unit

«B» \ «A»	Fe	Mn	Nb	Ti	Ta
Ca	3,31	3,11	0,00	0,00	0,99
Ce	0,26	4,39	1,49	1,39	1,57
Na	3,97	1,69	0,00	0,00	0,00
Y	2,76	3,85	0,00	0,00	0,00

Получены зонные диаграммы исследуемых перовскитов ABO_3 , по которым установлен тип проводимости. На рис. 2 представлены зонные диаграммы перовскитов ABO_3 с металлическим типом проводимости. Уровень Ферми в этом случае пересекает зоны проводимости.

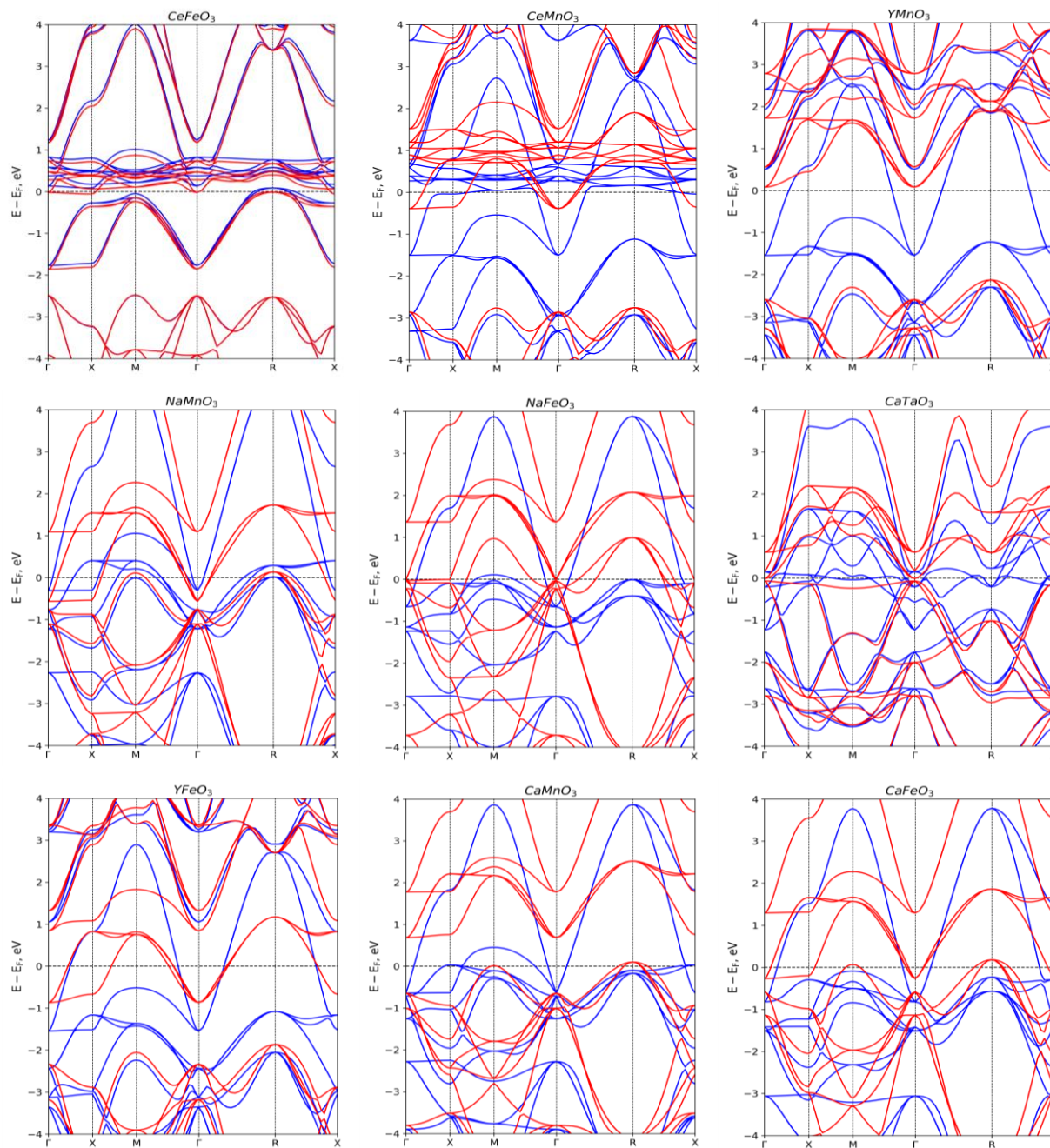


Рис. 2. Зонные диаграммы перовскитов ABO_3 с металлическим типом проводимости
Fig. 2. Band structures of ABO_3 perovskites with metallic conductivity

На рис. 3 представлены зонные диаграммы перовскитов ABO_3 , которые обладают полупроводниковым типом проводимости. Данные полупроводники являются непрямозонными, поскольку потолок валентной зоны находится в R точке, а дно зоны проводимости – в Γ точке обратного энергетического пространства.

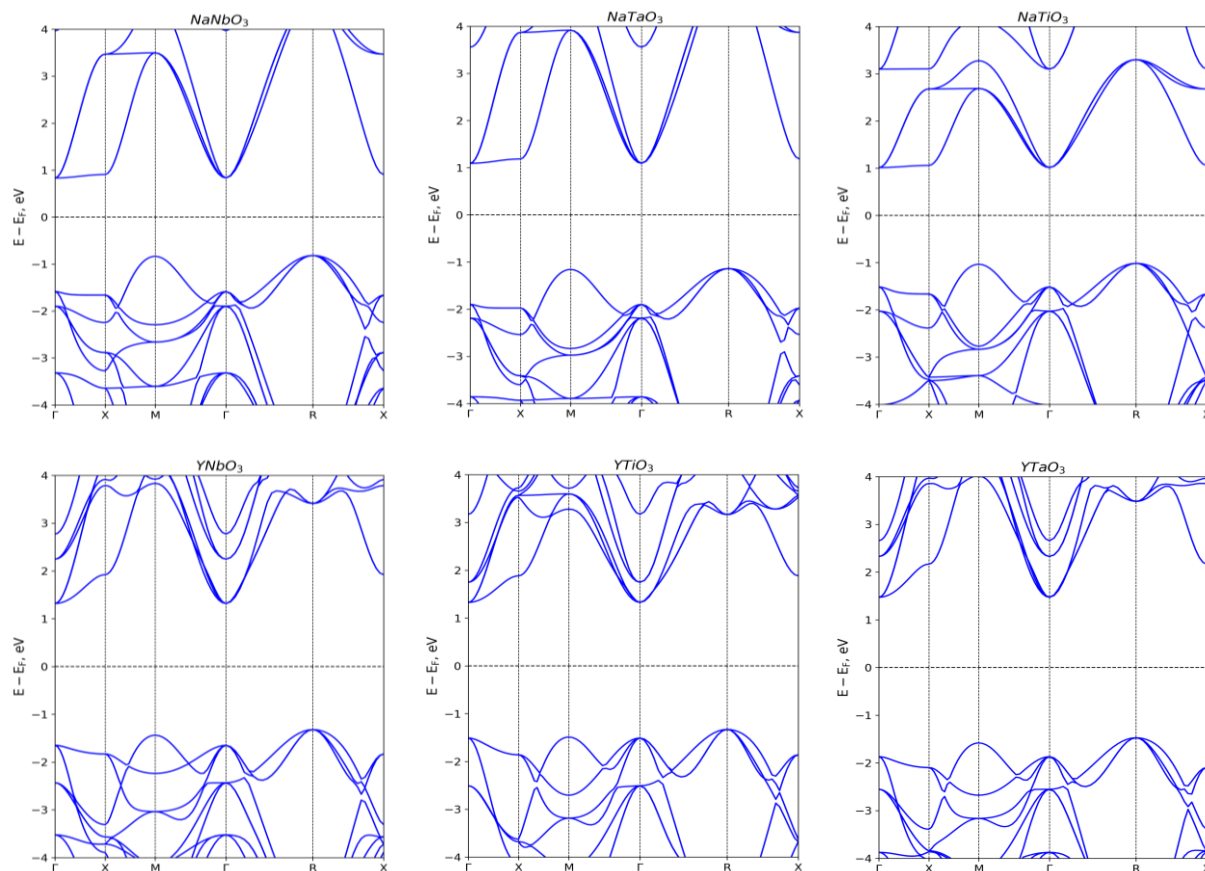


Рис. 3. Зонные диаграммы непрямозонных полупроводниковых перовскитов ABO_3 (R- Γ переход)
Fig. 3. Band structures of semiconductor ABO_3 perovskites with indirect band gap (R- Γ junction)

Соединение $CeTiO_3$, исходя из полученной зонной диаграммы (рис. 4), является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 2,63 эВ.

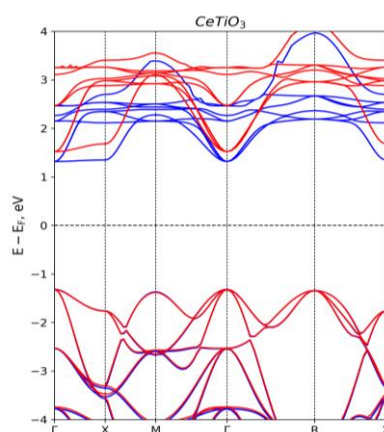


Рис. 4. Зонная диаграмма перовскита $CeTiO_3$
Fig. 4. Band structure of $CeTiO_3$ perovskite

На рис. 5 представлены зонные диаграммы перовскитов ABO_3 , которые являются непрямозонными полупроводниками, но с экстремумами в точках M и Γ для валентной зоны и зоны проводимости соответственно.

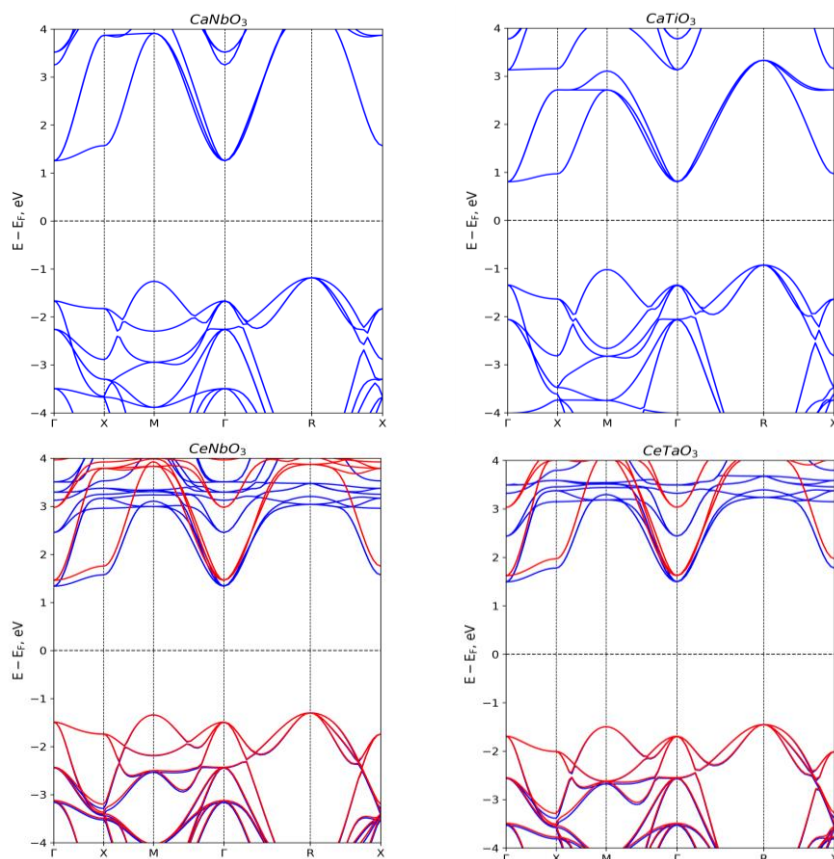


Рис. 5. Зонные диаграммы полупроводниковых перовскитов ABO_3 (М-Г переход)
Fig. 5. Band structures of semiconductor ABO_3 perovskites (M-G junction)

В табл. 2 представлены результаты расчетов ширины запрещенной зоны, а также указан тип полупроводника для исследуемых соединений. Полученные результаты могут отличаться от экспериментальных в сторону недооценки запрещенной зоны из-за известных затруднений, возникающих в рамках теории функционала плотности.

Таблица 2. Параметры запрещенной зоны для перовскитов ABO_3
Table 2. Band gap parameters for ABO_3 perovskites

«B» \ «A»	Fe	Mn	Nb	Ti	Ta
Ca	M	M	2,51 эВ	1,83 эВ	M
Ce	M	M	2,68 эВ	2,63 эВ	2,99 эВ
Na	M	M	1,65 эВ	2,03 эВ	2,23 эВ
Y	M	M	2,64 эВ	2,67 эВ	2,95 эВ

Анализ зонных диаграмм свидетельствует о наличии полупроводников (запрещенная зона от 1,65 до 2,99 эВ) и проводников среди исследуемой группы соединений перовскитов.

Полученные результаты количественно и качественно характеризуют структурные, электронные и магнитные свойства кристаллических структур на основе перовскитов ABO_3 и могут быть использованы при разработке методов расчета основных электрофизических параметров перспективных приборов наноэлектроники и спинтроники на основе перовскитов по результатам *ab initio* моделирования без привлечения дорогостоящих экспериментов.

Заключение

С помощью моделирования из первых принципов электронных и магнитных свойств перовскитов переходных металлов получены следующие результаты:

– $ACeO_3$ (где A – Fe, Mn, Nb, Ti, Ta) обладает магнитным моментом со значением от 0,26 до 4,39 μ_B (при $T=0$ K), $ACaO_3$ (где A – Fe, Mn, Ta) обладает магнитным моментом

со значением от 0,99 до 3,31 $\mu\text{Б}$ (при $T=0\text{ К}$), ABO_3 ($A = \text{Fe, Mn}$, $B = \text{Na, Y}$) обладает магнитным моментом от 2,76 до 3,85 $\mu\text{Б}$;

– анализ зонных диаграмм свидетельствует о наличии полупроводников (запрещенная зона от 1,65 до 2,99 эВ) и металлов среди исследуемой группы соединений;

– прямозонный тип запрещенной зоны обнаружен только у соединения CeTiO_3 .

Список литературы / References

1. Jung E.H., Jeon N.J., Park E.Y. Efficient, stable and scalable perovskite solar cells using poly (3-hexylthiophene). *Nature*. 2019;567:511-515. DOI: 10.1038/s41586-019-1036-3.
2. Cho H., Kim Y.-H., Wolf C. Improving the Stability of Metal Halide Perovskite Materials and Light-Emitting Diodes. *Advanced Materials*. 2018;30:1704587. DOI: 10.1002/adma.201704587.
3. Li X., Yu D., Chen J. Constructing Fast Carrier Tracks into Flexible Perovskite Photodetectors To Greatly Improve Responsivity. *ACS Nano*. 2017;11(2):2015-2023. DOI: 10.1021/acsnano.6b08194.
4. Zhang R., Song X., Liu Y. Monomolecular VB_2 -doped MOFs for photocatalytic oxidation with enhanced stability, recyclability and selectivity. *Journal of Materials Chemistry A*. 2019;7:26934. DOI: 10.1039/c9ta09571c.
5. Xu Y.-F., Yang M.-Z., Chen B.-X. A CsPbBr_3 Perovskite Quantum Dot/Graphene Oxide Composite for Photocatalytic CO_2 Reduction. *Journal of the American Chemical Society*. 2017;139(16):5660-5663. DOI: 10.1021/jacs.7b00489.
6. Brunetti B., Cavallo C., Ciccio A. On the Thermal and Thermodynamic (In) Stability of Methylammonium Lead Halide Perovskites. *Sci Rep*. 2016;6:31896. DOI: 10.1038/srep31896.
7. Akbulatov A.F., Luchkin S.Y. Probing the Intrinsic Thermal and Photochemical Stability of Hybrid and Inorganic Lead Halide Perovskites. *J. Phys. Chem. Lett*. 2017;8(6):1211-1218. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.6b03026.
8. Kulbak M., Cahen D., Hodes G. How Important Is the Organic Part of Lead Halide Perovskite Photovoltaic Cells Efficient CsPbBr_3 Cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2015;6(13):2452-2456. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b00968.
9. Blöchl P.E. Projector augmented-wave method. *Physical Review B*. 1994;50(24):17953-17979. DOI: 10.1103/physrevb.50.17953.
10. Kresse G., Joubert J. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented wave method. *Physical Review B*. 1999;59(3):1758-1775. DOI: 10.1103/physrevb.59.1758.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

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

Гвоздовский Д.Ч., аспирант, младший научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Стемпичский В.Р., к.т.н., доцент кафедры микро- и наноэлектроники БГУИР, ведущий научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

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

Hvazdousky D.C., Postgraduate student, Junior Researcher of SRL 4.4 SRP of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Baranova M.S., Junior Researcher of SRL 4.4 SRP of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Stempitsky V.R., PhD (Engineering), Assistant Professor of Micro- and Nanoelectronics Department, Leading Researcher of SRL 4.4 SRP 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. +375-17-293-84-09;
e-mail: gvozдовsky@bsuir.by
Гвоздовский Дмитрий Чеславович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-84-09;
e-mail: gvozдовsky@bsuir.by
Hvazdousky Dzmitry Chaslavavich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-57-62>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.58

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МОБИЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ*

САВЁЛОВ П.И., ЛИВШИЦ Ю.Е.

Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 12 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Цель работы – разработка конструкции мобильной солнечной электростанции с автоматическим двухосевым позиционированием солнечных элементов. Разработан алгоритм функционирования мобильной солнечной электростанции. Спроектирована конструкция блока управления системой позиционирования солнечных элементов. Исследования и разработка твердотельной модели мобильной солнечной электростанции выполнялись при помощи системы автоматизированного проектирования SolidWorks. Оптимизация конструкции солнечной электростанции проводилась при помощи компьютерных инженерных исследований. Оптимизация конструкции деталей выполнялась методом генеративного проектирования. Оптимизация компоновки блока управления выполнялась по результатам исследований тепловых процессов, происходящих при установленном режиме функционирования, при помощи исследовательского модуля Flow Simulation SolidWorks. Установлено, что естественное воздушное охлаждение электронного блока управления мобильной солнечной электростанции, при данной компоновке элементов, является оптимальным и достаточным для обеспечения его эксплуатации в климатической зоне В1. Конструктивное исполнение корпуса блока управления обеспечивает степень защиты IP 66. Исследовано влияние ветровой нагрузки на прочностные характеристики несущих конструкций. Установлены зоны повышенного давления, турбулентности, величина эквивалентных напряжений и деформаций в несущих конструкциях при воздействии ветра скоростью до 8 баллов (15 м/с) по шкале Бофорта. Определены конструктивное исполнение и материалы несущих конструкций мобильной солнечной электростанции с учетом обеспечения минимальных массогабаритных параметров, прочностных характеристик и удобства транспортировки. При помощи генеративного проектирования проведен топологический анализ несущих элементов мобильной солнечной электростанции, что позволило снизить их массу на 30 %, сохранив при этом необходимую расчетную прочность.

Ключевые слова: солнечная электростанция, метод конечных элементов, тепловой режим, ветровая нагрузка, генеративное проектирование, инженерное исследование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Савёлов П.И., Лившиц Ю.Е. Разработка конструкции мобильной солнечной электростанции. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 57-62.

* Статья рекомендована для опубликования организационным комитетом Белорусско-Китайского конкурса научно-технического творчества студентов (г. Минск, 22 ноября – 27 декабря 2019 г.).

DEVELOPMENT OF THE DESIGN OF MOBILE SOLAR POWER PLANT

PAVEL I. SAVELOV, YURIY E. LIVSHIC

Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 12 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of the work is to develop the design of a mobile solar power plant with automatic biaxial positioning of solar cells. The authors have developed the algorithm for the operation of a mobile solar power plant and the design of the control unit for the solar cell positioning system. Research and development of a solid-state model of the mobile solar power plant were done using the SolidWorks computer-aided design system. The design optimization for the solar power plant was carried out using computer engineering research. The design optimization of the parts was carried out by the method of generative design. Optimization of the control unit layout was carried out according to the results of studying the thermal processes that occur during steady-state operation using the Flow Simulation SolidWorks research module. It is established that the natural air cooling of the electronic control unit of the mobile solar power plant with this arrangement of elements is optimal and sufficient to ensure its operation in climatic zone B1. The design of the control unit housing ensures IP66 protection. The effect of wind load on the strength characteristics of load-bearing structures has been investigated. The research has established pressurized and turbulence zones, the value of equivalent stresses and deformations in load-bearing structures when exposed to wind speeds of up to 8 points (15 m/s) on the Beaufort scale. The design and materials of the supporting structures of the mobile solar power plant are determined taking into account minimum weight and dimensions, strength characteristics and ease of transportation. Using generative design, a topological analysis of the load-bearing elements of the mobile solar power plant was carried out, which allowed the reduction of their mass by 30 % while maintaining the required design strength.

Keywords: solar power plant, finite element method, thermal regime, wind load, generative design, engineering research.

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

For citation. Savelov P.I, Livshic Y.E. Development of the design of mobile solar power plant. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 57-62.

Введение

В настоящее время происходит интенсивное развитие альтернативных источников энергии. Одним из самых перспективных является солнечная энергетика. Использование солнечной энергии характеризуется экологической чистотой, простотой использования, а количество солнечной энергии, поступающей на поверхность земли за неделю, превышает энергию всех разведанных полезных ископаемых, применяемых для генерации электрической энергии [1]. Главным преимуществом солнечной энергетики является повсеместное распространение и доступность источника излучения, что позволяет рассматривать солнечные элементы как самый удобный способ снабжения электрической энергией районов без собственной энергосети.

Развертывание стационарной солнечной электростанции занимает слишком много времени. Но существуют ситуации, которые требуют обеспечения экстренного энергоснабжения. Наиболее распространенными являются мобильные электростанции на основе двигателей внутреннего сгорания. Однако в некоторых случаях их применение ограничено, например, при отсутствии возможности доставки топлива, ограничениями по величине шума, выбросов отработанных газов в атмосферу и т. д. Поэтому использование

*The manuscript has been recommended for publication by the Organizing Committee of the Belarusian-Chinese Competition of Scientific and Technical Creativity of Students (Minsk, November 22 - December 27, 2019).

мобильной солнечной электростанции является оптимальным вариантом. Основным недостатком солнечной энергетики является непостоянство во времени плотности энергетических потоков, применение дорогостоящего оборудования для преобразования и аккумулирования энергии, невысокого коэффициента полезного действия (КПД) солнечных батарей. Максимальное КПД солнечной батареи достигается при ее инсоляции под углом 90° к поверхности преобразователя солнечной энергии [2]. Для поддержания оптимального угла инсоляции солнечных батарей можно использовать устройства позиционирования, что позволяет повысить эффективность солнечной электростанции в 1,2–1,3 раза [3].

Целью данной работы является разработка мобильной солнечной электростанции (МСЭ) с автоматическим двухосевым позиционированием солнечных элементов.

Методика проведения эксперимента

Разработка конструкции и конструкторской документации МСЭ производилась при помощи системы твердотельного моделирования SolidWorks и САПР AutoCad Mechanical.

Компьютерные исследования тепловых режимов функционирования блока управления и ветровой устойчивости МСЭ проводились методом конечных элементов при помощи CAE модуля SolidWorks Flow Simulation.

Оптимизация несущих конструкций осуществлялась методом генеративного проектирования.

Результаты и их обсуждение

Для разработки технических решений при конструировании МСЭ разработан алгоритм ее функционирования. Принцип функционирования МСЭ следующий:

- после установки МСЭ на место эксплуатации автоматически, при помощи установленного в блок управления GPS ГЛОНАСС модуля, определяется ее географическое местоположение;
- автоматически определяется ориентирование относительно сторон света при помощи электронного компаса;
- МСЭ автоматически приводится в рабочее положение при помощи электрических актуаторов;
- запускается режим слежения за положением солнца на небесной сфере в зависимости от географических координат;
- круглосуточно осуществляется контроль параметров окружающей среды (температуры, влажности, скорости ветра);
- при увеличении скорости ветра свыше 15 м/с МСЭ переходит в режим транспортировки (солнечные панели складываются в защитный корпус) для предотвращения повреждения солнечных элементов и конструкции в целом;
- при допустимой скорости ветра осуществляется выработка и накопление электроэнергии;
- после достижения солнцем линии горизонта МСЭ переходит в режим ожидания, а положение солнечных элементов переводится в положение, соответствующее восходу солнца следующего дня.

Одним из важных факторов, обеспечивающих надежную и бесперебойную работу электронного устройства, является соблюдение в процессе эксплуатации определенных тепловых режимов. Перегрев электронных компонентов вызывает нестабильную работу всей электрической системы устройств. Оптимизация компоновки выполнялась по результатам исследований тепловых процессов, происходящих при установившемся режиме функционирования в замкнутом пространстве корпуса электронного блока управления.

Для проведения исследований траектории тепловых потоков при естественном и принудительном воздушном охлаждении и выявления аэродинамических теней, в которых могут образовываться застойные зоны, разработана твердотельная модель электронного блока управления МСЭ. Критерием оптимизации правильности компоновки была выбрана

максимально допустимая температура эксплуатации электронных компонентов, которая не должна превышать 60 °С. Расположение электронных компонентов обусловлено технологичностью монтажа и технического обслуживания электронного блока управления МСЭ. Для упрощения компьютерных исследований расположение электрических соединителей и электрических проводов были исключены из расчета, так как места их установки не оказывают влияние на распространение воздушных и тепловых потоков.

На рис. 1, 2 представлены результаты компьютерных исследований тепловых процессов при установившемся режиме работы блока управления МСЭ (температура окружающей среды плюс 50 °С).

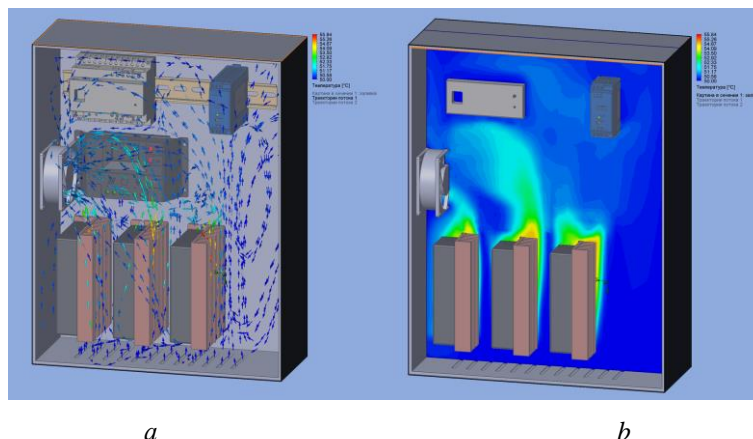


Рис. 1. Принудительное воздушное охлаждение электронного блока управления МСЭ: *a* – траектория воздушных потоков; *b* – распределение температурных полей охлаждающего потока воздуха
Fig. 1. Forced air cooling of the electronic control unit of MSE: *a* – the trajectory of air flows; *b* – distribution of temperature fields of cooling air flow

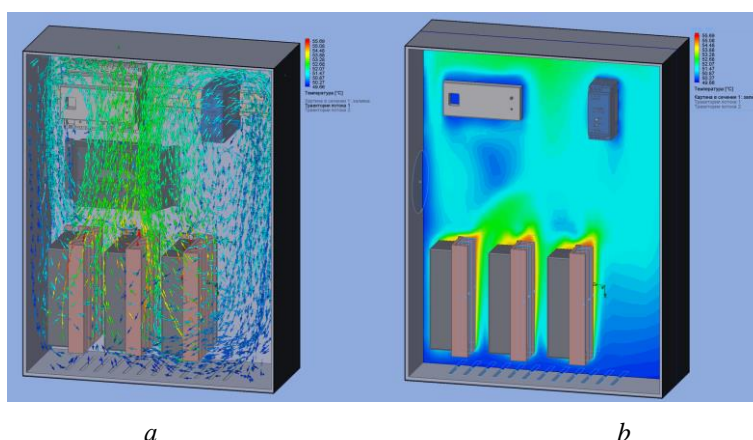


Рис. 2. Естественное воздушное охлаждение электронного блока управления МСЭ: *a* – траектория воздушных потоков; *b* – распределение температурных полей охлаждающего потока воздуха
Fig. 2. Natural air cooling of the electronic control unit of MSE: *a* – the trajectory of air flows; *b* – distribution of temperature fields of cooling air flow

Установлено, что при принудительном воздушном охлаждении потоком воздуха скоростью до 2 м/с максимальная температура потока не превышает 60 °С. Зон критического перегрева выявлено не было.

При естественном воздушном охлаждении максимальная температура конвективных потоков не превышает 60 °С. Поэтому достаточным является организация пассивного воздушного охлаждения блока управления МСЭ. Установлено, что траектория воздушных потоков при одностороннем расположении вентиляционных отверстий является оптимальной и обеспечивает равномерное распределение тепловых полей по всему объему блока управления.

Исследовано влияние ветровой нагрузки на прочностные характеристики несущих конструкций и устойчивость МСЭ. Определены зоны повышенного давления, турбулентности, величина эквивалентных напряжений и деформаций в несущих конструкциях при воздействии

ветра скоростью до 10 баллов по шкале Бофорта (рис. 3). Выявленные участки повышенного давления ($P = 275$ Па) на несущие конструкции позволили выработать технические решения, обеспечивающие безопасную работу при скорости ветра до 8 баллов по шкале Бофорта.

Определены конструктивное исполнение и материалы несущих конструкций МСЭ с учетом обеспечения минимальных массогабаритных параметров, прочностных характеристик и удобства транспортировки. При помощи генеративного проектирования проведен топологический анализ несущих элементов МСЭ (дополнительные опоры, мачта крепления солнечных батарей), что позволило снизить их массу на 30 %, сохранив при этом необходимую расчетную прочность (рис. 4).

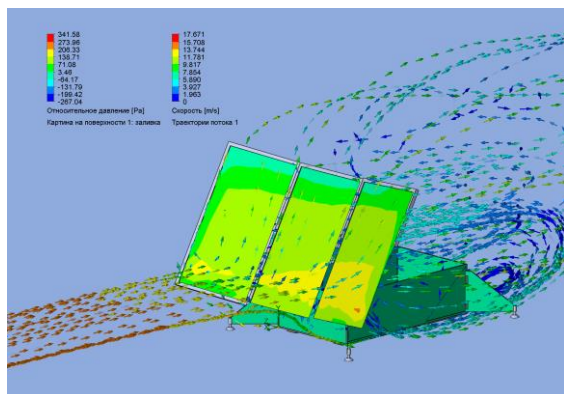


Рис. 3. Скорость и траектория ветровых потоков и создаваемое давление на конструкцию МСЭ

Fig. 3. The speed and trajectory of wind flows, and the pressure developed on the MSE

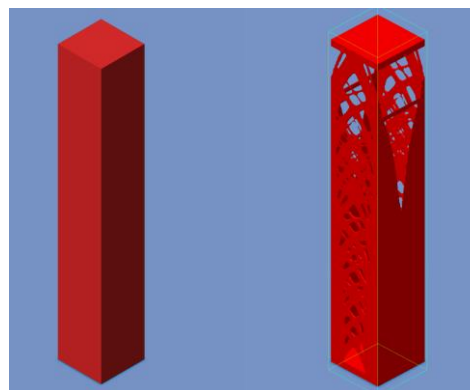


Рис. 4. Результат генеративного проектирования мачты крепления солнечных батарей

Fig. 4. Result of generative design of solar cell tower

Проведенные исследования позволили оптимизировать конструкцию МСЭ и обеспечить ее эксплуатацию в условиях, соответствующих климатическому исполнению В1 (по ГОСТ 15150-69) и степени защиты IP 66 (по ГОСТ 14254-2015). Твердотельная модель МСЭ представлена на рис. 5. Оборудованная тремя солнечными батареями (например, Sunway ФСМ-400М) МСЭ обеспечивает генерацию электрической энергии не менее 5000 Вт×ч.

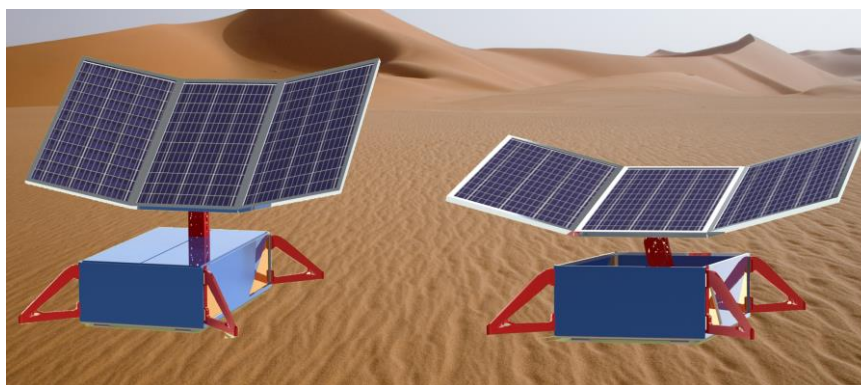


Рис. 5. Твердотельная модель мобильной солнечной электростанции

Fig. 5. Solid-state model of mobile solar power plant

Заключение

В результате выполнения работы разработана конструкция мобильной солнечной электростанции, обеспечивающая выработку электроэнергии при помощи возобновляемого источника энергии. Применение твердотельного моделирования позволяет оценить влияние условий эксплуатации на конструктивное исполнение разрабатываемого устройства и существенно снизить время поиска оптимума при выполнении компьютерных исследований.

Принятые технические решения и конструкция мобильной солнечной электростанции являются оригинальными и учитывают современные тенденции развития автоматизированного проектирования и производства.

Список литературы

1. Twidell J., Weir T. *Renewable Energy Resources*. London: Routledge London; 2015.
2. Германович В., Турилин А. *Альтернативные источники энергии*. СПб.: Наука и техника, 2011.
3. Durisch W., Struss O., Kai R. Efficiency of selected photovoltaic modules under varying climatic conditions. *Renewable energy – the energy for the 21st century: Proc. of VI World renewable energy congress*. Brighton, Great Britain, 2000: 779-788.

References

1. Twidell J., Weir T. *Renewable Energy Resources*. London: Routledge London; 2015.
2. Germanovich V., Turilin A. [*Alternative energy sources*]. St. Petersburg: Science and Technology, 2011. (In Russ.)
3. Durisch W., Struss O., Kai R. Efficiency of selected photovoltaic modules under varying climatic conditions *Renewable energy – the energy for the 21st century: Proc. of VI World renewable energy congress*. Brighton, Great Britain, 2000: 779-788.

Вклад авторов

Савёлов П.И. разработал твердотельную модель объекта исследований и конструкторскую документацию, проводил компьютерные исследования и интерпретацию результатов.

Лившиц Ю.Е. поставил задачи исследований, провел интерпретацию результатов.

Authors' contribution

Savelov P.I. has developed the solid-state model of the object of research and design documentation, conducted computer research and interpretation of the results.

Livshitz Y.E. has set out the research objectives and interpreted the results.

Сведения об авторах

Савёлов П.И., студент факультета информационных технологий и робототехники Белорусского национального технического университета.

Лившиц Ю.Е., к.т.н, доцент кафедры робототехнических систем Белорусского национального технического университета.

Information about the authors

Savelov P.I., student in the Faculty of Information Technology and Robotics of Belarusian National Technical University.

Livshic Y.E., PhD, Associate Professor of Robotic Systems Department of Belarusian National Technical University.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 65,
Белорусский национальный
технический университет
тел. +375-29-609-22-05;
e-mail: savelov2205@gmail.com
Савёлов Павел Игоревич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 65,
Belarusian National
Technical University
tel. +375-29-609-22-05;
e-mail: savelov2205@gmail.com
Savelov Pavel Igorevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-63-71>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.315.5/.6

ЛАВИННЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

ЛЕ ДИНЬ ВИ, ЛЕШОК А.А., ДОЛБИК А.В., ПЕРКО С.Л., ЛАЗАРУК С.К.

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

Поступила в редакцию 17 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В работе проведен анализ параметров кремниевых лавинных светодиодов и их использования для электронно-оптических систем передачи сигналов. Показаны преимущества данных приборов, среди которых следует выделить высокое быстродействие и совместимость с кремниевой технологией. Изготовлены экспериментальные образцы лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния и исследованы их структурные и оптические характеристики. Представлены результаты управления спектром электролюминесценции лавинных светодиодов за счет выбора технологических режимов формирования наноструктурированного кремния. Установлено, что температура подложки в процессе осаждения поверхностной нанокompозитной пленки алюминий + кремний влияет на размеры формирующихся кремниевых наночастиц, определяющих спектральные характеристики лавинных светодиодов. Это позволяет смещать максимум спектра их излучения в более коротковолновую область видимого диапазона за счет формирования кремниевых наночастиц меньших размеров. Разработана система оптических межсоединений, состоящая из лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния и микроканальной кремниевой пластины, используемой для передачи светового сигнала. Проведено исследование различных режимов функционирования разработанной оптоэлектронной системы и достигнуто увеличение эффективности оптопары на основе лавинных светодиодов до 0,2 % за счет импульсного режима функционирования. Показано, что эффективность оптопары увеличивается при увеличении тока светодиода, и именно импульсный режим его работы характеризуется максимальным значением тока, что обусловлено более эффективным отводом джоулевого тепла в промежутках между импульсами, обеспечивающим стабильную работу всей системы. Полученные результаты открывают новые возможности для развития оптических межсоединений между кремниевыми чипами и кремниевой оптоэлектроникой в целом.

Ключевые слова: лавинные светодиоды, наноструктурированный кремний, электролюминесценция, оптопара, оптические межсоединения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ле Динь Ви, Лешок А.А., Долбик А.В., Перко С.Л., Лазарук С.К. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для оптических межсоединений. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 63-71.

AVALANCHE LEDs BASED ON NANOSTRUCTURED SILICON FOR OPTICAL INTERCONNECTIONS

LE DINH VI, ANDREI A. LESHOK, ALEXANDER V. DOLBIK, SERGEY L. PERKO,
SERGEY K. LAZAROUK

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

Submitted 17 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper analyzes the parameters of silicon avalanche LEDs and their use for electron-optical signal transmission systems. The advantages of silicon avalanche LEDs are shown, among which high speed and compatibility with silicon technology should be highlighted. Experimental avalanche LEDs based on nanostructured silicon were fabricated and studied. The results of controlling the electroluminescence spectrum of avalanche LEDs due to the choice of production conditions to form nanostructured silicon are presented. It was found that the temperature of the substrate during the deposition of the surface nanocomposite aluminum + silicon film affected the size of the formed silicon nanoparticles determining the spectral characteristics of avalanche LEDs. This allows shifting the maximum of their emission spectrum to a shorter wavelength region of the visible range due to the forming of smaller silicon nanoparticles. The authors have developed an optical interconnection system consisting of avalanche LEDs based on nanostructured silicon and a microchannel silicon wafer used to transmit a light signal. The study of various operating modes of the developed optoelectronic system was performed and an increase in the efficiency of optocouple based on avalanche LEDs to 0.2% due to the pulsed operating mode was achieved. It is shown that the efficiency of the optocouple increases with LED current and it is the pulsed mode of its operation that is characterized by the maximum current, which is due to more efficient removal of Joule heat in the intervals between pulses, ensuring stable operation of the entire system. The results obtained open up new opportunities for the development of optical interconnections between silicon chips and silicon optoelectronics in general.

Keywords: avalanche LEDs, nanostructured silicon, electroluminescence, optocouple, optical interconnects.

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

For citation. Le Dinh Vi, Leshok A.A., Dolbik A.V., Perko S.L., Lazarouk S.K. Avalanche leds based on nanostructured silicon for optical interconnections. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 63-71.

Введение

Впервые об излучении света кремниевыми структурами во время лавинного пробоя при обратном смещении $p-n$ перехода сообщалось в [1, 2]. Затем похожее явление наблюдалось и при обратном смещении $p-n$ переходов на основе наноструктурированного (пористого) кремния [3]. Однако во всех этих случаях светоизлучение было неравномерно по площади $p-n$ перехода, а в последнем случае и нестабильно во времени, так как после нескольких минут функционирования устройства излучение затухало. Далее было обнаружено, что излучение света видимого диапазона наблюдается при лавинном пробое контакта Шоттки алюминий – наноструктурированный кремний, причем в этом случае удалось достичь увеличения эффективности и стабильности излучения [4], что позволило создать кремниевые лавинные светодиоды, первое сообщение о которых было сделано авторами данной статьи в 1999 году в Республике Беларусь [5], а потом в 2000 году в международном издании [6]. Далее последовали работы, в которых сообщалось об улучшении параметров лавинных светодиодов, прежде всего эффективности и стабильности излучения, а также быстродействия [7]. Важно отметить, что предложенная конструкция светоизлучающих диодов на основе наноструктурированного кремния использовалась и модернизировалась другими исследовательскими группами, в частности из Австралии [8] и Японии [9], что позволило увеличить внешнюю эффективность светоизлучения до 10^{-3} .

Анализируя литературные источники, становится очевидным, что после 2004 года лавинные кремниевые светодиоды активно исследуются учеными Америки, Европы (Израиль, Нидерланды, Франция, Дания, Швейцария, Хорватия, Россия), Азии (Япония, КНР, Иран) и Австралии. В табл. 1 приведены параметры лавинных светодиодов, полученных различными исследовательскими группами, а также отмечены технологические особенности реализации этих приборов.

Таблица 1. Параметры лавинных светодиодов из кремния, полученных различными исследовательскими группами
Table 1. Parameters of silicon avalanche LEDs fabricated by various research groups

Авторы, страны, год	Диапазон и длины волн пиков ЭЛ, нм	Эффективность светодиодов	Другие параметры светодиодов и технология их изготовления
1. Karsenty A., et al.; Israel; 2003 [10]	500 – 850; 537, 602, 686, 762, 825	Рост в 16 раз при наноструктурировании кремния	Светодиоды на основе и объемного, и наноструктурированного кремния $U_{\text{раб}} = 5-10$ В Размер структуры 80×8 мкм
2. Chatterjee A., et al.; USA; 2004 [11]	430 – 800; 650	$\sim 10^{-7}$	Рабочая частота 20 ГГц $P_{\text{опт}} = 3$ нВт при $U = 3,5$ В и $I = 2,5$ мА Техпроцесс 0,18 мкм КМОП Теоретически предсказано достижение длительности импульса 7 пс
3. Snyman L.W., et al; South Africa; 2005 [12]	400 – 900	$1,6 \cdot 10^{-7} - 5,8 \cdot 10^{-6}$	$U_{\text{раб}} = 8$ В, $I_{\text{раб}} = 80$ мкА $P_{\text{опт}} = 10^{-1}$ Вт/см ² Техпроцесс 2 мкм КМОП
4. Snyman L.W., et al; South Africa, Israel; 2007 [13]	450 – 750;	Внешняя $2 \cdot 10^{-6} - 2,5 \cdot 10^{-5}$ Внутренняя $1,5 \cdot 10^{-5} - 5,9 \cdot 10^{-2}$	$U_{\text{раб}} = 9$ В, $I_{\text{раб}} = 0,1 - 3$ мА $P_{\text{опт}} = 10^{-2} - 1$ Вт/см ² Техпроцесс 0,35 мкм КМОП
5. Du Plessis M., et al; South Africa, USA; 2013 [14]	350 – 1700	Внутренняя $1,2 \cdot 10^{-2}$	$U_{\text{раб}} = 10,5$ В $I_{\text{тест}} = 350$ мкА/точечный источник Техпроцесс 0,35 мкм КМОП
6. Kulakci M., et al; Turkey; 2013 [15]	650; 700	$4,3 \cdot 10^{-2}$	МОП-LED
7. Ogudo K.A., et al; South Africa, France; 2014 [16]	450 – 750	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	Рабочая частота до 40 ГГц; $U_{\text{раб}} = 1-3,8$ В, $I_{\text{раб}} = 0,1-1$ мА $P_{\text{опт}} = 1-10$ Вт/см ² Техпроцесс 0,35 мкм КМОП Расчетная частота ~ 300 ГГц
8. Xu K., China; 2014, 2019 [17, 18]	400 – 900; 650	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	Рабочая частота – десятки ГГц (теоретически до 60–90 ГГц) Размеры 175,5/6 мкм (W/L) Техпроцесс 3 мкм КМОП (Si-PMOSFET)
9. Dutta S., et al.; Netherlands; 2017 [19]	400 – 870; 650	$10^{-8} - 10^{-6}$	Активная площадь 510 и 780 мкм ² $L = 1-2$ мкм Техпроцесс 0,14 мкм КНИ КМОП
10. Okhai T.A., et al.; France, South Africa; 2017 [20]	450 – 850	10^{-5}	$U_{\text{раб}} = 8 - 10$ В, $I_{\text{раб}} = 1$ мкА – 2 мА Интенсивность эмиссии 500 нВт/мкм ² Техпроцесс 0,35 мкм КМОП
11. Agarwal V., et al.; Netherlands, Switzerland; 2018 [21]	450 – 950	$5 \cdot 10^{-3}$	Площадь 0,008 мм ² , размер 100×100 мкм Скорость передачи сигнала 10 Mbps Техпроцесс 0,14 мкм КНИ КМОП
12. Xu K., et al.; China, South Africa; 2019 [22]	450 – 850	Внешняя 10^{-4} Внутренняя $10^{-3} - 10^{-2}$	Интенсивность эмиссии 200 нВт/мкм ² Техпроцесс 0,35 мкм КМОП
13. Krakkers M., et al.; Netherlands, Croatia, Denmark; 2019 [23]	Видимый диапазон	$10^{-7} - 10^{-6}$	Размер 2×20 мкм (40, 30, 10 и 1 мкм) $U_{\text{раб}} = -7 - -14$ В Оптическая мощность 50 мВт
14. Lazarouk S., et al.; Belarus; 2019 [24]	Видимый диапазон	10^{-3}	Размер от 100 мкм ² до 0,4 мм ² Рабочая частота – десятки ГГц для светодиодов с размерами 0,01 мм ² и менее, расчетная – более 1 ТГц

Особого внимания заслуживает максимальный уровень отдельных параметров, достигнутый в этих работах. В частности, исследователи из США показали, что лавинные светодиоды способны работать на частоте 20 ГГц с периодом импульса 50 пс [11]. При этом ими теоретически показана возможность достижения длительности импульса 7 пс. В работе [16] ученых из ЮАР и Франции теоретически прогнозируется работа лавинных светодиодов на частоте 300 ГГц.

Специального рассмотрения требует уровень достижения эффективности светоизлучения. В лавинных светодиодах на основе объемного монокристаллического кремния эта величина находится в диапазоне $10^{-8} - 10^{-4}$, в то время как для наноструктурированного кремния этот показатель возрастает до $10^{-4} - 10^{-2}$ [4, 7], что свидетельствует о перспективности использования именно наноразмерных кремниевых структур для создания светодиодов.

Исследователи из Нидерландов предложили конструкцию оптопары на основе кремниевых лавинных светодиодов [19]. Ими достигнута эффективность оптоэлектронной передачи сигнала (коэффициент передачи по току) 10^{-8} . В работе [24] было показано, что эффективность оптоэлектронной передачи сигнала может достигать 10^{-3} , а расчетная рабочая частота лавинных светодиодов находится в терагерцовом диапазоне.

В данной работе показана возможность управления спектром электролюминесценции лавинных светодиодов, а также метод увеличения эффективности оптоэлектронной передачи сигнала за счет импульсного режима работы светодиодов.

Эксперимент

Экспериментальные образцы лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния создавали по технологии, описанной в [7, 25]. Подложки монокристаллического кремния диаметром 100 мм, легированные фосфором, с удельным сопротивлением 0,2–0,4 Ом см использовались в качестве исходного материала. Нанокompозитные пленки (алюминий + кремний) осаждали магнетронным распылением композитных мишеней, содержащих от 27 до 45 ат.% кремния на установке Магна 2М при различных температурах кремниевых подложек. Из примесных атомов состава мишени следует отметить атомы кислорода, концентрация которых составляла от 2 до 4 ат.%. Содержание других примесей не превышала 1 ат.%. Диапазон изменения температуры составлял от 50 до 300 °С. Далее осажденные пленки подвергали локальной анодной обработке в 0,4–4 М водном растворе ортофосфорной кислоты через заранее сформированные на их поверхности маски из фоторезиста. Разные скорости анодирования алюминия и кремния обеспечивали формирование наноструктурированного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу [25]. Защищенные маской, непроанодированные области образовывали металлические электроды светодиодных структур.

Экспериментальная структура системы оптических межсоединений представлена на рис. 1. Конструктивно она состоит из двух контактов Шоттки, а также из слоя анодного оксида алюминия, разделяющего алюминиевые электроды. Слой анодного оксида алюминия содержит кремниевые наночастицы, излучающие свет в режиме лавинного пробоя контакта Шоттки (LED) [25]. Эти же контакты Шоттки при обратном смещении до напряжения пробоя, соответствующего 12 В, чувствительны к наружному световому сигналу, поэтому способны функционировать как фотодиоды (PD).

Кроме кремниевых кристаллов с диодными структурами, способными излучать и регистрировать оптический сигнал, для реализации системы оптических межсоединений изготавливались кремниевые кристаллы со сквозными отверстиями диаметром 5–10 мкм. Такие кристаллы пропускают оптический сигнал через сквозные отверстия с коэффициентом пропускания 20–25 % (рис. 1).

Разработанная экспериментальная структура работает следующим образом. Электрический сигнал обратного смещения на светодиодах величиной более 12 В вызывает излучение света вдоль алюминиевых электродов. Излучаемый свет проходит через сквозные отверстия в кремниевых кристаллах (optical interposer) и далее регистрируется при помощи диодных структур, расположенных на противоположном кремниевом кристалле и функционирующих в режиме фотодиодов, как схематично показано на рис. 1.

Просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия использовались для определения размеров кремниевых наночастиц, встроенных в алюмооксидную матрицу. Спектры электролюминесценции светодиодных структур измеряли при комнатной температуре с использованием GaAs-фотоумножителя.

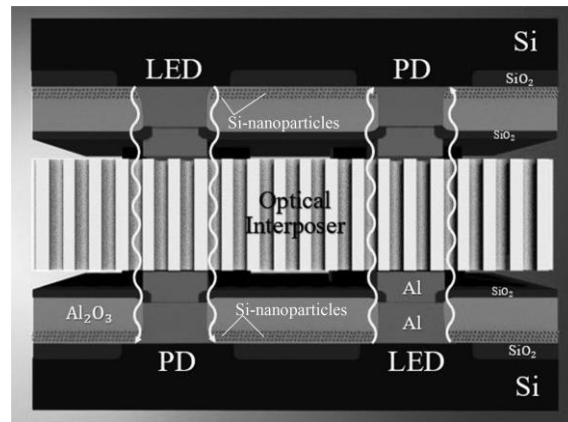


Рис. 1. Схема функционирования междучиповых оптических межсоединений
Fig. 1. Schematic view of interchip optical interconnects

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены фотографии кремниевых наночастиц, полученных при помощи просвечивающей электронной микроскопии. Изображение 2, *a* соответствует нанокompозитным пленкам, осажденным на кремниевые подложки, нагретые до 100 °С, в то время как изображение 2, *b* соответствует нанокompозитным пленкам, осажденным на подложки, нагретые до 300 °С. Из рисунка видно, что кремниевые наночастицы имеют кристаллическую структуру и их размеры в случае нагрева подложки до 100 °С составляют порядка 4 нм, в то время как в пленках, осаждаемых на подложки, нагретые до 300 °С, размеры кремниевых наночастиц составляют порядка 5–6 нм.

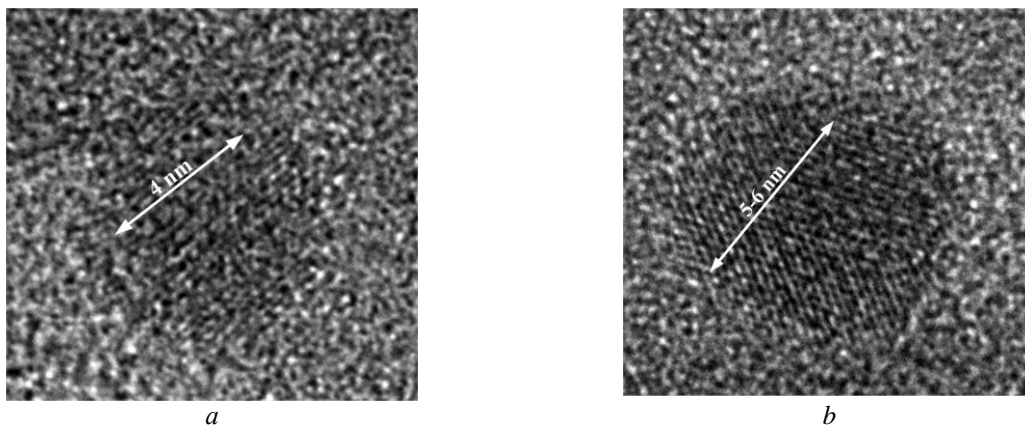


Рис. 2. Кремниевые наночастицы, полученные при осаждении на подложки, нагретые до 100°C (*a*), нагретые до 300°C (*b*)

Fig. 2. Silicon nanoparticles obtained by deposition on substrates heated to 100 °C (*a*), to 300 °C (*b*)

Различие размеров кремниевых наночастиц в исследуемых пленках находит подтверждение и при регистрации спектров электролюминесценции экспериментальных светодиодных структур (рис. 3). Так, максимум спектра электролюминесценции для структур с кремниевыми наночастицами меньшего размера соответствует 630 нм, в то время как аналогичный параметр для больших кремниевых наночастиц составляет 670 нм. Таким образом, для кремниевых наночастиц меньшего размера наблюдается так называемый голубой сдвиг спектра электролюминесценции.

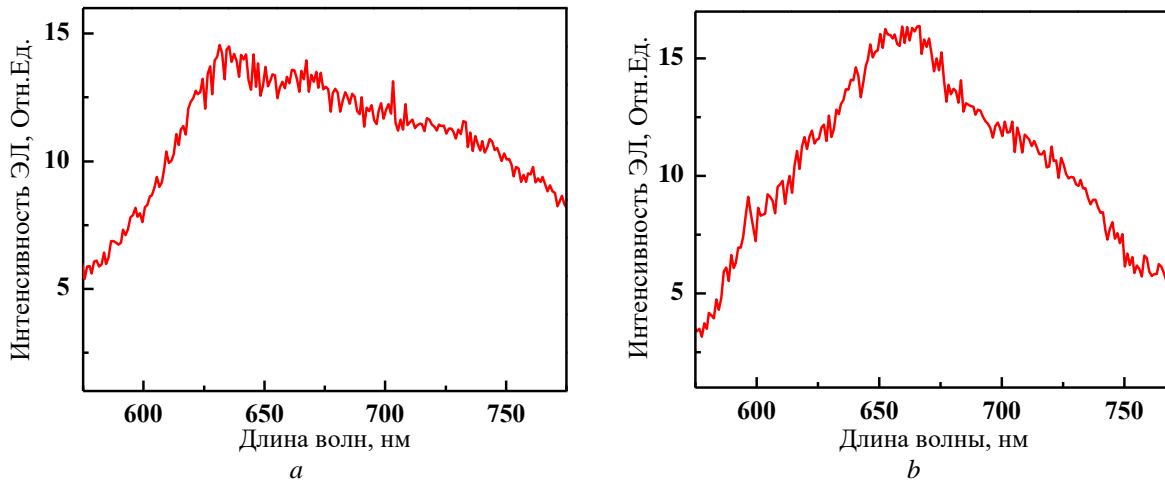


Рис. 3. Спектры электролюминесценции структур с кремниевыми наночастицами 4 нм (а) и 5–6 нм (b)
Fig. 3. Electroluminescence spectra of the samples with silicon nanoparticles of 4 nm (a) and 5–6 nm (b)

Полученный результат объясняется тем, что атомы кремния, осаждаемые в процессе магнетронного распыления на более холодную подложку, менее подвижны по сравнению с атомами на нагретой подложке. То есть пониженная температура подложек ограничивает миграционную активность кремниевых атомов, что, в конечном счете, приводит к образованию кремниевых наночастиц меньшего размера. Совместное магнетронное осаждение алюминия и кремния на подложки, нагретые до 50 °С, обеспечивает формирование кремниевых наночастиц размером до 3 нм и люминесценцию с пиком около 560 нм, однако такие пленки обладают недостаточной механической прочностью из-за низкой адгезии к подложке, что приводит к отслаиванию формируемых пленок при их толщинах более 1 мкм. Тем не менее при дальнейшей оптимизации технологии вполне возможно использование и этого температурного диапазона. Уменьшение длины волны электролюминесценции в исследуемых структурах является следствием квантового ограничения носителей заряда (электронов) в формируемых кристаллитах.

Следует отметить, что при помощи просвечивающей электронной микроскопии выявлялись кремниевые наночастицы с минимальными размерами. Кремниевые частицы больших размеров определялись при помощи сканирующей электронной микроскопии. В частности, для нанокompозитных пленок, осажденных при температуре кремниевых подложек 50 °С, размеры кремниевых наночастиц достигали величины 10 нм, при этом средний размер кремниевых наночастиц составлял 6 нм. Аналогичные размеры для нанокompозитных пленок, осажденных при температуре кремниевых подложек 300 °С, составляли 15 и 10 нм соответственно.

Исследование фотолюминесценции в формируемых пленках показало, что максимум спектров излучения находится в тех же диапазонах длин волн, что и при электролюминесценции. Разница положений пиков не превышала 10–20 нм. Такое несоответствие пиков может быть объяснено тем, что при регистрации фотолюминесценции исследуется приповерхностная область пленок, а в случае электролюминесценции сигнал регистрируется из более глубоких областей исследуемых пленок.

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики лавинных диодов, работающих в режиме фотодиодов. Как видно из характеристик, световой сигнал регистрируется в диапазоне обратного смещения от 0 до 12 В. После превышения величины обратного смещения 12 В вольт-амперные характеристики со световым экспонированием и без него практически не различаются, что может быть объяснено внутренним светоизлучением вследствие лавинного пробоя. Здесь же для сравнения представлена характеристика исследуемых структур при экспонировании от внешнего оптического источника – вольфрамовой лампы накаливания, обеспечивающей поверхностную плотность мощности излучения 100 Вт/см². Отклик исследуемых структур на свет вольфрамовой лампы практически не отличается от отклика на излучение лавинного светодиода при напряжении смещения 15 В и токе 30 мА, что позволяет говорить о соизмеримости оптического сигнала обоих источников света.

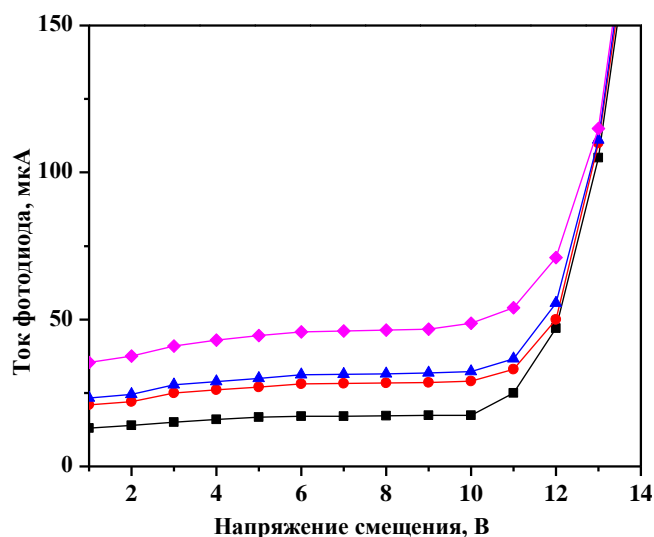


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики лавинных диодов при различных методах оптического экспонирования: квадраты – темновая характеристика, круги – оптическое экспонирование лавинным светодиодом при токе 30 мА; треугольники – оптическое экспонирование вольфрамовой лампой; ромбы – оптическое экспонирование лавинным светодиодом с импульсным режимом питания (скважность импульса – 3, усредненное значение тока – 30 мА)

Fig. 4. Current-voltage characteristics of avalanche diodes for various methods of light exposure: squares – dark characteristic, circles – light exposure by avalanche LED at a current at 30 mA; triangles – light exposure with a tungsten lamp; rhombs – light exposure by avalanche LED with a pulsed power mode (duty cycle –3, average current value – 30 mA)

Как видно из рис. 4, при импульсном режиме работы лавинного светодиода отклик фотодиода увеличивается более чем в 2 раза для одинаковых усредненных значений токов через светодиод. То есть эффективность оптопары увеличивается при увеличении амплитудного значения тока светодиода. При этом в интервалах между импульсами имеет место рассеивание джоулевого тепла, что обеспечивает надежную работу всей системы.

Отметим, что работа светодиода при увеличении тока в непрерывном (постоянном) режиме приводит к неконтролируемому разогреву и перегоранию металлических электродов. Таким образом, проведенные исследования показали, что коэффициент преобразования по току исследуемой оптоэлектронной системы может быть увеличен в несколько раз за счет использования импульсного режима работы лавинного светодиода.

Особое внимание следует уделить стабильности функционирования лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу. Измерения интенсивности светоизлучения при напряжении 14 В и токе 40 мА (рабочая площадь диода 0,01 мм²) в течение 1000 ч непрерывного функционирования показали отсутствие заметных деградационных эффектов. При этом отклонение интенсивности светоизлучения от среднего значения не превышало 10 %, что лучше аналогичного параметра для светодиодов на основе пористого кремния [4]. Далее следует отметить стабильность параметров и характеристик лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния при их хранении без электрического смещения. В частности, измерение электрических и оптических параметров светодиодов после двух лет хранения не выявили их заметного изменения, что еще раз демонстрирует преимущество данных светодиодов по сравнению со светодиодами на основе пористого кремния.

Заключение

Разработаны конструкция и технология изготовления межчиповых оптических межсоединений на лавинных светодиодах на основе наноструктурированного кремния. При этом спектр излучения светодиодов зависит от размеров кремниевых наночастиц, встроенных в матрицу анодного оксида алюминия, и определяется технологическими режимами их формирования. Среди основных характеристик разработанной системы

необходимо отметить коэффициент преобразования по току (эффективность оптопры), который достигает 0,2% при импульсном режиме работы лавинных светодиодов, что открывает новые перспективы для развития кремниевой оптоэлектроники.

References

1. Newman R. Visible light from a silicon p-n junction. *Physical Review*. 1955;100(2):700-703. DOI: 10.1103/PhysRev.100.700.
2. Chynoweth A., McKay K. Photon emission from avalanche breakdown in silicon. *Physical Review*. 1956;102(2):369-376. DOI: 10.1103/PhysRev.102.369.
3. Richter A., Steiner P., Kozlowski F., Lang W. Current-induced light emission from a porous silicon device. *IEEE Electron Device Letters*. 1991;12(12):691-692. DOI: 10.1109/55.116957.
4. Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S., Masini G., La Monica S., Maiello G., Ferrari A. Stable electroluminescence from reverse biased n-type porous silicon-aluminum Schottky junction device. *Applied Physics Letters*. 1996; 68(15): 2108-2110. DOI: 10.1063/1.115892.
5. Lazarouk S., Baturevich A. [Perspectives of avalanche light emitting diodes based on porous silicon for optical interconnects]. *Izvestija Beloruskoj inzhenernoj akademii = Belarus Engineering Academy Letters*. 1999;7(01&02):147-149. (In Russ.)
6. Lazarouk S., Jaguiro P., Leshok A., Borisenko V. Avalanche porous silicon light emitting diodes for optical intra-chip interconnects. *Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology*. World Scientific. 2001;MMN2000:41-44. DOI: 10.1142/9789812810861_0009.
7. Lazarouk S., Leshok A., Labunov V., Borisenko V. Efficiency of avalanche light-emitting diodes based on porous silicon. *Semiconductors*. 2005;39(1):136-138. DOI: 10.1134/1.1852663.
8. Kuznetsov V., Andrienko I., Haneman D. High efficiency blue-green electroluminescence and scanning tunneling microscopy studies of porous silicon. *Applied Physics Letters*. 1998;72(25):3323-3325. DOI: 10.1063/1.121592.
9. Gelloz B., Nakagawa T., Koshida N. Enhancement of the quantum efficiency and stability of electroluminescence from porous silicon by anodic passivation. *Applied Physics Letters*. 1998;73(14):2021-2023. DOI: 10.1063/1.122355.
10. Karsenty A., Sa'ar A., Ben-Yosef N., Shappir J. Enhanced electroluminescence in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor transistors with thin silicon layer. *Applied Physics Letters*. 2003;82(26):4830-4832. DOI: 10.1063/1.1587877.
11. Chatterjee A., Bhuvu B., Schrimpf R. High-speed light modulation in avalanche breakdown mode for Si diodes. *IEEE Electron Device Letters*. 2004;25(9):628-630. DOI: 10.1109/LED.2004.834247.
12. Snyman L.W., Aharoni H., Du Plessis M. A dependency of quantum efficiency of silicon CMOS n/sup+/pp/sup+/LEDs on current density. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2005;17(10):2041-2043. DOI: 10.1109/LPT.2005.856448.
13. Snyman L.W., Du Plessis M., Aharoni H. Injection-avalanche-based n+ pn silicon complementary metal-oxide-semiconductor light-emitting device (450-750 nm) with 2-order-of-magnitude increase in light emission intensity. *Japanese journal of Applied physics*. 2007;46(4B):2474-2480. DOI: 10.1143/JJAP.46.2474.
14. Du Plessis M., Venter P.J., Bellotti E. Spectral characteristics of hot electron electroluminescence in silicon avalanching junctions. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2013;49(7):570-577. DOI: 10.1109/JQE.2013.2260724.
15. Kulakci M., Turan R. Improvement of light emission from Tb-doped Si-based MOS-LED using excess Si in the oxide layer. *Journal of Luminescence*. 2013;137:37-42. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.11.005.
16. Ogudo K.A., Snyman L.W., Polleux J.-L., Viana C., Tegegne Z., Schmieder D. Towards 10-40 GHz on-chip micro-optical links with all integrated Si Av LED optical sources, Si N based waveguides and Si-Ge detector technology. *Proc. SPIE 8991, Optical Interconnects XIV*. 2014;8991:899108(1-16). DOI: 10.1117/12.2038079.
17. Xu K. Electro-optical modulation processes in Si-PMOSFET LEDs operating in the avalanche light emission mode. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014;61(6):2085-2092. DOI: 10.1109/TED.2014.2318277.
18. Xu K. Silicon MOS optoelectronic micro-nano structure based on reverse-biased PN junction. *Physica Status Solidi (a)*. 2019;216(7):1800868(1-9). DOI: 10.1002/pssa.201800868.
19. Dutta S., Steeneken P.G., Agarwal V., Schmitz J., Annema A.-J., Hueting R.J. The avalanche-mode superjunction LED. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2017;64(4):1612-1618. DOI: 10.1109/TED.2017.2669645.
20. Okhai T.A., Snyman L.W., Polleux J.-L. Wavelength dispersion characteristics of integrated silicon avalanche LEDs: potential applications in futuristic on-chip micro-and nano-biosensors. *Proc. SPIE 10036, Fourth Conference on Sensors, MEMS, and Electro-Optic Systems*. 2017;10036:1003604(1-22). DOI: 10.1117/12.2264200.
21. Agarwal V., Dutta S., Annema A., Hueting R., Schmitz J., Lee M., Charbon E., Nauta B. Optocoupling

- in CMOS. *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*.2018(IEMD18):739-742. DOI: 10.1109/IEDM.2018.8614523.
22. Xu K., Chen Y., Okhai T.A., Snyman L.W. Micro optical sensors based on avalanching silicon light-emitting devices monolithically integrated on chips. *Optical Materials Express*. 2019;9(10):3985-3997. DOI: 10.1364/OME.9.003985.
23. Krakars M., Kneevic T., Nanver L. Reverse breakdown and light-emission patterns studied in Si PureB SPADs. *42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2019;MIPRO2019:30-35. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757007.
24. Lazarouk S., Leshok A., Kozlova T., Dolbik A., Le Dinh V., Ilkov V., Labunov V. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 2019;18(3&4):1940091(1-5). DOI: 10.1142/S0219581X1940091X.
25. Lazarouk S., Sasinovich D., Katsuba P., Labunov V., Leshok A., Borisenko V. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina. *Semiconductors*. 2007;41(9):1109-1112. DOI: 10.1134/S1063782607090163.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Ле Динь Ви, аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Лешок А.А., к.ф.-м.н., начальник Центра 4.11 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Долбик А.В., научный сотрудник НИЛ 4.12 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Перко С.Л., аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лазарук С.К., д.ф.-м.н., заведующий НИЛ 4.12 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Le Dinh Vi, PG student of Micro- and nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Leshok A.A., PhD, Head of Center 4.11 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dolbik A.V., Research Worker of laboratory 4.12 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Perko S.L., PG student of Micro- and nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lazarouk S.K., DSci., Head of laboratory 4.12 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

20013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
e-mail:levi.ntv@gmail.com
Ле Динь Ви

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
e-mail:levi.ntv@gmail.com
Le Dinh Vi



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-72-80>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.323

НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫЙ ТРАНЗИСТОР С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОТВОДА НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

ВОЛЧЁК В.С., ЛОВШЕНКО И.Ю., ШАНДАРОВИЧ В.Т., ДАО ДИНЬ ХА

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

Поступила в редакцию 24 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Эффект саморазогрева представляет собой основную проблему для мощных электронных, оптоэлектронных и фотонных приборов на основе нитрида галлия. Среднее увеличение температуры и чрезвычайно неравномерное распределение рассеиваемой мощности в структуре транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия, следствием чего является образование области с очень высокой температурой в окрестности проводящего канала, приводит к деградации тока стока, выходной мощности, коэффициента усиления и ухудшению надежности прибора. Цель работы – разработка конструкции с помощью численного моделирования и исследование особенностей тепловых процессов, протекающих в структуре транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия с системой теплоотвода на основе графена. Объектом исследования являются структуры, созданные на подложках сапфира, кремния и карбида кремния. Предметом исследования являются электрические, частотные и тепловые характеристики транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия с системой теплоотвода на основе графена. Результаты расчетов показывают эффективность внедрения в конструкцию транзистора с высокой подвижностью электронов графенового теплоотводящего элемента, позволяющего уменьшить влияние эффекта саморазогрева и улучшить эксплуатационные характеристики прибора. Преимущество предлагаемой концепции состоит в том, что теплоотводящий элемент на основе графена конструктивно соединен с теплопоглощающим элементом и предназначен для отведения тепла непосредственно от области максимальной температуры. Полученные результаты могут быть использованы предприятиями электронной промышленности Республики Беларусь при создании элементной базы силовой электроники на основе нитрида галлия.

Ключевые слова: проектирование, высокочастотный транзистор, гетероструктура, полупроводник.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования проводились в рамках проекта «Разработка конструкции нитрид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена» при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ Т18М-108). Авторы выражают благодарность Барановой М.С. и Гвоздовскому Д.Ч. за предоставление данных о температурной зависимости теплопроводности нитрида кремния.

* Статья рекомендована для опубликования организационным комитетом Белорусско-Китайского конкурса научно-технического творчества студентов (г. Минск, 22 ноября – 27 декабря 2019 г.).

Для цитирования. Волчѣк В.С., Ловшенко И.Ю., Шандарович В.Т., Дао Динь Ха. Нитрид-галлиевый транзистор с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 72-80.

GALLIUM NITRIDE HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR WITH AN EFFECTIVE GRAPHENE-BASED HEAT REMOVAL SYSTEM

VLADISLAV S. VOLCHECK, IVAN YU. LOVSHENKO, VERANIKA T. SHANDAROVICH,
DAO DINH HA

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

Submitted 24 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The self-heating effect is a major problem for gallium nitride electronic, optoelectronic and photonic devices. Average temperature increase and non-uniform distribution of dissipated power in the gallium nitride high electron mobility transistor lead to the forming of a hot spot in the vicinity of the conducting channel and to degradation of the drain current, output power and gain, as well as poor reliability. The purpose of this work is to develop the design using numerical simulation and to study the thermal phenomena that occur in the gallium nitride high-electron mobility transistor with a graphene-based heat removal system. The objects of the research are the structures fabricated on sapphire, silicon and silicon carbide substrates. The subject of the research is the electrical, frequency and thermal characteristics of the gallium nitride high-electron mobility transistor with a graphene-based heat removal system. The calculation results show that the integration of a graphene-based heat removal element into the design of the high electron mobility transistor can effectively mitigate the self-heating effect and thus improve the device performance. The advantage of the proposed concept is that the graphene-based heat removal element is structurally connected with a heat sink and aims at removing heat immediately from the maximum temperature region, providing an additional heat escape channel. The obtained results can be used by the electronics industry of the Republic of Belarus for developing the hardware components of gallium nitride power electronics.

Keywords: design, high-frequency transistor, heterostructure, semiconductor.

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

Gratitude. This work was supported by the grant T18M-108 of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research. The authors would like to express special thanks to Baranova M.S. and Hvazdouski D.C. for providing the data on the temperature dependence of the thermal conductivity of silicon nitride.

For citation. Volcheck V.S., Lovshenko I.Yu., Shandarovich V.T., Dao Dinh Ha. Gallium nitride high electron mobility transistor with an effective graphene-based heat removal system. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 72-80.

Введение

Эффект саморазогрева является важнейшей проблемой для мощных электронных, оптоэлектронных и фотонных приборов на основе нитрида галлия (GaN). Среднее увеличение температуры и крайне неравномерное распределение рассеиваемой мощности в структуре транзистора с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) на основе GaN, следствием чего является образование области с очень высокой температурой рядом с проводящим каналом, приводит к деградации тока стока, выходной мощности, коэффициента усиления и ухудшению надежности прибора [1]. Для уменьшения влияния эффекта саморазогрева предлагается ряд технологических решений, таких как монтаж приборной структуры методом перевернутого

*The manuscript has been recommended for publication by the Organizing Committee of the Belarusian-Chinese Competition of Scientific and Technical Creativity of Students (Minsk, November 22 - December 27, 2019).

кристалла на подложку из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, например, нитрида алюминия (AlN) [2]; атомарное присоединение поликристаллического алмаза, выращенного методом осаждения из газовой фазы, к эпитаксиальной структуре вместо стравленной подложки кремния (Si) [3]; формирование эпитаксиальной структуры методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы на монокристаллической изолирующей подложке алмаза [4]; создание в подложке Si канавки и осаждение на ее стенки комбинации AlN-медь [5]; интеграция в конструкцию ТВПЭ теплоотводящих элементов (ТОЭ) на основе алмазоподобных соединений [6]. Ширина запрещенной зоны GaN равна 3,4 эВ, обуславливая высокое значение напряжения электрического пробоя. Кроме того, скорость насыщения электронов в GaN минимум в два раза выше, чем у Si. Благодаря этим свойствам транзисторы на основе GaN могут выдерживать очень большие плотности мощности, порядка нескольких десятков ватт на миллиметр ширины канала [7]. Однако при таких уровнях мощности омический нагрев приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик транзистора и, несмотря на предлагаемые решения, эффект саморазогрева продолжает оставаться главной проблемой.

В статье исследуется конструкция ТВПЭ на основе GaN с графеновым ТОЭ, обеспечивающим снижение температуры в активной области, уменьшая тем самым влияние эффекта саморазогрева на характеристики прибора. Теоретические значения теплопроводности графена находятся в диапазоне от 10 до 100 Вт/см·К [8], значительно превышая значения этого параметра для любого другого материала, используемого при создании ТВПЭ. Предлагаемая концепция отличается от представленных технологий тем, что графеновый ТОЭ, который соединен конструктивно с теплопоглощающим элементом, предназначен для отведения тепла напрямую от области повышенной температуры у затвора [9].

Структура

Объектом исследования является приборная структура ТВПЭ на основе GaN, которая схематически изображена на рис. 1. В качестве материала подложки используется сапфир (Al_2O_3), Si или карбид кремния (6H-SiC). Толщины подложки, слоя зарождения AlN, буферного слоя $Al_{0,5}Ga_{0,5}N/GaN$, спейсера AlN, барьерного слоя $Al_{0,2}Ga_{0,8}N$, слоя оксида лантана (La_2O_3), применяемого в качестве подзатворного диэлектрика, пассивационного слоя нитрида кремния (Si_3N_4) и графенового ТОЭ составляют соответственно 20 мкм, 20 нм, 0,6/0,9 мкм, 2 нм, 20 нм, 10 нм, 5 мкм и 10 нм. Толщина и длина затвора равны 0,3 и 0,5 мкм соответственно. Расстояния затвор-исток и затвор-сток составляют 1 мкм и 2,5 мкм. Ширина приборной структуры равна 100 мкм.

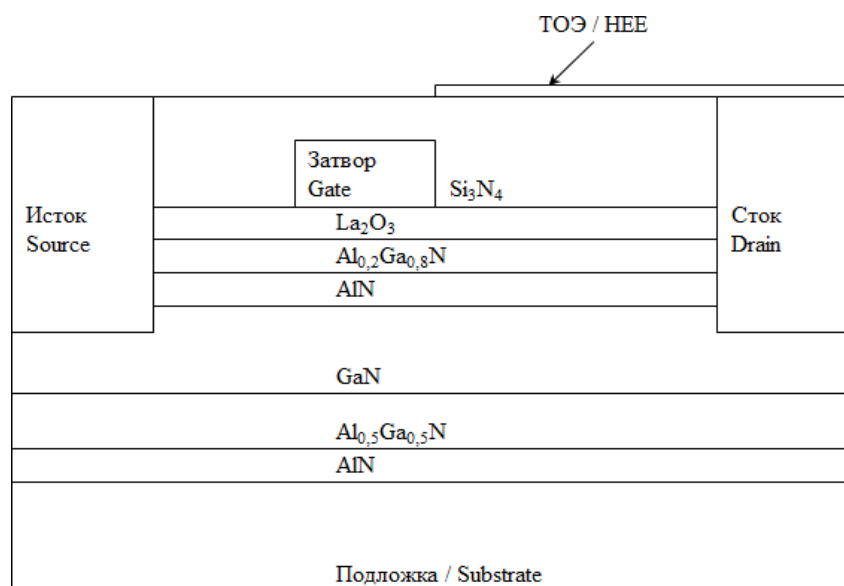


Рис. 1. Приборная структура ТВПЭ на основе GaN с графеновым ТОЭ
Fig. 1. GaN high electron mobility transistor (HEMT) with the graphene heat-eliminating element (HEE)

Технологическая сложность создания графенового ТОЭ на поверхности транзисторной структуры на основе GaN заключается в том, что технология механического расщепления высокоориентированного пиролитического графита неприменима для этой цели вследствие случайного характера процесса получения графена. По этой причине в работе [9] предлагается метод, в основе которого лежит использование полиметилметакрилата (ПММА) в роли вспомогательных мембран. Сначала на подложку методом центрифугирования при частоте вращения ротора центрифуги 3500 об/мин наносится фоторезист, который затем запекается в течение 1,5 мин при температуре 110 °С. Далее выполняется экспонирование подложки ультрафиолетом, после чего методом центрифугирования при частоте вращения ротора центрифуги 3500 об/мин наносится и запекается в течение 1,5 мин при температуре 130 °С слой ПММА. На следующей стадии проводится механическое отшелушивание графена от графита на поверхность ПММА. После растворения фоторезиста подложка погружается на дно, а гидрофобные мембраны ПММА с графеном оказываются на плаву. Из жидкости мембраны вынимаются, используя предметное стекло с отверстием, которое закрепляется на держателе микроманипулятора. Отверстие в предметном стекле позволяет использовать оптический микроскоп во время настройки положения подложки, необходимой для осаждения графена в определенной области на поверхности приборной структуры. Процедура формирования графенового ТОЭ заканчивается после растворения слоя ПММА в ацетоне.

Уравнения и модели

Приборное моделирование исследуемой структуры проводится в рамках классической диффузионно-дрейфовой теории с моделью подвижности класса Коэ – Томаса, описывающей подвижность носителей заряда в нитридах элементов III группы в условиях слабого и сильного электрических полей и учитывающей влияние температуры, концентрации донорной примеси и напряженности поля [10]. Моделирование тепловых процессов, протекающих в структуре прибора во время его работы, осуществляется путем самосогласованного решения системы дифференциальных уравнений, включающей уравнение Пуассона, уравнения непрерывности и уравнение теплового потока. Согласно модели саморазогрева [11], в динамически равновесном состоянии уравнение теплового потока принимает следующий вид:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + H = 0, \quad (1)$$

где C – теплоемкость, T – температура, λ – коэффициент теплопроводности и H – скорость тепловыделения.

Коэффициент теплопроводности является величиной, зависимой от температуры. Этот факт следует учитывать при приборном моделировании, так как распределение температуры в структуре, получаемое вследствие эффекта саморазогрева, очень чувствительно к значениям теплопроводности в отдельных областях прибора.

Температурная зависимость теплопроводности AlN, GaN, Si, Si₃N₄ и La₂O₃ имеет вид

$$\lambda(T) = \lambda(300 \text{ K}) \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha, \quad (2)$$

где α – коэффициент температурной зависимости.

Значения теплопроводности Si₃N₄ в диапазоне температур от 20 до 1000 К получены посредством моделирования из первых принципов и решения линеаризованного фононного уравнения переноса Больцмана. На базе рассчитанных данных подобрана степенная функция вида (2), наиболее точно описывающая температурную зависимость теплопроводности Si₃N₄.

Для 6H-SiC в качестве исходной используется температура 293 К [12]:

$$\lambda(T) = 3,87 \left(\frac{T}{293} \right)^{-1,49}. \quad (3)$$

Теплопроводность Al₂O₃ рассчитывается согласно формуле [13]

$$\lambda(T) = 512,92T^{-1,2868} + 1,7688 \times 10^{-5}T. \quad (4)$$

Параметры, используемые для расчета коэффициентов теплопроводности AlN, GaN, Si, Si₃N₄ и La₂O₃, представлены в таблице. Для AlGaN соответствующие параметры определяются согласно закону Вегарда.

Таблица. Параметры для определения теплопроводности
Table. Thermal conductivity model parameters

Параметр / Parameter	Материал / Material				
	AlN	GaN	Si	Si ₃ N ₄	La ₂ O ₃
$\lambda(300 \text{ K})$ (Вт/(см·К))	2,85	1,3	1,31	0,86	0,05817
α	-1,64	-0,28	-1,03	-1,2	-0,797
Источник	[14]	[14]	[14]	–	[15]

Результаты моделирования

Приборное моделирование проводится при следующих условиях:

Концентрация донорной примеси в барьерном слое составляет 10^{15} см^{-3} .

Температура окружающей среды равна 300 К.

Контактное тепловое сопротивление между подложкой и окружающей средой принимается равным нулю (задано значение $10^{-24} \text{ см}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$), чтобы температура на нижней поверхности подложки была фиксированной.

Поскольку в используемой системе компьютерного проектирования графен не поддерживается (значения его параметров отсутствуют в базе данных), материал ТОЭ рассматривается как диэлектрик с соответствующим графену коэффициентом теплопроводности равным $50 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$ [8].

Кроме нижней поверхности подложки температурное граничное условие $T_0 = 300 \text{ К}$ устанавливается также на правой стороне ТОЭ.

На рис. 2 показаны сток-затворная характеристика и зависимость передаточной проводимости (крутизны) от напряжения затвор-исток ($V_{ЗИ}$) ТВПЭ на основе GaN с графеновым ТОЭ при напряжении сток-исток ($V_{СИ}$), равном 0,1 В.

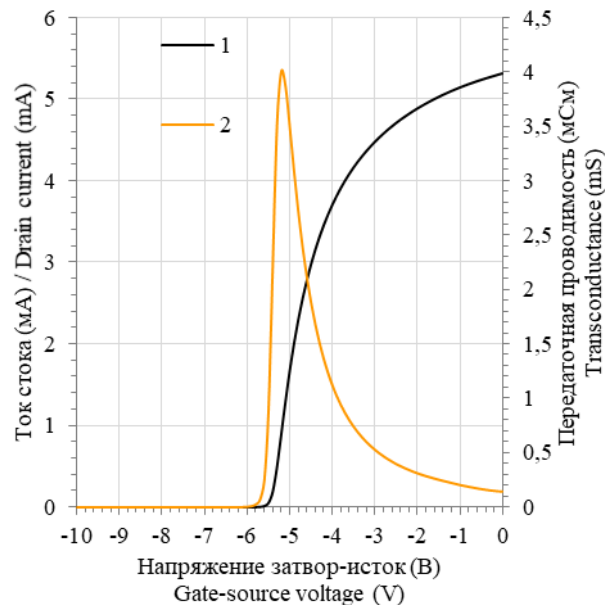


Рис. 2. Входные характеристики ($V_{СИ} = 0,1 \text{ В}$): 1 – сток-затворная характеристика; 2 – зависимость передаточной проводимости от напряжения затвор-исток

Fig. 2. Input characteristics (drain-source voltage (V_{DS}) is 0.1 V): 1 – drain current vs. gate-source voltage (V_{GS}); 2 – transconductance vs. gate-source voltage

При очень малом напряжении на стоке температура транзистора практически совпадает с температурой окружающей среды и, следовательно, входные вольт-амперные характеристики будут идентичны на разных подложках.

На рис. 3 показаны сток-стоковые характеристики и зависимости выходной мощности от напряжения сток-исток ($V_{зи} = 0$ В) ТВПЭ на основе GaN, сформированном на подложках Al_2O_3 , Si и 6H-SiC, без и с графеновым ТОЭ. В случае использования подложки Al_2O_3 ток стока и выходная мощность при $V_{зи} = 0$ В и $V_{си} = 30$ В увеличиваются на 17,511 % (со значений 0,046 А и 1,382 Вт до значений 0,054 А и 1,624 Вт соответственно), если в конструкцию ТВПЭ внедрен графеновый ТОЭ. В случае применения подложки Si ток стока и выходная мощность повышаются на 13,544 % (со значений 0,054 А и 1,630 Вт до значений 0,062 А и 1,851 Вт). Если же используется подложка 6H-SiC, ток стока и выходная мощность увеличиваются на 9,441 % (со значений 0,066 А и 1,980 Вт до значений 0,072 А и 2,167 Вт).

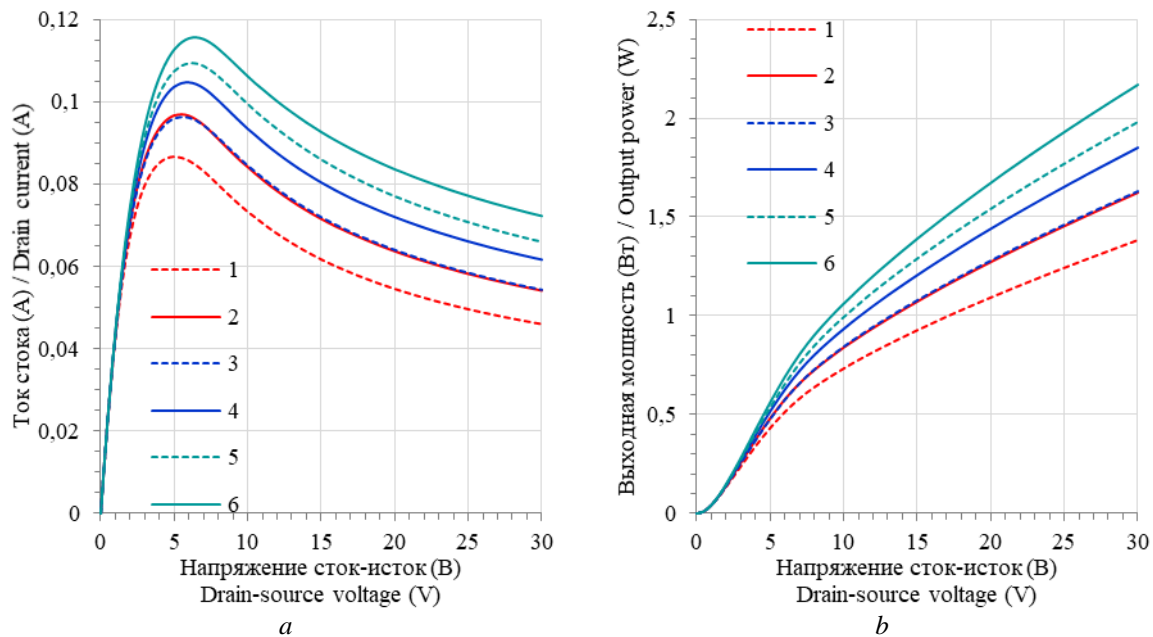


Рис. 3. Выходные характеристики ($V_{зи} = 0$ В) ТВПЭ на подложках Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) и 6H-SiC (5, 6) без (1, 3, 5) и с (2, 4, 6) ТОЭ: *a* – сток-стоковые характеристики; *b* – зависимости выходной мощности от напряжения сток-исток

Fig. 3. Output characteristics ($V_{GS} = 0$ V) of the HEMT on the Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) and 6H-SiC (5, 6) substrates without (1, 3, 5) and with (2, 4, 6) the HEE: *a* – drain current vs. drain-source voltage; *b* – output power vs. drain-source voltage

Тепловые характеристики, включающие профили распределения тепловыделения вдоль канала и зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток, ТВПЭ на основе GaN, созданном на подложках Al_2O_3 , Si и 6H-SiC, без и с графеновым ТОЭ, представлены на рис. 4. Для удобства показаны лишь фрагменты профилей распределения тепловыделения, полученные в окрестности границы затвора со стороны стока, которой соответствует координатам $x = 2,5$ мкм, при $V_{зи} = 0$ В и $V_{си} = 30$ В. Зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток рассчитываются при $V_{зи} = 0$ В.

На рис. 4, *a* отчетливо видны пики тепловыделения, расположенные у границы затвора со стороны стока. В случае использования подложки Al_2O_3 максимальный омический нагрев увеличивается на 32,194 % (со значения 7,669 Дж/см³ до значения 10,138 Дж/см³), если в конструкцию ТВПЭ внедрен ТОЭ на основе графена. При этом максимальная температура снижается на 38,6 К (6,633 %) со значения 582,0 К до значения 543,3 К. В случае применения подложки Si максимальное локальное тепловыделение повышается на 24,484 % (со значения 10,080 Дж/см³ до значения 12,548 Дж/см³) и максимальная температура уменьшается на 26,7 К (4,848 %) со значения 550,6 К до значения 523,9 К. Если же используется подложка 6H-SiC, максимальное локальное тепловыделение повышается на 16,759 % (со значения 13,828 Дж/см³ до значения 16,145 Дж/см³) и максимальная температура снижается на 16,4 К (3,151 %) со значения 519,2 К до значения 502,8 К.

После выполнения моделирования по постоянному току при напряжениях $V_{зи} = 0$ В и $V_{си} = 30$ В проведен анализ по переменному синусоидальному току в режиме малого сигнала. Для характеристики транзистора в режиме малого сигнала обычно используются следующие величины: коэффициент усиления по току и коэффициент однонаправленного усиления по мощности, которые определяются с помощью элементов матрицы рассеяния (S -параметров). Частотные зависимости этих величин для ТВПЭ на основе GaN, созданном на подложках Al_2O_3 , Si и 6H-SiC, без и с графеновым ТОЭ, приведены на рис. 5.

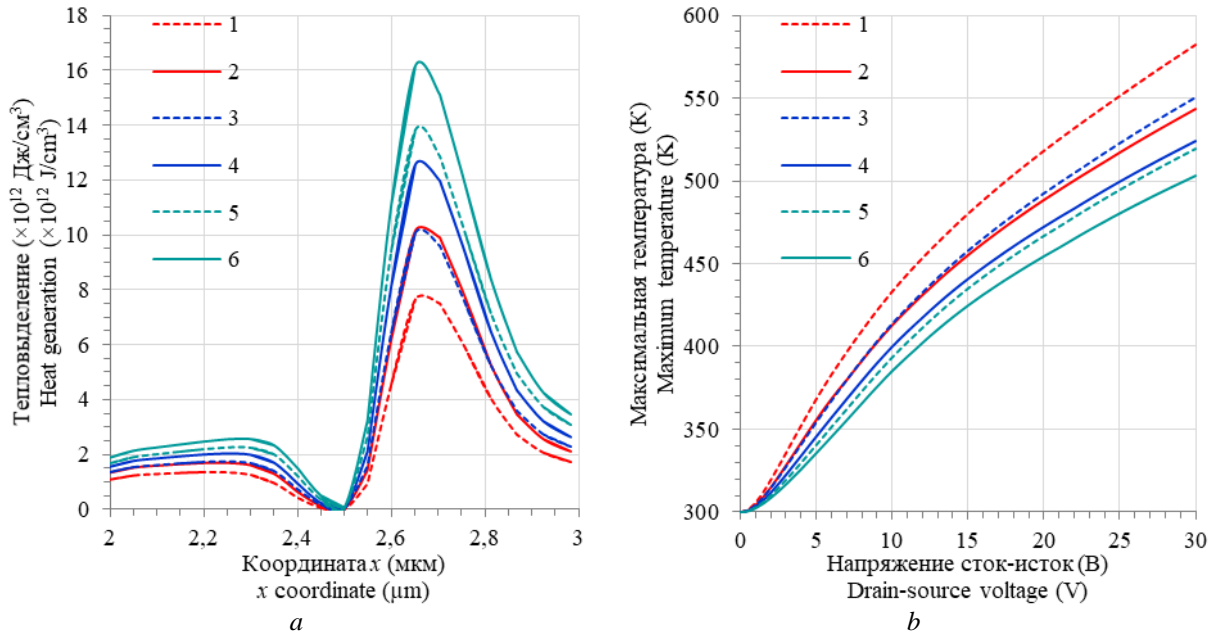


Рис. 4. Тепловые характеристики ТВПЭ на подложках Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) и 6H-SiC (5, 6) без (1, 3, 5) и с (2, 4, 6) ТОЭ: a – профили распределения тепловыделения вдоль канала ($V_{зи} = 0$ В, $V_{си} = 30$ В); b – зависимости максимальной температуры от напряжения сток-исток ($V_{зи} = 0$ В)

Fig. 4. Thermal characteristics of the HEMT on the Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) and 6H-SiC (5, 6) substrates without (1, 3, 5) and with (2, 4, 6) the HEE: a – heat generation profiles along the channel ($V_{GS} = 0$ V, $V_{DS} = 30$ V); b – maximum temperature vs. drain-source voltage ($V_{GS} = 0$ V)

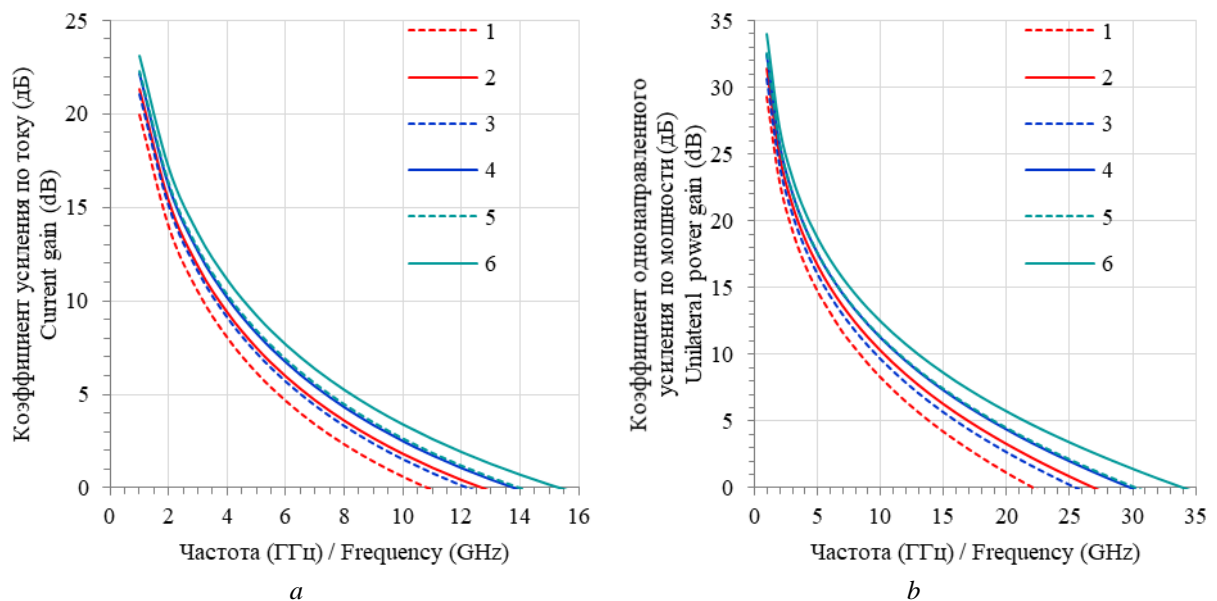


Рис. 5. Частотные характеристики ТВПЭ на подложках Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) и 6H-SiC (5, 6) без (1, 3, 5) и с (2, 4, 6) ТОЭ: a – зависимости коэффициента усиления по току от частоты; b – зависимости коэффициента однонаправленного усиления по мощности от частоты

Fig. 5. Frequency characteristics of the HEMT on the Al_2O_3 (1, 2), Si (3, 4) and 6H-SiC (5, 6) substrates without (1, 3, 5) and with (2, 4, 6) the HEE: a – current gain vs. frequency; b – unilateral power gain vs. frequency

В случае применения подложки Al_2O_3 граничная частота, определяемая как частота, при которой коэффициент усиления по току стремится к нулю, повышается на 17,593 % (со значения 10,8 ГГц до значения 12,7 ГГц) после интеграции в конструкцию ТВПЭ ТОО на основе графена. Максимальная частота генерации – частота, при которой коэффициент однонаправленного усиления по мощности стремится к нулю, – повышается на 21,171 % (со значения 22,2 ГГц до значения 26,9 ГГц). Если используется подложка Si, граничная частота увеличивается на 13,115 % (со значения 12,2 ГГц до значения 13,8 ГГц), а максимальная частота генерации – на 16,863 % (со значения 25,5 ГГц до значения 29,8 ГГц). В случае же использования подложки 6H-SiC увеличение граничной частоты составляет 9,286 % (со значения 14,0 ГГц до значения 15,3 ГГц), максимальной частоты генерации – 12,211 % (со значения 30,3 ГГц до значения 34,0 ГГц).

Заключение

В статье предложена конструкция ТВПЭ на основе GaN с эффективной системой теплоотвода на основе графена. Посредством численного моделирования выполнена оценка электрических, частотных и тепловых характеристик разработанной структуры, созданной на подложках Al_2O_3 , Si и 6H-SiC. Результаты расчетов показывают эффективность внедрения в конструкцию ТВПЭ на основе GaN графенового теплоотводящего элемента, позволяющего уменьшить влияние эффекта саморазогрева и улучшить эксплуатационные характеристики прибора. При этом выяснено, что наибольшую эффективность система теплоотвода имеет в случае использования подложки Al_2O_3 (при $V_{\text{зи}} = 0$ В и $V_{\text{си}} = 30$ В увеличение тока стока и выходной мощности составляет 17,511 %).

Список литературы / References

1. Kuzmik J., Bychikhin S., Pichonat E., Gaquiere C., Morvan E., Kohn E., Teyssier J.-P., Pogany D. Self-Heating Phenomena in High-Power III-N Transistors and New Thermal Characterization Methods Developed Within EU Project TARGET. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2009;1(2):153-160. DOI: 10.1017/S1759078709990444.
2. Sun J., Fatima H., Koudymov A., Chitnis A., Hu X., Wang H.-M., Zhang J., Simin G., Yang J., Asif Khan M. Thermal Management of AlGaIn-GaN HFETs on Sapphire Using Flip-Chip Bonding with Epoxy Underfill. *IEEE Electron Device Letters*. 2003;24(6):375-377. DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2003.813362>.
3. Felbinger J.G., Chandra M.V.S., Sun Y., Eastman L.F., Wasserbauer J., Faili F., Babic D., Francis D., Ejeckam F. Comparison of GaN HEMTs on Diamond and SiC Substrates. *IEEE Electron Device Letters*. 2007;28(11):948-950. DOI: 10.1149/2.0441712jss.
4. Hirama K., Taniyasu Y., Kasu M. AlGaIn/GaN High-Electron Mobility Transistors with Low Thermal Resistance Grown on Single-Crystal Diamond (111) Substrates by Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2011;98(16):162112-1-162112-3. DOI: 10.1063/1.3574531.
5. Pavlidis G., Kim S.H., Abid I., Zegaoui M., Medjdoub F., Graham S. The Effects of AlN and Copper Back Side Deposition on the Performance of Etched Back GaN/Si HEMTs. *IEEE Electron Device Letters*. 2019;40(7):1060-1063. DOI: 10.1109/LED.2019.2915984.
6. Grishakov K.S., Elesin V.F., Kargin N.I., Ryzhuk R.V., Minnebaev S.V. Effect of a Diamond Heat Spreader on the Characteristics of Gallium-Nitride-Based Transistors. *Russian Microelectronics*. 2016;45(1):41-53. DOI: 10.1134/S1063739716010054.
7. Rajan S., Waltereit P., Poblenz C., Heikman S.J., Green D.S., Speck J.S., Mishra U.K. Power Performance of AlGaIn-GaN HEMTs Grown on SiC by Plasma-Assisted MBE. *IEEE Electron Device Letters*. 2004;25(5):247-249. DOI: 10.1109/LED.2004.826977.
8. Balandin A.A. Thermal Properties of Graphene and Nanostructured Carbon Materials. *Nature Materials*. 2011;10:569-581. DOI: 10.1038/NMAT3064.
9. Yan Z., Liu G., Khan J.M., Balandin A.A. Graphene Quilts for Thermal Management of High-Power GaN Transistors. *Nature Communications*. 2012;3:827:1-8. DOI: 10.1038/ncomms1828.
10. Farahmand M., Garetto C., Bellotti E., Brennan K.F., Goano M., Ghillino E., Ghione G., Albrecht J.D., Ruden P.P. Monte Carlo Simulation of Electron Transport in the III-Nitride Wurtzite Phase Materials System: Binaries and Ternaries. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2001;48(3):535-542. DOI: 10.1109/16.906448.

11. Wachutka G.K. Rigorous Thermodynamic Treatment of Heat Generation and Conduction in Semiconductor Device Modeling. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*. 1990;9(11):1141-1149. DOI: 10.1109/43.62751.
12. Burgemeister E.A., von Muench W., Pettenpaul E. Thermal Conductivity and Electrical Properties of 6H Silicon Carbide. *Journal of Applied Physics*. 1979;50(9):5790-5794. DOI: 10.1063/1.326720.
13. Hofmeister A.M. Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Single-Crystal MgO and Al₂O₃ and Related Compounds as a Function of Temperature. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2014;41:361-371. DOI: 10.1007/s00269-014-0655-3.
14. Piprek J. *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*. San Diego, California: Academic Press; 2003.
15. Fornarini L., Conde J.C., Alvani C., Olevano D., Chiussi S. Experimental Determination of La₂O₃ Thermal Conductivity and Its Application to the Thermal Analysis of a-Ge/La₂O₃/c-Si Laser Annealing. *Thin Solid Films*. 2008;516:7400-7405. DOI: 10.1016/j.tsf.2008.02.032.

Вклад авторов

Волчѣк В.С. определил составные элементы конструкции ТВПЭ на основе GaN с системой теплоотвода на основе графена; осуществил выбор и настройку методов и моделей, используемых при моделировании; выполнил серию расчетов электрических и тепловых характеристик ТВПЭ на основе GaN с системой теплоотвода на основе графена.

Ловшенко И.Ю. выполнил серию расчетов частотных характеристик.

Шандарович В.Т. выполнила анализ современного состояния по теме работы и поиск предлагаемых технологических решений проблемы саморазогрева ТВПЭ на основе GaN.

Дао Динь Ха сформулировал цель и задачи исследований.

Authors' contribution

Volcheck V.S. has chosen the components of the GaN HEMT structure with the graphene-based heat removal system; defined and adjusted the methods and models used in the simulation; calculated the electrical and thermal characteristics of the GaN HEMT with the graphene-based heat removal system.

Lovshenko I.Yu. has calculated the frequency characteristics.

Shandarovich V.T. has analyzed the current state and carried out the search for the proposed technology solutions to the self-heating problem that affects the GaN HEMT.

Dao Dinh Ha has formulated the purpose and the problems of the work.

Сведения об авторах

Волчѣк В.С., младший научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ловшенко И.Ю., заведующий НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шандарович В.Т., младший научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дао Динь Ха, к.т.н., исследователь Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона.

Information about the authors

Volcheck V.S., research assistant of the R&D laboratory 4.4 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lovshenko I.Yu., Head of the R&D laboratory 4.4 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shandarovich V.T., research assistant of the R&D laboratory 4.4 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dao Dinh Ha, PhD, researcher of Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375 17 293 84 09;
e-mail: vlad.volchek@bsuir.by
Волчѣк Владислав Сергеевич

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: vlad.volchek@bsuir.by
Volcheck Vladislav Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-81-87>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.375

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЧИТЫВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ КРЕМНИЕВЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО КРИСТАЛЛА МН2ХА030*

ДВОРНИКОВ О.В.¹, ЧЕХОВСКИЙ В.А.², ГАЛКИН Я.Д.^{2,3}, КУНЦ А.В.^{2,3},
СТЕМПИЦКИЙ В.Р.³, ПРОКОПЕНКО Н.Н.^{4,5}

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

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

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

⁴Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)

⁵Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (г. Зеленоград, Россия)

Поступила в редакцию 2 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью работы является анализ результатов экспериментального исследования зарядочувствительного усилителя с регулируемым коэффициентом преобразования и схемой восстановления базового уровня, изготовленного на базовом матричном кристалле МН2ХА030 для кремниевых фотоэлектронных умножителей. Усилитель получил название ADPreampl3. Измерение параметров проводилось на партии чипов в количестве 20 штук. В процессе измерения основных параметров усилителя на его вход подавался сигнал с эквивалентной схемы SiPM Photonique. В ходе измерения параметров выявлено, что разброс базового уровня по выходу FOut составил от -24 до 276 мВ при среднем значении 85,6 мВ. При этом изменение напряжения в узле FOutShift от -3 до 3 В достаточно для установления близкого к нулю значения базового уровня по выходу FOut. При отключенной схеме восстановления разброс базового уровня по выходу OutA составил от 300 до 800 мВ. При соединении вывода OutAShift с шиной нулевого напряжения среднее значение базового уровня по выходу OutA составило 3,72 мВ, а по выходу OutAinv – минус 2,42 мВ. Базовый уровень на выходах OutA и OutAinv плавно изменяется в диапазоне ±0,9 В. При максимальном усилении динамический диапазон ADPreampl3 превышает 20 дБ, однако при этом наблюдается зависимость коэффициента преобразования от величины входного заряда. Для регистрации больших входных зарядов рекомендуется уменьшить величину выходного импульса уменьшением напряжения на выводе Gain либо обрабатывать сигнал с вывода FOut. Проведено сравнение выходных параметров экспериментальных образцов с результатами компьютерного моделирования. Выявлено несоответствие результатов моделирования и измерений, времени пика и задержек распространения сигнала усилителя. Исходя из этого, принято решение о корректировке SPICE-параметров элементов, использованных при моделировании.

* Статья рекомендована для опубликования организационным комитетом Белорусско-Китайского конкурса научно-технического творчества студентов (г. Минск, 22 ноября – 27 декабря 2019 г.).

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектронный умножитель, считывающая электроника, базовый матричный кристалл, зарядочувствительный усилитель.

Для цитирования. Дворников О.В., Чеховский В.А., Галкин Я.Д., Кунц А.В., Стемпицкий В.Р., Прокопенко Н.Н. Анализ результатов проектирования считывающей электроники кремниевых умножителей на основе базового матричного кристалла MN2XA030. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 81-87.

ANALYSIS OF THE RESULTS OF DESIGNING READING ELECTRONICS OF SILICON PHOTOMULTIPLIER TUBES DRIVEN BY THE BASE MATRIX CRYSTAL MN2XA030

OLEG V. DVORNIKOV¹, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI², YAROSLAV D. GALKIN^{2,3},
ALEXEY V. KUNTS^{2,3}, VIKTOR R. STEMPICKI³, NIKOLAY N. PROKOPENKO^{4,5}

¹*Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC) (Minsk, Republic of Belarus)*

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

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

⁴*Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)*

⁵*Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Zelenograd, Russia)*

Submitted 2 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The aim of the work is analyzing the results of an experimental research of a charge-sensitive amplifier with an adjustable conversion coefficient and a base level recovery circuit fabricated on the master slice array MN2XA030 for silicon photomultiplier tubes. The amplifier is called ADPreamp13. The parameters were measured on a small batch of chips in the amount of 20 samples. In the process of measuring the main parameters of the amplifier, the signal from the SiPM Photonique equivalent circuit was fed to the amplifier input. In the course of measuring the parameters, it was revealed that the spread of the baseline level for the FOut output ranged from -24 to 276 mV with an average value of 85.6 mV. In this case, a voltage changing in the FOutShift node from -3 to 3 V is sufficient to establish a base level value of FOut output close to zero. When the recovery scheme is disabled, the spread of the basic level for OutA output is from 300 to 800 mV. When the OutAShift output is connected to the zero-voltage bus the average base level for OutA output is 3.72 mV and for OutAinv output it is minus 2.42 mV. The base level at the outputs OutA and OutAinv smoothly changes in the range of ± 0.9 V. At maximum gain, the dynamic range of ADPreamp13 exceeds 20 dB, however, at the same time, the conversion coefficient depends on the value of the input charge. To register large input charges, it is recommended to reduce the output pulse by reducing the voltage at the Gain pin or process the signal from the FOut pin. The output parameters of the experimental samples are compared with the results of computer simulation. The discrepancy between the results of modeling and measurements, peak time and propagation delays of the amplifier signal was revealed. Based on this, a decision to adjust the SPICE parameters of the elements used in the simulation was made.

Keywords: silicon photomultiplier, reading electronics, master slice array, charge-sensitive amplifier.

For citation. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Galkin Y.D., Kunts A.V., Stempitski V.R., Prokopenko N.N. Analysis of the results of designing reading electronics of silicon photomultiplier tubes driven by the base matrix crystal MN2XA030. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 81-87.

*The manuscript has been recommended for publication by the Organizing Committee of the Belarusian-Chinese Competition of Scientific and Technical Creativity of Students (Minsk, November 22 - December 27, 2019).

Введение

Кремниевые фотоэлектронные умножители (Si ФЭУ) с успехом применяются в ряде областей науки и техники для регистрации различных видов электромагнитных излучений [1-6], так как по сравнению с электровакуумными ФЭУ обладают меньшими размерами, напряжением питания и шумами [7-9]. Для обработки сигналов Si ФЭУ обычно применяют специализированные аналоговые интегральные схемы (ИС), оптимизированные с учетом параметров источника сигнала – внутренней емкости, амплитуды и длительности токового импульса.

Относительно невысокая потребность в считывающей электронике Si ФЭУ при высокой стоимости ее разработки объясняет актуальность создания специализированных ИС на базовых матричных кристаллах (БМК). Так, авторами на БМК МН2ХА030 был разработан зарядочувствительный усилитель с регулируемым коэффициентом преобразования и схемой восстановления базового уровня (ВБУ), получивший название ADPreampl3 [8].

Целью настоящей статьи является рассмотрение результатов экспериментальных исследований изготовленного на БМК МН2ХА030 усилителя ADPreampl3.

Методика проведения эксперимента

Подробное описание работы усилителя ADPreampl3 приведено в [8, 11]. При его реализации на БМК были внесены минимальные уточнения, вызванные незначительным изменением сопротивлений резисторов при выполнении межсоединений элементов БМК и формированием диодов на *p-n*- переходах полевого транзистора.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные образцы БМК МН2ХА030 с аналоговыми блоками были изготовлены в ОАО «ИНТЕГРАЛ» (<http://www.integral.by/>). Измерения выполнялись с помощью комплекта оборудования, включающего генераторы сигналов Agilent 33250 и Tektronix AFG3152C, цифровой осциллограф GDS 73354, двухканальный источник питающих напряжений Agilent 3646A, систему сбора данных 34970A с набором модулей, цифровой мультиметр Agilent 34410A. Сигнал на вход ADPreampl3 поступал от электрической эквивалентной схемы SiPM Photonique с 516 микроячейками [8].

Всего было измерено 20 штук усилителей ADPreampl3. Измерения позволили установить следующее.

1. Разброс базового уровня по выходу FOut составил от –24 до 276 мВ при среднем значении 85,6 мВ. При этом изменения напряжения в узле FOoutShift от –3 до 3 В достаточно для установления близкого к нулю значения базового уровня по выходу FOut.

2. При отключенной схеме ВБУ (вывод OutAShift не соединен с каким-либо напряжением) разброс базового уровня по выходу OutA составил от 300 до 800 мВ. При соединении вывода OutAShift с шиной нулевого напряжения среднее значение базового уровня по выходу OutA составило 3,72 мВ, а по выходу OutAinv – минус 2,42 мВ.

3. Схема ВБУ позволяет плавно изменять базовый уровень на выходах OutA, OutAinv в диапазоне $\pm 0,9$ В.

4. При разработке аналоговых блоков предполагалось, что выходной сигнал усилителя ADPreampl3 будет поступать на вход компаратора с малой входной емкостью. В связи с указанным выходные каскады усилителя представляют собой простые эмиттерные повторители на *n-p-n*-транзисторах и форма импульса по выводам FOut, OutA, OutAinv зависит от входной емкости осциллографа, что приводит к разным выходным импульсам по положительной и отрицательной полувольтне. При необходимости, уменьшить влияние емкости нагрузки на форму выходного импульса можно путем применения эмиттерного повторителя на комплементарных биполярных транзисторах, как в ранее разработанных на БМК МН2ХА030 операционных усилителях [12]. Такой выходной каскад увеличивает ток потребления усилителя, и поэтому его применение осуществляется только в обоснованных случаях. Для

исключения влияния емкости осциллографа на форму выходных импульсов при измерениях применялся неинвертирующий повторитель напряжения на микросхеме AD8132, подключенный к выводам FOut, OutA, OutAinv.

Как видно из рис. 1, включение повторителя обеспечивает практически одинаковые формы выходных импульсов обеих полярностей.

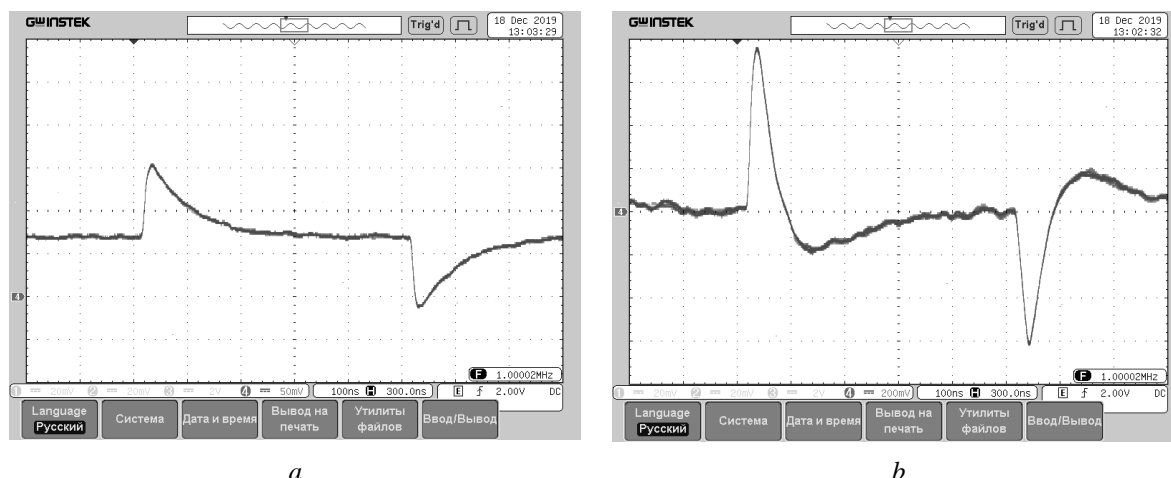


Рис. 1. Импульсы напряжения для 10-ти включенных микроячеек Si ФЭУ Photonic с повторителем напряжения: *a* – на выходе Fout; *b* – на выходе OutA
Fig. 1. Voltage pulses for 10 active microcells SiPM Photonic with a voltage follower: *a* – Fout output; *b* – OutA output

Заключение

Экспериментально установлено, что созданная схема восстановления базового уровня уменьшает разброс базового уровня усилителя ADPreampl3 почти в 100 раз и позволяет плавно изменять базовый уровень на выходах OutA, OutAinv в диапазоне $\pm 0,9$ В.

При максимальном усилении динамический диапазон ADPreampl3 превышает 20 дБ, однако при этом наблюдается зависимость коэффициента преобразования от величины входного заряда. Для регистрации больших входных зарядов рекомендуется уменьшить величину выходного импульса уменьшением напряжения на выводе Gain либо обрабатывать сигнал с вывода FOut.

Измерения выявили несовпадение результатов моделирования и измерений, времени пика и задержек распространения сигнала усилителя, поэтому планируется корректировка межсоединений элементов БМК для увеличения максимального выходного тока и уточнение Spice-параметров транзисторов по результатам измерений экспериментальных образцов.

Разработанный зарядочувствительный усилитель может найти применение при создании на БМК МН2ХА030 многоканальных микросхем обработки сигналов Si ФЭУ.

Список литературы

1. Paternoster G., Ferrario L., Acerbi F., Gola A.G., Bellutti P. Silicon Photomultipliers Technology at Fondazione Bruno Kessler and 3D Integration Perspectives. *ESSDERC 2019 – 49th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*. 2019:50-53. DOI: 10.1109/ESSDERC.2019.8901738.
2. Jiang W, Chalich Y, Deen M.J. Sensors for Positron Emission Tomography Applications. *Sensors*. 2019;19(22):5019 DOI:10.3390/s19225019.
3. Goertzen A.L., Zhang X., McClarty M.M., Berg E.J., Liu C., Kozlowski P., Retière F., Ryner L., Sossi V., Stortz G., Thompson C. J. Design And Performance of a Resistor Multiplexing Readout Circuit for a Sipm Detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2013;60(3):1541-1549. DOI: 10.1109/TNS.2013.2251661.
4. Dey S., Myers E., Lewellen T.K., Miyaoka R.S., Rudell J.C. A Row-Column Summing Readout Architecture for Sipm Based Pet Imaging Systems. *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)*. 2013:1-5. DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829062

5. Gundacker S., Auffray E., Frisch B., Hillemanns H., Jarron P., Meyer T., Pauwels K., Lecoq P.A. Systematic Study to Optimize Sipm Photodetectors for Highest Time Resolution in Pet. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2012;59(5):1798-1804. DOI: 10.1109/TNS.2012.2202918.
6. Seitz B., Stewart A.G., O'Neill K., Wall L., Jackson C. Performance Evaluation of Novel Sipm for Medical Imaging Applications. *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)*. 2013:1-4. DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829685.
7. Sabet H., Prekas G., Breen M., Bhandari H.B., Nickerson P., Derderian G., Robertson F., Kudrolli H., Cool S. High-Performance and Cost-Effective Detector Using Microcolumnar Csi:Tl and SiPM. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2012;59(5):1841-1849. DOI: 10.1109/TNS.2012.2202248.
8. Дворников О.В., Чеховский В.А., Прокопенко Н.Н., Галкин Я.Д., Кунц А.В., Бугакова А.В. Реализация считывающей электроники кремниевых фотоэлектронных умножителей на базовом матричном кристалле МН2ХА030. *Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение*. 2019;78:60-66. DOI: 10.20535/RADAP.2019.78.60-66.
9. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л. Средства регистрации импульсного видимого излучения малой интенсивности. Часть 1. Особенности и возможности многоканальных фотоприемников с внутренним усилением. *Приборы и методы измерений*. 2012;2(5):5-13.
10. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л. Средства регистрации импульсного видимого излучения малой интенсивности. Часть 2. Предварительная обработка сигналов кремниевых фотоэлектронных умножителей. Обзор. *Приборы и методы измерений*. 2013;1(6):5-13.
11. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Tchekhovski V.A., Galkin Y.D., Titov A.E., Bugakova A.V. Silicon Photomultipliers' Analog Interface with Wide Dynamic Range. *2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. 2019:1-2. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884430.
12. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. BiJFet Array Chip МН2ХА030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEXPolytech)*. 2018:13-17. DOI: 10.1109/EEXPolytech.2018.8564415.

References

1. Paternoster G., Ferrario L., Acerbi F., Gola A.G., Bellutti P. Silicon Photomultipliers Technology at Fondazione Bruno Kessler and 3D Integration Perspectives. *ESSDERC 2019 – 49th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*. 2019:50-53. DOI: 10.1109/ESSDERC.2019.8901738.
2. Jiang W, Chalich Y, Deen MJ. Sensors for Positron Emission Tomography Applications. *Sensors*. 2019;19(22):5019 DOI:10.3390/s19225019.
3. Goertzen A. L., Zhang X., McClarty M. M., Berg E. J., Liu C., Kozlowski P., Retière F., Ryner L., Sossi V., Stortz G., Thompson C. J. Design And Performance of a Resistor Multiplexing Readout Circuit for a Sipm Detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2013;60(3):1541-1549. DOI: 10.1109/TNS.2013.2251661.
4. Dey S., Myers E., Lewellen T.K., Miyaoka R.S., Rudell J.C. A Row-Column Summing Readout Architecture for Sipm Based Pet Imaging Systems. *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)*. 2013:1-5. DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829062.
5. Gundacker S., Auffray E., Frisch B., Hillemanns H., Jarron P., Meyer T., Pauwels K., Lecoq P. A Systematic Study to Optimize Sipm Photodetectors for Highest Time Resolution in Pet. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2012;59(5):1798-1804. DOI: 10.1109/TNS.2012.2202918
6. Seitz B., Stewart A.G., O'Neill K., Wall L., Jackson C. Performance Evaluation of Novel Sipm for Medical Imaging Applications. *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)*. 2013:1-4. DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829685.
7. Sabet H., Prekas G., Breen M., Bhandari H.B., Nickerson P., Derderian G., Robertson F., Kudrolli H., Cool S. High-Performance and Cost-Effective Detector Using Microcolumnar Csi:Tl and SiPM. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2012;59(5):1841-1849. DOI: 10.1109/TNS.2012.2202248.
8. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Galkin Y.D., Kunts A.V., Bugakova A.V. [Implementation of Reading Electronics of Silicone Photomultipliers on the Array Chip МН2ХА030]. *Vestnik NTUU «KPI». Seriya Radiotekhnika. Radioapparatostroenie = Visnyk NTUU KPI. Seriya Radiotekhnika. Radioapparatobuduvannia*. 2019;78:60-66. DOI: 10.20535/RADAP.2019.78.60-66. (In Russ.)
9. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L. [Registration Means of low intensity pulsed visible radiation. Part 1. Features and capabilities of multichannel photodetectors with internal amplification]. *Pribory I Metody Izmerenii = Devices and Methods of Measurements*. 2012;2(5):5-13. (In Russ.)
10. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L. [Registration Means of low intensity pulsed visible radiation. Part 2. Pre-processing of signals from silicon photomultiplier tubes. Overview]. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*. 2013;1(6):5-13. (In Russ.)

11. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Tchekhovski V.A., Galkin Y.D., Titov A.E., Bugakova A.V. [Silicon Photomultipliers' Analog Interface with Wide Dynamic Range]. *2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. 2019:1-2. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884430.
12. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziallau V.L., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. BiJFet Array Chip МН2ХА030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. 2018:13-17. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.

Вклад авторов

Дворников О.В. поставил задачу по улучшению уже существующего зарядочувствительного усилителя, разработал топологию микросхемы.

Чеховский В.А. оказал помощь при измерении параметров изделия.

Галкин Я.Д. выполнил моделирование входного каскада устройства, провел основную часть измерений параметров устройства, внес основной вклад в оформление статьи.

Кунц А.В. выполнил моделирование каскада изменения усиления устройства, принял участие в измерении параметров устройства.

Стемпичкий В.Р. является научным руководителем, оказал помощь при моделировании параметров изделия.

Прокопенко Н.Н. выполнил моделирование схемы восстановления базового уровня.

Authors' contribution

Dvornikov O.V. has set out the problem of improving an existing charge-sensitive amplifier, developed the topology of the chip.

Chekhovskiy V.A. has assisted in measuring device parameters.

Galkin Y.D. has simulated the input stage of the device, carried out the bulk of the measurements of the device parameters and made the main contribution to the design of the article.

Kunts A.V. has simulated a gain changing cascade of device and took part in measuring device parameters.

Stempitskiy V.R. acted as the scientific advisor and assisted in modeling device parameters.

Prokopenko N.N. has simulated the base level recovery circuit.

Сведения об авторах

Дворников О.В., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт».

Чеховский В.А., исполняющий обязанности заведующего лабораторией «Электронные методы и средства эксперимента» НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Галкин Я.Д., магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, инженер-электроник лаборатории электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Кунц А.В., магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, инженер-электроник лаборатории электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Information about the authors

Dvornikov O.V., D.Sci., Associate Professor, Chief Researcher of Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC).

Tchekhovski V.A., acting laboratory manager of "Electronic methods and experiment means" laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Galkin Y.D., master's student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, electronics engineer of Electronic methods and experiment means laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Kunts A.V., master's student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, electronics engineer of Electronic methods and experiment means laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Стемпичский В.Р., к.т.н., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники БГУИР, ведущий научный сотрудник НИЛ 4.4 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Прокопенко Н.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники Донского государственного технического университета.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375257250775;
e-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Галкин Ярослав Денисович

Stempitski V.R., PhD, Associate Professor of Micro- and nanoelectronics Department of BSUIR, Leader Researcher of laboratory 4.4 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Prokopenko N.N., D.Sci., Professor, Head of Information Systems and Radioelectronics Department of Don State Technical University.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375257250775
e-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Galkin Yaroslav Denisovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-88-96>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 234.538.9116549

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ Pt-Si ПРИ ЕЕ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

СОЛОДУХА В.А.¹, ПИЛИПЕНКО В.А.¹, КОМАРОВ Ф.Ф.², ГОРУШКО В.А.¹

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

² Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 8 апреля 2020

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния температуры быстрой термообработки на микроструктуру силицида платины. Пленки Pt толщиной 43,7 нм наносились на подложки монокристаллического кремния путем магнетронного распыления мишени из платины с чистотой 99,95 % на установке МРС 603 с криогенной откачкой до давления не хуже 5×10^{-5} Па. В качестве рабочей среды использовался аргон, чистота которого составляла 99,933 %. Быстрая термическая обработка (БТО) образцов проводилась в режиме теплового баланса путем облучения нерабочей стороны пластины некогерентным световым потоком в атмосфере азота в течение 7 с при температурах 200–550 °С. Источником излучения в установке служили кварцевые галогенные лампы накаливания. Для сравнительного анализа проводилась традиционная длительная термообработка пленок платины, которая осуществлялась при температуре 550 °С в течение 30 мин в атмосфере азота. Исследование микроструктуры силицида платины проводилось методом просвечивающей электронной микроскопии, с помощью которой показано, что с увеличением температуры БТО происходит сначала отжиг дефектов на межзеренных границах, о чем свидетельствует более четкий контраст от зерен, а затем наблюдается их рост, что говорит о формировании новой фазы (силицидной). Такой ход изменений микроструктуры силицида платины и размера зерен с повышением температуры обработки обуславливается теплотой его образования. Поскольку теплота образования фазы Pt₂Si минимальна и составляет 10,4–16,8 ккал/атом металла, а для PtSi – 15,7–25,5 ккал/атом металла, то для формирования стабильной структуры PtSi требуется более высокая температура. Проведены расчеты энергии активации процесса диффузионного синтеза силицида платины при БТО. Показано, что она на 0,37 эВ меньше, чем при длительной термообработке. Это означает, что в данном случае действует механизм ускорения данного процесса связанный с разрывом связей кремний-кремний и электронным возбуждением в кремнии под воздействием фотонного потока.

Ключевые слова: быстрый термический отжиг, просвечивающая микроскопия, электронная дифракция, размер зерен.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Комаров Ф.Ф., Горушко В.А. Электронно-микроскопические исследования системы Pt-Si при ее быстрой термообработке. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 88-96.

ELECTRON-MICROSCOPE INVESTIGATIONS OF THE Pt–Si SYSTEM DURING ITS RAPID THERMAL TREATMENT

VITALY A. SALADUKHA¹, VLADIMIR A. PILIPENKO¹, FADEY F. KOMAROV²,
VALENTINA A. GORUSHKO¹

¹ JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

² Scientific research institution «Institute of Applied Physics Problems named after A. N. Sevchenko»
of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 8 April 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper is dedicated to investigation of the influence of rapid thermal treatment on the microstructure of platinum silicide. The Pt films 43.7 nm thick were applied on the substrates of the monocrystal silicon by means of the magnetronic sputtering of platinum with the purity of 99.95 % on the MPC 603 set-up with the cryogenic pumping to the pressure not worse than 5×10^{-5} Pa. As an operating medium, argon was used with the purity of 99.933 %. Rapid thermal treatment of samples was performed in the thermal balance conditions by irradiating the non-working side of the wafer with the incoherent light flow in the nitrogen atmosphere during 7 s at the temperatures of 200–550 °C. The irradiation source in the set-up was represented by the quartz halogen incandescent lamps. The comparative analysis was done through the traditional long thermal treatment of the platinum films at a temperature of 550° C for 30 min in the nitrogen atmosphere. Investigations of the platinum silicide microstructure were performed by means of the transmission electron microscopy which demonstrated that the increase in the RTT temperature initiates first the annealing of defects on the inter-grain boundaries, which is evident from the more distinct contrast from the grains, and then one can observe their growth reflecting the forming of the new phase (silicide one). Such progress of changes of the platinum silicide microstructure and of the size of the grains with the increase in treatment temperature is determined by the heat of its forming. As the Pt₂Si phase forming heat is minimum and constitutes 10.4–16.8 Kkal/atom of metal, and for PtSi – 15.7–25.5 Kkal/atom of metal, then the forming of a stable PtSi structure requires a higher temperature. The authors carried out calculations of the activation energy of the diffusion synthesis of platinum silicide during rapid thermal treatment. The calculations show that it is 0.37 eV smaller, than during the long thermal treatment. This means that in this case this process is subject to acceleration related to the rupture of the silicon-silicon bonds and electron excitation in silicon under the influence of the photon flow.

Keywords: rapid thermal annealing, transmission microscopy, electron diffraction, size of grains.

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

For citation. Saladukha V.A., Pilipenko V.A., Komarov F.F., Gorushko V.A. Electron-microscope investigations of the Pt–Si system during its rapid thermal treatment. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 88-96.

Введение

Важную роль при создании контактных систем в современных СБИС играют силициды переходных и благородных металлов, используемые при создании барьеров Шоттки для электронной элементной базы в силовой электронике и изделиях, работающих в жестких условиях эксплуатации [1, 2]. Одним из таких широко используемых силицидов для создания диодов Шоттки является силицид платины, формируемый с применением традиционной технологии длительной термообработки [3–5]. Однако такие диоды характеризуются высокими значениями обратных токов, что вносит существенные ограничения на максимальную температуру их эксплуатации. Такие ограничения в основном обуславливаются формируемой микроструктурой такого силицида при длительной термообработке системы Pt-Si. Одним из перспективных направлений для получения силицида платины методом твердофазного синтеза является снижение времени термообработки, что с успехом реализуется при

использовании для этих целей быстрой термической обработки (БТО). В последнее время широкое внимание уделялось исследованию фазового состава силицида платины, полученного путем БТО системы Pt–Si, методом обратного резерфордского рассеяния. Такие исследования позволили установить основные закономерности фазовых переходов в такой системе при формировании силицида платины, но не дали возможность определить влияние температуры БТО на микроструктуру силицида платины, которая в основном определяет электрические параметры формируемых диодов Шоттки.

Целью настоящей работы явилось проведение исследований микроструктуры силицида платины в зависимости от режима БТО методом просвечивающей микроскопии, которая является одним из наиболее эффективных методов исследования, дающих информацию о состоянии кристаллической решетки материала, в том числе и его фазовом составе [6].

Объекты и методика эксперимента

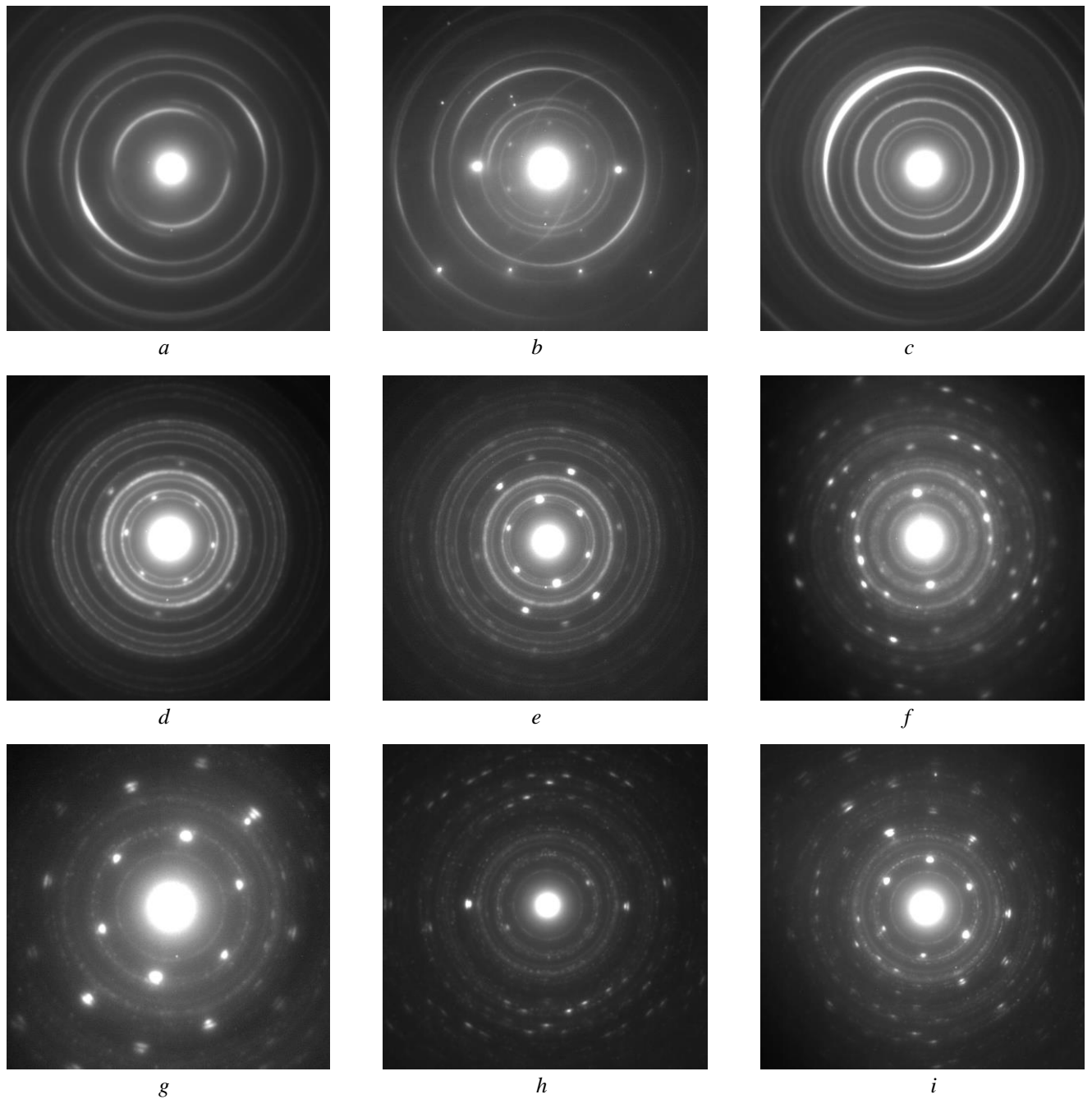
Для проведения исследований микроструктуры силицида платины в зависимости от режима БТО пленки платины толщиной 43,7 нм наносились на кремниевую подложку путем магнетронного распыления мишени из платины с чистотой 99,95 % на установке MPC 603 с криогенной откачкой до давления не хуже 5×10^{-5} Па. Быстрая термообработка образцов проводилась в режиме теплового баланса путем облучения нерабочей стороны пластины некогерентным световым потоком в атмосфере азота в течение 7 с при температурах 200–550 °С. Длительная термическая обработка проводилась при температуре 550 °С в течение 30 мин. Исследование микроструктуры силицида платины проводилось методом просвечивающей электронной микроскопии на электронном микроскопе Hitachi H-800 (Япония).

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования структурно-фазовых переходов в процессе формирования силицидов платины с использованием БТО, проведенные методом электронной дифракции (ЭД) (рис. 1), показали, что быстрая обработка исходной пленки Pt (рис. 1, *a*) при температуре 200 °С вызывает появление на дифракционной картине дополнительных колец и рефлексов (рис. 1, *b*), обусловленных появлением отдельных зародышей дисилицидной фазы платины на границе раздела Pt/Si. Это, вероятно, происходит за счет взаимной диффузии атомов Pt и Si в этой области. При этом имеет место небольшой рост размера зерен пленки Pt, который увеличивается с 11,9 нм для исходной пленки Pt до 13,9 нм после БТО (рис. 2, *b*). При температуре обработки 250 °С (рис. 1, *c*) на картине электронной дифракции кроме дифракционных колец, соответствующих кубической решетке Pt, уже четко заметно присутствие дополнительных колец, соответствующих фазе Pt₂Si, и увеличение размера зерен на поверхности до 25,8 нм (рис. 2, *c*). Повышение температуры БТО до 300 °С приводит к формированию протяженного слоя, содержащего фазу силицида платины Pt₂Si (рис. 1, *d*), и дальнейшему росту размера зерен до 27,8 нм.

Дальнейший рост температуры от 350 до 400 °С приводит к появлению на картинах ЭД колец, соответствующих уже двум фазам силицида платины: PtSi и Pt₂Si (рис. 1, *e*, *f*). Можно отметить и появление на картинах ЭД отдельных рефлексов, соответствующих {111}-плоскостям фазы PtSi. Данный тип плоскостей силицида имеет близкие значения межплоскостных расстояний с плоскостями семейства (220) кремниевой пластины. Наличие отдельных точечных рефлексов силицидной фазы говорит о хорошем сопряжении границы раздела PtSi/Si. Наблюдается также увеличение микрорельефа поверхности пленки за счет укрупнения ее зерен до 33,7 нм (рис. 2, *e*, *f*).

Увеличение температуры БТО до 450–550 °С приводит к наличию на дифракционных снимках только колец и рефлексов, принадлежащих фазе PtSi (рис. 1, *g*, *h*, *i*). При этом размер зерен в данном температурном диапазоне, достигнув величины 37,7 нм, не претерпевает каких-либо изменений (рис. 2).

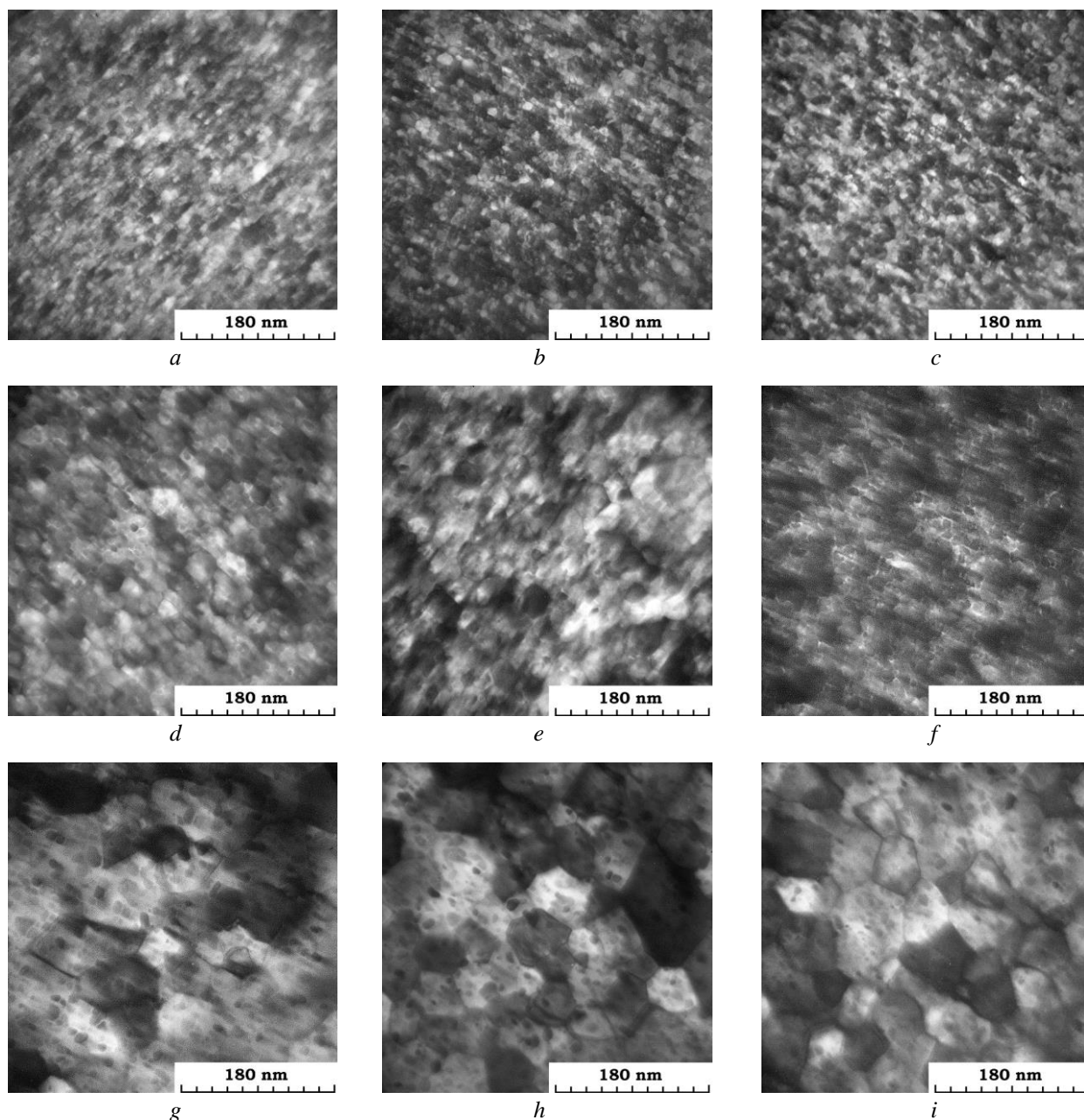


a – исходная пленка Pt; *b* – после БТО при 200 °C (Pt с Si); *c* – после БТО при 250 °C (Pt+Pt₂Si); *d* – после БТО при 300 °C (Pt₂Si); *e* – после БТО при 350 °C (PtSi +Pt₂Si); *f* – после БТО при 400 °C (PtSi +Pt₂Si); *g* – после БТО при 450 °C (PtSi); *h* – после БТО при 500 °C (PtSi); *i* – после БТО при 550 °C (PtSi)

Рис. 1. Электронограммы от пленки Pt на кремнии до и после БТО

a – initial film of Pt; *b* – after RTT at 200 °C (Pt with Si); *c* – after RTT at 250 °C (Pt+Pt₂Si); *d* – after RTT at 300 °C (Pt₂Si); *e* – after RTT at 350 °C (PtSi +Pt₂Si); *f* – after RTT at 400 °C (PtSi +Pt₂Si); *g* – after RTT at 450 °C (PtSi); *h* – after RTT at 500 °C (PtSi); *i* – after RTT at 550 °C (PtSi)

Fig. 1. Electronograms of the Pt film before and after RTT



a – исходная пленка Pt; *b* – после БТО при 200 °C (Pt с Si); *c* – после БТО при 250 °C (Pt+Pt₂Si);
d – после БТО при 300 °C (Pt₂Si); *e* – после БТО при 350 °C (PtSi +Pt₂Si); *f* – после БТО при 400 °C
(PtSi +Pt₂Si); *g* – после БТО при 450 °C (PtSi); *h* – после БТО при 500 °C (PtSi);
i – после БТО при 550 °C (PtSi)

Рис. 2. Светлопольные ПЭМ-фотографии от пленки Pt на кремнии до и после БТО

a – initial film of Pt; *b* – after RTT at 200 °C (Pt with Si); *c* – after RTT at 250 °C (Pt+Pt₂Si);
d – after RTT at 300 °C (Pt₂Si), *e* – after RTT at 350 °C (PtSi +Pt₂Si); *f* – after RTT at 400 °C (PtSi +Pt₂Si);
g – after RTT at 450 °C (PtSi); *h* – after RTT at 500 °C (PtSi); *i* – after RTT at 550 °C (PtSi)

Fig. 2. Light-field TEM-photos of the Pt film before and after RTT

Аналогичная картина электронной дифракции наблюдаются и для образцов, формируемых с использованием стандартной процедуры термообработки: 550 °C в течение 30 мин в среде N₂ (рис. 3). В этом случае на картине ЭД наблюдаются рефлексы и кольца, принадлежащие только моносилцидиду платины.

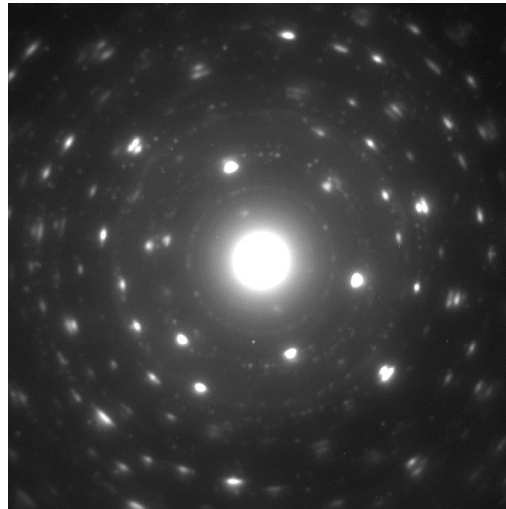
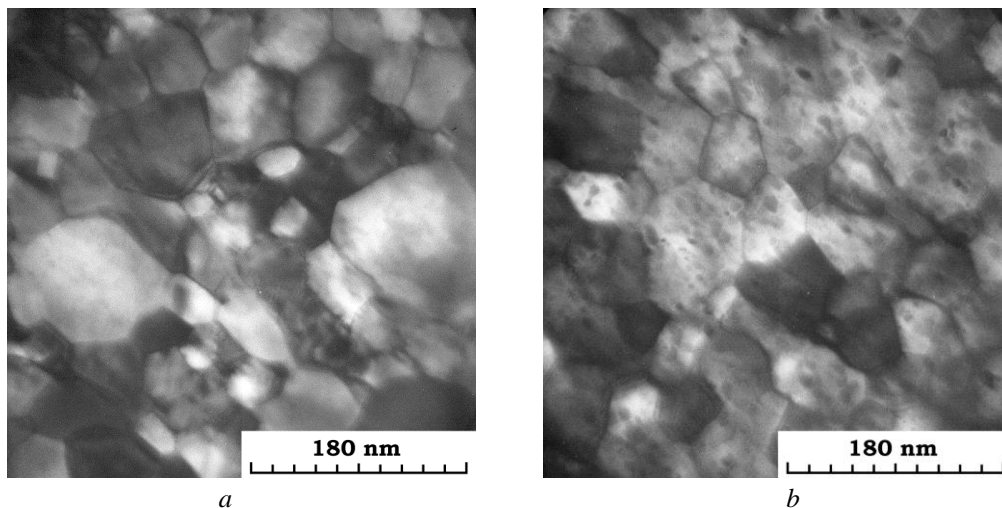


Рис. 3. Электронограмма пленки Pt на кремнии после стандартной термообработки при 550 °С в течение 30 мин

Fig. 3. Electronogram of the Pt film on silicon after the standard thermal treatment at 550 °C during 30 min



a – длительная термообработка пленки Pt на Si при 550 °С в течение 30 мин;
b – быстрая термообработка пленки Pt на Si при 550 °С в течение 7 с

Рис. 4. Светлопольные ПЭМ-фотографии пленки PtSi на кремнии, сформированной методами длительной и быстрой термообработки

a – long-term heat treatment of a Pt film on Si at 550 °C for 30 min;
b – rapid heat treatment of a Pt film on Si at 550 °C for 7 s

Fig. 4. Light-field TEM-photos of the PtSi film on silicon, formed through long-term and rapid thermal treatment

Из анализа светлопольных ПЭМ-фотографий от пленки Pt на кремнии до и после БТО, приведенных на рис. 2, видно, что с увеличением температуры БТО происходит сначала отжиг дефектов на межзеренных границах, о чем свидетельствует более четкий контраст от зерен, а затем наблюдается рост зерен, что говорит о формировании новой фазы (силицидной). При наличии двух силицидных фаз в образцах на ПЭМ снимках видны зерна разного размера с размытым контрастом изображений. Все это хорошо согласуется с ранее проведенными исследованиями методом POP структурно-фазовых переходов при формировании силицида платины.

При температурах 500 и 550 °С, где имеет место одна фаза силицида PtSi, наблюдается наличие на крупных зернах большого количества мелких образований, которые, вероятно, являются включениями чистой платины. Это подтверждает предположение о наличии избытка платины в пленке в результате твердофазного синтеза силицида платины при БТО.

Такой ход изменений микроструктуры и размера зерен силицида платины с повышением температуры обработки обуславливается теплотой его образования. Поскольку теплота образования фазы Pt₂Si минимальна и составляет 10,4–16,8 ккал/атом металла, а для PtSi – 15,7–25,5 ккал/атом металла [3], то для формирования стабильной структуры PtSi требуется более высокая температура, что и подтверждают результаты проведенных исследований.

Как видно из приведенных выше результатов, процесс формирования пленки силицида платины PtSi при БТО протекает значительно быстрее, чем при длительной термообработке. Поскольку данный процесс носит диффузионный характер, оценим его энергию активации. При этом будем учитывать, что при длительной термической обработке такая величина, как следует из литературных данных, составляет 1,5–1,6 эВ [7]. Для проведения расчетов воспользуемся известными выражениями, описывающими зависимости коэффициента диффузии D от температуры, времени и глубины диффузии h [8]:

$$D = D_0 \exp(-E/kT), \quad (1)$$

где D_0 – константа диффузии, E – энергия активации, T – температура диффузии, k – постоянная Больцмана;

$$h = 2(Dt)^{1/2}, \quad (2)$$

где t – время диффузии.

Проведенные расчеты показали, что при БТО энергия активации процесса диффузионного синтеза PtSi составляет 1,13 эВ, что на 0,37 эВ меньше, чем при длительной термообработке. Такое же уменьшение энергии активации данного процесса наблюдается при формировании дисилицида титана методом БТО системы Ti–Si [9]. Это означает, что в обоих случаях действуют одинаковые механизмы ускорения этих процессов, а именно, разрыв связей кремний-кремний и электронное возбуждение в кремнии под воздействием фотонного потока.

Детальный численный расчет картин электронной дифракции от платиносодержащих слоев с учетом определения типа симметрии и межплоскостных расстояний позволил установить, что типы кристаллических решеток соответствуют следующим пространственным группам: для Pt – кубическая гранецентрированная сингония (группа Fm3m); для Pt₂Si – тетрагональная сингония (группа I4/mmm); для PtSi – ромбическая сингония (группа Pnma). Эти результаты хорошо согласуются с данными других авторов, к примеру [10]. Таким образом, при использовании БТО для формирования силицидных фаз платины формируются только стабильные при комнатной температуре соединения – как и при использовании стандартной длительной термообработки.

Заключение

Исследования микроструктуры силицида платины, сформированной путем БТО системы Pt–Si, проведенные методом просвечивающей электронной микроскопии, показали, что с повышением температуры происходит сначала отжиг дефектов на межзеренных границах, о чем свидетельствует более четкий контраст от зерен, а затем наблюдается их рост, что говорит о формировании новой фазы (силицидной). Такой ход изменений микроструктуры силицида платины и размера зерен с повышением температуры обуславливается теплотой его образования, которая на 0,37 эВ меньше, чем при длительной термообработке. Это означает, что в данном случае действует механизм ускорения данного процесса, связанный с разрывом связей кремний-кремний и электронным возбуждением в кремнии под воздействием фотонного потока.

Список литературы

1. Таболкин А. Обеспечение национальной безопасности России в области радиационно-стойких ИС *Электронные компоненты*. 2011;8:86-89.
2. Белоус А.И., Ефименко С.А., Турцевич А.С. *Полупроводниковая силовая электроника*. Москва: Техносфера; 2013:216.
3. Мьюрарка Ш.П. *Силициды для СБИС*. Москва: Мир; 1986:176.
4. Турцевич А.С., Соловьёв Я.А., Ануфриев Д.Л., Мильчанин О.В. Структурно-морфологические особенности границы раздела Si/PtSi в диодах Шоттки для силовой микроэлектроники. *Вакуумная техника и технология*. 2006;16(4):271-275.
5. Турцевич А.С., Соловьёв Я.А., Ануфриев Д.Л., Мильчанин О.В. Особенности формирования границы раздела Si/PtSi в диодах Шоттки для силовой электроники. *Доклады БГУИР*. 2006;4(16):53-58.
6. *Электронная микроскопия*. Под ред. А. А. Лебедева. М.: ГИИТ; 1954:636.
7. *Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции*. Под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейра. Москва: Мир; 1982:576.
8. Мазель Е.З., Пресс Ф.П. *Планарная технология кремниевых приборов*. Москва: Энергия; 1974:384.
9. Пилипенко В.А., Горушко В.А., Пономарь В.Н., Пилипенко И.В. Фазовый состав и структура дисилицида титана, полученного с применением быстрой термообработки. *Вестник БГУ*. 2001;1(1):43-47.
10. Robert T. Fryer, Robert J. Lad. Synthesis and thermal stability of Pt₃Si, Pt₂Si and PtSi films grown by e-beam co-evaporation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016; Vol. 682:216-224.

References

1. Tabolkin A. [Ensuring the National Security of Russia in the Sphere of the Radiation Hardened IC]. *Jelektronnye Komponenty = Electronic Components*. 2011;8:86-89. (In Russ.)
2. Belous A.I., Efimenko S.A., Turtsevich A.S. [*Semiconductor Power Electronics*]. Moscow: Technosphere; 2013:216. (In Russ.)
3. Mewrarka Sh.P. [*Silicides for VLSIs*]. Moscow: Mir; 1986:176. (In Russ.)
4. Turtsevich A.S., Soloviev Ya.A., Anufriev D.L., Milchanin O.V. [Structural – Morphological Peculiarities of the Separation Boundary of Si/PtSi in the Schottky Diodes for Power Microelectronics]. *Vakuumnaja tehnika i tehnologija = Vacuum Electronics and Technology* 2006;16(4):271-275. (In Russ.)
5. Turtsevich A.S., Soloviev Ya.A., Anufriev D.L., Milchanin O.V. [Formation Peculiarities of the Si/PtSi Separation Boundary in the Schottky Diodes for Power Electronics]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2006;4(16):53-58. (In Russ.)
6. *Electron Microscopy*. Under Edition of A.A. Lebedev. Moscow: GITT; 1954:636. (In Russ.)
7. *Thin Films Mutual Diffusion and Reactions*. Under Edition of J. Pouta, K. Tu, J. Meira, Moscow: Mir; 1982:576. (In Russ.)
8. Mazel E.Z., Press F.P. [*Planary Technology of Silicon Devices*]. Moscow: Energy; 1974:384. (In Russ.)
9. Pilipenko V.A., Gorushko V.A., Ponomar V.N., Pilipenko I.V. [Phase Composition and Structure of Titanium Disilicide, Obtained with Application of the Rapid Thermal Treatment]. *Vestnik BGU = Bulletin of BSU*, 2001;1(1):43-47. (In Russ.)
10. Robert T. Fryer, Robert J. Lad. Synthesis and thermal stability of Pt₃Si, Pt₂Si and PtSi films grown by e-beam co-evaporation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016; Vol. 682:216-224.

Вклад авторов

Солодуха В.А. провел анализ полученных результатов.
Пилипенко В.А. произвел расчеты энергии активации процесса диффузионного синтеза PtSi.
Комаров Ф.Ф. исследования микроструктуры пленки PtSi методом ПЭМ.
Горушко В.А. подготовила образцы для проведения исследований.

Authors' contribution

Solodukha V.A. has analyzed the obtained results.
Pilipenko V.A. has calculated the activation process of the PtSi diffusion synthesis.
Komarov F.F. has studied the PtSi film microstructure by means of TEM.
Gorushko V.A. prepared the samples for the research.

Сведения об авторах

Солодуха В.А., к.т.н., генеральный директор ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корр. НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Комаров Ф.Ф., д.ф.-м.н., профессор, член-корр. НАН Беларуси, заведующий научно-исследовательской лабораторией НИИ Прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ.

Горушко В.А., ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121 А,
ОАО «Интеграл» – управляющая компания
холдинга ОАО «Интеграл»
тел. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Пилипенко Владимир Александрович

Information about the authors

Saladukha V.A., PhD, General Manager of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Pilipenka U.A., D.Sci., Professor, Corresponding Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Science Research of the State Centre “Belmicroanalysis” Affiliate RDC “Belmicrosystems” of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Komarov F.F., D.Sci., Professor, Corresponding Member of NAS of Belarus, Head of the scientific-research laboratory of the Research Institute for the Applied Physical Problems named after A. N. Sevchenko BSU.

Harushka V.A., Leading Engineer of the State Centre “Belmicroanalysis” Affiliate RDC “Belmicrosystems” of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa str., 121 A,
JSC “Integral” – “Integral” Holding
Managing Company
tel. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Pilipenko Vladimir Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-97-104>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.874, 620.22

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИЯМИ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ИГЛОПРОБИВНОГО МАТЕРИАЛА

МОРДАЧЕВ В.И., ЦИОНЕНКО Д.А., АБДУЛХАДИ Х.Д.А., ПУХИР Г.А., ПРУДНИК А.М.

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

Поступила в редакцию 10 апреля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Для защиты электронных систем от импульсного воздействия электромагнитных полей предлагается экранирование импульсов конструкциями экранов на основе иглопробивного и войлочного материалов, в том числе содержащих пропитывающие жидкости. Измерение экранирующих характеристик полученных экранов проводилось с помощью испытательного комплекса импульсных электромагнитных полей, работающего по принципу воспроизведения в пространстве сверхкоротких электромагнитных импульсов вертикальной (горизонтальной) поляризации с амплитудой импульсов в начале рабочей зоны не менее 5 и 50 кВ/м. Испытательный комплекс включал в себя генераторы импульсных напряжений, высоковольтные коаксиальные кабели, антенно-фидерное устройство, цифровой индикатор поля, кабель и выносную кнопку дистанционного пульта. Эффективная полоса частот импульса была от 130 МГц до 2,31 ГГц. Мощность импульса в начале рабочей зоны 5,34 МВт. При каждом испытании осуществлялось излучение 5 пачек импульсов и измерение амплитуд импульсов. Каждая пачка импульсов имела длительность 1 с. Частота импульсов в пачке составляла 1 кГц. Осуществляли расчет эффективности экранирования, усредненной по эффективной полосе частот, и определяли погрешность. Получены значения эффективности экранирования электромагнитного импульса, которые для иглопробивного материала с содержанием углеродных волокон составляют 9,4...15,5 дБ, в зависимости от пропитывающей жидкости, а для войлочной ткани со слоем полимерной металлизированной пленки – 9,7...12,4 дБ, в зависимости от пропитывающей жидкости, что позволяет использовать их для создания конструкций экранов для защиты электронных систем от деструктивного воздействия электромагнитного оружия.

Ключевые слова: электромагнитное поле, электромагнитный импульс, электромагнитное оружие, экранирующий материал, иглопробивное полотно, эффективность экранирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев В.И., Ционенко Д.А., Абдулхадиди Х.Д.А., Пухир Г.А., Прудник А.М. Эффективность экранирования широкополосных импульсов электромагнитного излучения конструкциями экранов на основе иглопробивного материала. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 97-104.

SHIELDING EFFICIENCY OF WIDE-BAND PULSES OF ELECTROMAGNETIC RADIATION BY SHIELDS BASED ON THE NEEDLE-PUNCHING MATERIAL

ULADZIMIR I. MORDACHEV, DMITRY A. TSYANENKA, HAITHAM D.A. ABDULHADI,
HALINA A. PUKHIR, ALEKSANDER M. PRUDNIK

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

Submitted 10 April 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. To protect electronic systems from the wide-band pulses of electromagnetic radiation, it is proposed to use the shields designed based on needle-punched and felt materials, including those with impregnating liquids. The shielding characteristics of the obtained shields were measured using a test complex of pulsed electromagnetic fields operating on the principle of reproducing ultrashort electromagnetic pulses of vertical (horizontal) polarization with the amplitude at the beginning of the working area of at least 5 and 50 kV/m. The test complex included voltage pulse generators, high-voltage coaxial cables, an antenna feeder, a digital field indicator, a cable and a remote control button. The effective frequency band of the pulse was from 130 MHz to 2.31 GHz. The pulse power at the beginning of the work was 5.34 MW. In each test, 5 packs of pulses were emitted and pulse amplitudes were measured. Each burst of pulses had a duration of 1 s. The pulse frequency in the packet was 1 kHz. The shielding efficiency averaged over the effective frequency band was calculated and the error was determined. The values of electromagnetic pulse shielding efficiency were obtained, which equaled 9.4...15.5 dB for a needle-punched material with a carbon additive, and 9.7...12.4 dB for felt fabric with a layer of polymer metallized film, which allows using them to design the shields to protect electronic systems from the destructive effects of electromagnetic weapons.

Keywords: electromagnetic field; electromagnetic pulse; electromagnetic weapon; shielding material; needle-punched fabric; aluminium foil, shielding efficiency.

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

For citation. Mordachev V.I., Tsyankenka D.A., Abdulhadi H.D.A., Pukhir H.A., Prudnik A.M. Shielding efficiency of wide-band pulses of electromagnetic radiation by shields based on the needle-punching material. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 97-104.

Введение

Актуальность работы обусловлена необходимостью защиты электронных систем от импульсного воздействия электромагнитных полей, которые могут создавать помехи их функционированию, приводить к деградации компонентов и в конечном итоге делать непригодными для дальнейшей эксплуатации. Практика применения средств защиты устройств и систем от воздействия электромагнитных полей обуславливает необходимость постоянного улучшения их технических и эксплуатационных характеристик. Это в первую очередь относится к методам и средствам защиты от воздействия электромагнитного оружия, которое при соответствующей мощности импульса способно поражать недостаточно защищенные электронные системы [1].

В настоящий момент разработаны и испытаны системы электромагнитного оружия, которые предназначены для поражения компонентов электронных систем различного назначения [2]. При воздействии сильных электромагнитных полей, в результате наведения электромагнитной индукции, образуются токи большой величины во всех проводящих и полупроводниковых материалах, что приводит к сбоям в функционировании электронных систем, а в ряде случаев переводит их в неремонтопригодное состояние [3].

Суть защиты от электромагнитного оружия заключается в разработке и конструировании экранирующих конструкций, предназначенных для уменьшения воздействующего на электронные системы электромагнитного импульса [4]. Экранирование позволяет

уменьшать опасные напряжения и токи, наводимые в аппаратуре и системах под действием импульсного излучения, а также уровни полей, проникающих в экранированные сооружения по линиям связи.

Методика проведения эксперимента

Значение эффективности экранирования по отношению к широкополосным электромагнитным импульсам, усредненное по диапазону частот в их спектре, определялось как отношение амплитуды электрического поля, измеренной в отсутствие защитных материалов $|E_0|$, к амплитуде, измеренной при их наличии $|E'|$:

$$S_E = 20 \log \left(\frac{|E_0|}{|E'|} \right). \quad (1)$$

Такой подход обеспечивает выполнение условий наихудшего случая при анализе эффективности экранирования (т. е. обеспечивает отсутствие переоценки эффективности экранирования), так как не учитывает изменение формы временной реализации импульса при его прохождении через защитный материал. Известно, что эффективность экранирования материалов изменяется с изменением частоты, что вызывает изменение формы импульса, причем при экранировании оно связано не только с уменьшением амплитуды, но и с увеличением длительности фронта импульса. Это приводит к уменьшению скорости нарастания электрической и магнитной компонент импульса и снижению вероятности выхода из строя аппаратуры под его воздействием. Таким образом, метод анализа, основанный на определении изменения только амплитуды импульсного поля, позволяет оценить эффективность использования материалов для защиты радиоэлектронного оборудования при его непосредственном применении (т. е. в полевых условиях) без внесения конструктивных изменений в защищаемое оборудование.

Для исследования эффективности экранирования электромагнитного импульса были изготовлены несколько групп образцов конструкций экранов. Образец № 1 представлял собой иглопробивной материал с содержанием углеродных волокон производства АО «ЦНИИЛКА» (г. Москва, Российская Федерация). Исследовались три разновидности образца № 1. Первая группа образцов представляла собой сухой материал массой 0,62 кг, а вторая группа образцов представляла собой образцы, пропитанные водопроводной водой массой 0,86 кг. Третья группа образцов представляла собой образцы, пропитанные насыщенным раствором NaCl массой 0,84 кг. Образец № 2 представлял собой вспененный полиэтилен с металлизированной пленкой с одной стороны. Образец № 3 представлял собой двухслойный материал производства БГУИР. Один слой материала – войлочная ткань, пропитанная CaCl₂, а второй слой – полимерная металлизированная пленка. Исследовались две разновидности образца № 3. Первая группа образцов представляла собой сухой материал массой 2,17 кг, а вторая группа образцов представляла собой образцы, пропитанные водопроводной водой массой 3,42 кг.

Для исследования эффективности экранирования использовался испытательный комплекс импульсных электромагнитных полей (рис. 1), работающий по принципу воспроизведения в пространстве сверхкоротких электромагнитных импульсов вертикальной (горизонтальной) поляризации с амплитудой импульсов в начале рабочей зоны не менее 50 кВ/м при использовании генератора импульсных напряжений ГИН 50-1000 и не менее 5 кВ/м при использовании генератора импульсных напряжений ГИН 5-1000 (рис. 2). В табл. 1 представлены характеристики воспроизводимых импульсов и их значения.

Возможность визуального контроля работоспособности излучателя комплекса и измерения амплитуды напряженности электрического поля реализуется с помощью электронного цифрового индикатора электрического поля в диапазоне от 2 до 20 кВ/м с относительной погрешностью $\pm 20\%$. Эффективная полоса частот импульса (на эффективную полосу частот приходится 90 % энергии импульса, 5 % приходится на частоты, меньшие нижней границы эффективной полосы, и 5% энергии – на частоты, большие верхней частоты) от 130 МГц до 2,31 ГГц. Мощность импульса в начале рабочей зоны составляет 5,34 МВт (рис. 3).

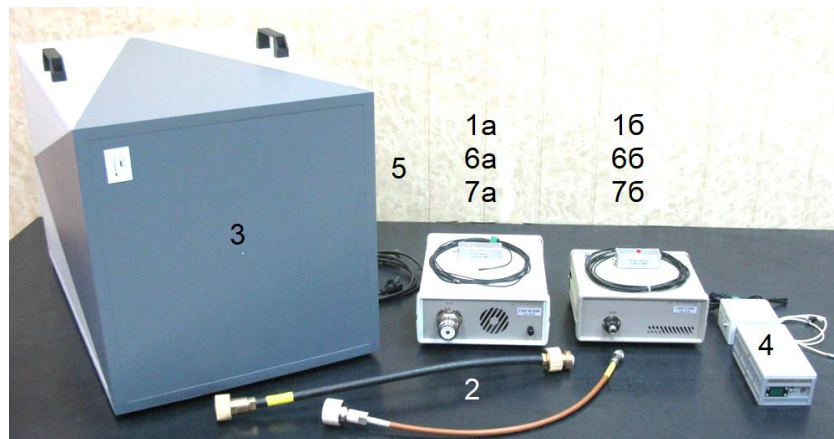


Рис. 1. Испытательный комплекс импульсных электромагнитных полей: 1 – ГИН 50–1000 (а) и ГИН 5-1000 (б); 2 – высоковольтные коаксиальные кабели; 3 – антенно-фидерное устройство; 4 – цифровой индикатор поля; 5 – сетевой кабель; 6 и 7 – кабель и выносная кнопка дистанционного пульта
Fig. 1. Test complex of pulsed electromagnetic radiation: 1 – GIN 50-1000 (a) and GIN 5-1000 (b); 2 – high-voltage coaxial cables; 3 – antenna feeder; 4 – digital field indicator; 5 – network cable; 6 and 7 – cables and remote controls

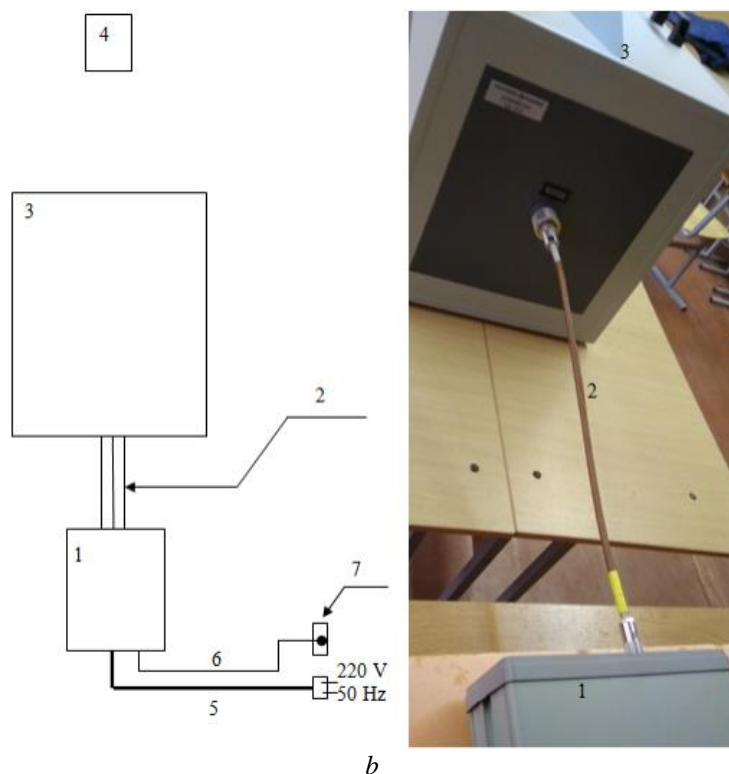
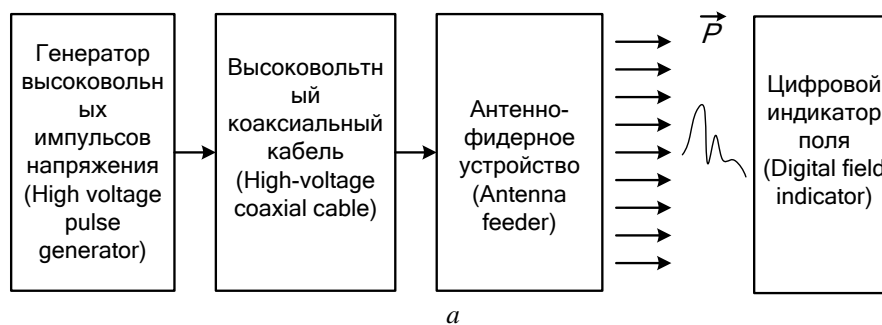


Рис. 2. Структурная схема (а) и блок-схема (b) подключения испытательного комплекса
Fig. 2. Functional block diagram (a) and block diagram (b) of the test complex connection

Таблица 1. Характеристики излучаемых электромагнитных импульсов и их значения
Таблица 1. Characteristics of radiated electromagnetic pulses and their values

Характеристика (characteristic)	Value
Частота повторения импульсов	1000 Гц
Длительность серии импульсов	1,0 с ± 10 %
Интервал времени между сериями импульсов	не менее 10 с
Амплитуда импульса в начале рабочей зоны на оси излучения при использовании ГИН 50-1000	не менее 50 кВ/м
Размер зоны облучения с номинальной амплитудой импульса с неоднородностью 3 дБ вблизи начала рабочей зоны при использовании ГИН 50-1000 (номинальная амплитуда импульса 50 кВ/м), не менее	1,20×0,58 м
Расстояние от центра раскрытия антенны до точки с номинальной амплитудой импульса на оси излучения антенны при использовании ГИН 50-1000 (номинальная амплитуда импульса 50 кВ/м)	1,65 м ± 20 %
Длительность фронта импульса между уровнями от 0,1 до 0,9 от амплитуды на оси излучения при использовании ГИН 50-1000	140 пс ± 10 %
Длительность импульса по уровню 0,5 от амплитуды на оси излучения при использовании ГИН 50-1000	250 пс ± 10 %

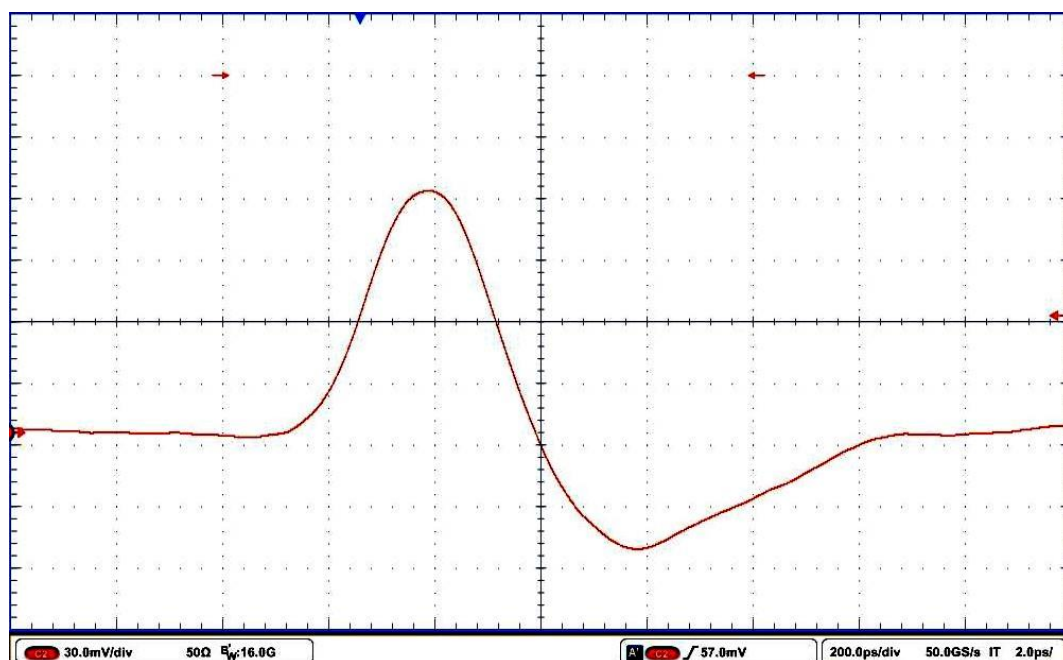


Рис. 3. Типовая осциллограмма воспроизводимого импульса напряженности электрического поля на расстоянии 4 м от раскрытия антенны на оси излучения. Генератор ГИН 50-1000

Fig. 3. A typical oscillogram of the electric field pulse at a distance of 4 m from the antenna aperture on the radiation axis reproduced by voltage pulse generator GIN 50-1000

Исследования эффективности экранирования электромагнитных импульсов проводились в экспериментальном зале, представляющем собой полубезэховую камеру, в которой предотвращено влияние волн, отраженных от металлических элементов зала, на результаты испытаний посредством использования панелей радиопоглощающего материала «Тора-39». Цифровой индикатор поля помещается в рабочей области, где минимизировано наличие отраженных волн. Конструкция цифрового индикатора на основе полосковой линии обеспечивает повышение точности измерения, поскольку регистрируются волны, направленные вдоль оси полосковой линии индикатора. Регистрация импульса осуществляется в пределах временного окна, равного 1 нс, что обеспечивает отсутствие приема волн, отраженных от объектов, расположенных на расстоянии более 0,5 м от индикатора.

Выбирается расстояние между маркерными точками антенны и индикатора поля, которое обеспечивает значение амплитуды напряженности электрического поля импульса,

равное 19 ± 1 кВ/м. Индикатор ориентируется вдоль оси излучения антенно-фидерного устройства (АФУ). Определяется значение поля в отсутствие защитного материала (калибровка испытательной установки).

Между АФУ и цифровым индикатором поля, в непосредственной близости от маркерной точки индикатора (расстояние не более $2,0 \pm 0,5$ см), помещается образец исследуемого материала. Размеры образца не менее $0,7 \times 0,7$ м, он расположен симметрично по отношению к цифровому индикатору в плоскости, перпендикулярной оси излучения АФУ. Определяется амплитуда напряженности электрического поля импульса в области непосредственно за защитным материалом посредством цифрового индикатора.

При каждом испытании осуществляется излучение 5 пачек импульсов и измерение амплитуд импульсов. Каждая пачка импульсов имеет длительность 1 с. Частота импульсов в пачке равна 1 кГц.

Используя (1), осуществляется расчет эффективности экранирования электромагнитного импульса исследуемым образцом, усредненной по эффективной полосе частот, и определялась погрешность (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики излучаемых электромагнитных импульсов и их значения
Table 2. The characteristics of radiated electromagnetic pulses and their values

Образец, № (Sample, number)	Пропитывающая жидкость (Impregnating liquid)	Количество слоев (Number of layers)	Значение амплитуды импульса, усредненное по 5 пачкам импульсов, кВ/м (Value of the pulse amplitude averaged over 5 bursts of pulses, kV/m)	Средняя эффективность экранирования электромагнитного импульса, дБ (Average shielding efficiency of the electromagnetic pulses, dB)
Тора-39			7,7	7,9
1	–	1	15,5	1,8
		2	11,5	4,4
		3	8,9	6,6
		4	7,9	7,7
		8	4,7	12,2
1	Вода	1	5,9	10,1
		2	4,4	12,7
		3	3,3	15,4
		4	3,1	15,5
		4	3,2	15,5
1	Раствор NaCl	1	4,8	12,0
		2	4,5	12,5
		3	3,3	15,2
2	–	1	6,5	9,4
		2	5,6	10,7
		4	4,7	12,1
3 (фольга наружу)	–	1	5,5	10,8
3 (фольга внутрь)		1	6,3	9,7
3		2	4,6	12,4
3	Вода	1	4,9	11,9
		2	3,8	13,9

Заключение

Получены значения средней эффективности экранирования электромагнитного импульса. Показано, что эффективность экранирования электромагнитного импульса для сухого иглопробивного материала с содержанием углеродных волокон составляет 9,4...12,1 дБ, для пропитанного водой иглопробивного материала с содержанием углеродных волокон 10,1...15,5 дБ и для иглопробивного материала, пропитанного насыщенным

раствором NaCl составляет 12,0...15,2 дБ. В то же время, средняя эффективность экранирования электромагнитного импульса для сухой войлочной ткани, предварительно пропитанной CaCl₂, со слоем полимерной металлизированной пленки составила 9,7...12,4 дБ, а для пропитанной водой войлочной ткани, предварительно пропитанной CaCl₂, со слоем полимерной металлизированной пленки составила 11,9...13,9 дБ.

На основе проведенных измерений показано, что, варьируя толщину материалов, содержание углерода и пропитывающую жидкость, можно задать электромагнитные характеристики материалов для экранирования широкополосных импульсов электромагнитного излучения, а также значительно снизить их стоимость. Простота технологического процесса изготовления и доступность материалов позволяет создавать не только экранирующие конструкции, но также и создавать выделенные помещения, поскольку позволяют использовать данные материалы при отделке внутренних стен.

Список литературы / References

1. Radasky W.A., Baum C.E., Wik M.W. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2004; Vol. 46, 3:314-321.
2. Hayashi Y., Homma N., Mizuki T., Aoki T., Sone H. Precisely timed IEMI fault injection synchronized with EM information leakage. 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Raleigh, NC. 2014: 738-742.
3. Månsson D., Bäckström M., Thottappillil R. Intentional EMI against critical infrastructures, a discussion on mitigation philosophy. 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing. 2010: 134-137.
4. Sabath F., Garbe H. Assessing the likelihood of various intentional electromagnetic environments the initial step of an IEMI risk analysis. 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Dresden. 2015:1083-1088.
5. Prudnik A., Beloglazov A., Kudryavtseva T., Lynkou L. Production technology and shielding properties of the needle-punched non-woven fabrics with carbon additives. (20–22 September 2017). *Electromagnetic disturbances EMD 2017: Proceedings of the 24th International conference, Poland, Białystok, Białystok*. 2017:108-111.

Вклад авторов

Мордачев В.И. разработал методику исследования эффективности экранирования широкополосных импульсов электромагнитного излучения.

Ционенко Д.А. выполнил измерения эффективности экранирования широкополосных импульсов электромагнитного излучения.

Абдулхади Х.Д. осуществил подготовку образцов конструкций экранов, сбор и обработку экспериментальных данных, принял участие в анализе и интерпретации результатов исследования.

Пухир Г.А. выполнила анализ и интерпретацию результатов исследования.

Прудник А.М. принял участие в интерпретации результатов исследования, выполнил оформление рукописи статьи и подготовку ее для опубликования.

Authors' contribution

Mordachev V.I. has developed the research methodology of shielding efficiency of wide-band pulses of electromagnetic radiation.

Tsyenenka D.A. has measured shielding efficiency of wide-band pulses of electromagnetic radiation.

Abdulhadi H.D.A. prepared the samples of the shields' designs, collected and processed the experimental findings, took part in analysis and interpretation of the research results.

Pukhir H.A. has analyzed and interpreted the research results.

Prudnik A.M. took part in the analysis and interpretation of the research results, prepared the manuscript for publication.

Сведения об авторах

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ционенко Д.А., к.ф.-м.н., доцент, с.н.с. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Абдулхади Х.Д.А., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Пухир Г.А., старший преподаватель кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Прудник А.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-24;
e-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Прудник Александр Михайлович

Information about the authors

Mordachev V.I., PhD, Associate Professor, Leader Researcher of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tsyankenka D.A., PhD, Associate Professor, Senior Researcher of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Abdulhadi H.D.A., PG student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pukhir H.A., Senior Lecturer of Information Security Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Prudnik A.M., Associate Professor of Engineering Psychology and Ergonomics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-24;
e-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Aleksander M. Prudnik