

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-08-14-24

УДК 621.383.51

Моделирование фотоэлектрических характеристик солнечных элементов на основе CsPbI_3 , CsPbBr_3 и создание экспериментальных структур

АЛЕКСАНДР ЭДУАРДОВИЧ ДЕГТЕРЕВ^{1✉}, АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ТАРАСОВ²,
МАРИЯ МИХАЙЛОВНА ДЕГТЕРЕВА³, МАРИНА ДМИТРИЕВНА ПАВЛОВА⁴,
НИКИТА АЛЕКСЕЕВИЧ ХОРШЕВ⁵, ИВАН ИГОРЕВИЧ МИХАЙЛОВ⁶,
ИВАН АНАТОЛЬЕВИЧ ЛАМКИН⁷, СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ТАРАСОВ⁸

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

¹aedegterev@etu.ru <https://orcid.org/0000-0002-6151-6567>

²astarasov@etu.ru <https://orcid.org/0000-0003-1360-3137>

³mmromanovich@etu.ru <https://orcid.org/0000-0001-6797-0595>

⁴mdpavlova@etu.ru <https://orcid.org/0000-0001-8815-8993>

⁵nakhorshev@etu.ru <https://orcid.org/0009-0007-4762-2164>

⁶iimikhailov@etu.ru <https://orcid.org/0000-0001-5808-6650>

⁷ialamkin@etu.ru <https://orcid.org/0000-0002-3680-7725>

⁸satarasov@etu.ru <https://orcid.org/0000-0002-6321-0019>

Аннотация

Предмет исследования. Солнечные элементы на основе фоточувствительных неорганических перовскитов CsPbI_3 и CsPbBr_3 . **Целью данной работы** является исследование перспектив создания высокоэффективных структур на основе неорганических перовскитов CsPbI_3 и CsPbBr_3 в качестве фоточувствительных слоёв в солнечных элементах, а также компьютерное моделирование солнечных элементов в программном пакете AFORS-HET. **Метод.** Теоретическое исследование проводилось в программе AFORS-HET с открытым исходным кодом, которая предназначена для одномерного моделирования солнечных элементов и других оптоэлектронных устройств. При создании структур применялось следующее оборудование: центрифуга EZ4 spin coater для нанесения тонких плёнок и фоторезиста, лабораторные магнитные мешалки с подогревом ULAB US-1500D, установка вакуумного термического осаждения. **Основные результаты.** Солнечные элементы на основе фоточувствительных неорганических перовскитов CsPbI_3 и CsPbBr_3 были смоделированы в программе AFORS-HET. Оценены основные параметры фотоэлектрических элементов: коэффициент заполнения, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода и КПД. Проведён теоретический анализ факторов и дефектов перовскитных плёнок, влияющих на работоспособность солнечных элементов. По результатам моделирования изготовлены и охарактеризованы фоточувствительные структуры на основе перовскита CsPbI_3 . **Практическая значимость.** Исследуемые солнечные элементы на основе перовскитов CsPbI_3 и CsPbBr_3 могут применяться в качестве эффективных преобразователей солнечной энергии в электрическую.

Ключевые слова: перовскит, фотоэлектрические структуры, солнечные элементы

Благодарность: работа поддержана проектом № FSEE-2022-0016.

Ссылка для цитирования: Дегтерев А.Э., Тарасов А.С., Дегтерева М.М., Павлова М.Д., Хоршев Н.А., Михайлов И.И., Ламкин И.А., Тарасов С.А. Моделирование фотоэлектрических характеристик солнечных элементов на основе CsPbI₃, CsPbBr₃ и создание экспериментальных структур // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 8. С. 14–24. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-14-24>

Коды OCIS: 350.6050; 040.5350; 310.6805.

Modeling of photoelectric characteristics of solar cells based on CsPbI₃, CsPbBr₃ and creation of experimental structures

ALEKSANDR E. DEGTEREV¹✉, ALEKSANDR S. TARASOV², MARIYA M. DEGTEREVA³,
MARINA D. PAVLOVA⁴, NIKITA A. KHORSHEV⁵, IVAN I. MIKHAILOV⁶,
IVAN A. LAMKIN⁷, SERGEY A. TARASOV⁸

Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', Saint Petersburg, Russia

¹aedegterev@etu.ru <https://orcid.org/0000-0002-6151-6567>

²astarasov@etu.ru <https://orcid.org/0000-0003-1360-3137>

³mmromanovich@etu.ru <https://orcid.org/0000-0001-6797-0595>

⁴mdpavlova@etu.ru <https://orcid.org/0000-0001-8815-8993>

⁵nakhorshev@etu.ru <https://orcid.org/0009-0007-4762-2164>

⁶iimikhailov@etu.ru <https://orcid.org/0000-0001-5808-6650>

⁷ialamkin@etu.ru <https://orcid.org/0000-0002-3680-7725>

⁸satarasov@etu.ru <https://orcid.org/0000-0002-6321-0019>

Abstract

Subject of the study. Solar cells based on CsPbI₃ and CsPbBr₃ photosensitive inorganic perovskites.

Aim of study. Simulation and creation of inorganic perovskite solar cells based on CsPbI₃ and CsPbBr₃.

Method. The theoretical study was carried out in the open source AFORS-HET program, which is designed for one-dimensional modeling of solar cells and other optoelectronic devices. When creating the structures, the following equipment was used: an EZ4 spin coater for applying thin films and photoresist, ULAB US-1500D heated laboratory magnetic stirrers, and a vacuum thermal deposition station. **Main results.** Solar cells based on CsPbI₃ and CsPbBr₃ photosensitive inorganic perovskites are simulated in AFORS-HET software. The main parameters of the photovoltaic cells: fill factor, short-circuit current, open-circuit voltage, and efficiency are estimated. The theoretical analysis of the factors and perovskite films defects affecting the performance of solar cells was carried out. Photosensitive structures based on CsPbI₃ perovskite were fabricated and characterized according to the simulation results. **Practical significance.** The studied solar cells based on CsPbI₃ and CsPbBr₃ perovskites can be used as efficient converters of solar energy into electrical energy.

Keywords: perovskite, photovoltaic structures, solar cells

Acknowledgment: the work was supported by project № FSEE-2022-0016.

For citation: Degterev A.E., Tarasov A.S., Degtereva M.M., Pavlova M.D., Khorshev N.A., Mikhailov I.I., Lamkin I.A., Tarasov S.A. Modeling of photoelectric characteristics of solar cells based on CsPbI₃, CsPbBr₃ and creation of experimental structures [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 8. P. 14–24. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-14-24>

OCIS codes: 350.6050; 040.5350; 310.6805.

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие ведущими мировыми институтами были проведены исследования, направленные на поиск и синтез фо-

тоактивных материалов, которые могли бы стать полноценной альтернативой кремнию в солнечной энергетике. Среди таких материалов перовскиты показывают наиболее высо-

кие результаты как по эффективности преобразования, так и по стоимости производства. Благодаря своим особым характеристикам, таким как высокий коэффициент поглощения, большая диффузионная длина носителей заряда и высокий квантовый выход фотолюминесценции, металлогалогенные перовскиты могут использоваться в различных оптоэлектронных элементах, таких как фотоприёмники, датчики искры, лазеры, светодиоды и солнечные элементы (СЭ) [1]. С тех пор, как в 2012 году был получен первый твердотельный перовскитный солнечный элемент с эффективностью, сравнимой с достигаемой кремниевыми устройствами [2], было предпринято множество попыток понять фотофизические свойства перовскитов и улучшить фотоэлектрические характеристики солнечных элементов на основе перовскитов [3–5]. Недавние усовершенствования, достигнутые за счёт улучшения структуры и морфологии слоёв перовскитных солнечных элементов [5], привели к повышению их эффективности. Например, перовскитные солнечные элементы на основе MAPbI₃, имеющие планарную структуру FTO/b-TiO₂/SnO₂/MAPbI₃/Spiro-OMeTAD/Au, достигают эффективности в 16,8% [6]. Эффективность солнечных элементов на основе (FAPbI₃:0.38MDACl₂) и раствора Spiro-OMeTAD с примесью t-BP, солей Li-TFSI и Co-TFSI составила 25,7% [7]. В 2023 был установлен новый рекорд эффективности перовскитных солнечных элементов: эффективность 26,1% была достигнута путём использования смеси перовскитов FAPbI₃ и CsPbI₃ [8].

Несмотря на то, что гибридные перовскиты показывают высокую эффективность, они имеют существенные недостатки, такие как температурная нестабильность и деградация во влажной среде из-за наличия органического катиона (метиламмоний или формамидин) [9, 10]. Исследования [11–15] показывают, что использование полностью неорганических перовскитов способно обеспечивать такую же высокую эффективность солнечных элементов, как и применение гибридных структур. Полностью неорганические солнечные элементы на основе перовскитов CsPbI₃ и CsPbBr₃ представляют интерес для исследователей благодаря их превосходным фотоэлектрическим характеристикам и контролируемому искажению кристаллической структуры.

Планарная структура ITO/TiO₂/CsPbBr₃/Spiro-OMeTAD/Au на основе CsPbBr₃, приготовленного с добавлением NH₄SCN (молярная доля — 1,5%) достигает эффективности 8,47%, что выше, чем у чистого CsPbBr₃ (7,12%) [11]. Несмотря на то, что CsPbBr₃ более стабилен, неорганический перовскит CsPbI₃ имеет подходящую ширину запрещённой зоны для использования в tandemных солнечных элементах на основе кремния. Данная особенность CsPbI₃ в составе тандема позволяет получить больший прирост эффективности при меньших затратах на его изготовление [12]. Однако плохая кристаллизация перовскитной фазы вызывает затруднения при создании перовскитных плёнок высокого качества. Тем не менее, при использовании модифицированного метода кристаллизации промежуточной фазы, при котором до формирования перовскитной фазы вводится гидриодид пирролидина, была достигнута эффективность 20,61% в структуре FTO/c-TiO₂/CsPbI₃/Spiro-OMeTAD/Au [13]. Контролируя промежуточную фазу процесса кристаллизации CsPbI₃ с помощью MACl, можно достичь эффективности 20,37% в структуре FTO/c-TiO₂/CsPbI₃/Spiro-OMeTAD/Au [14]. Благодаря высокой эффективности перовскита и развитой кремниевой промышленности изготовление tandemных модулей перовскит-кремний имеет бесспорную перспективу [12].

Наиболее распространённые методы повышения эффективности неорганических перовскитов — модификация поверхности, использование добавок, а также постобработка перовскитного слоя [15]. В работе [16] описаны методы создания фоточувствительных структур на основе перовскитов CsGeI₃ и CsSnI₃, для которых были достигнуты эффективности 10,51% и 12,83% соответственно. В статье [17] описан метод повышения эффективности CsPbI₃ путём использования смешанных слоёв перовскита с осаждёнными на них наночастицами того же состава. Недавние исследования показали, что карбонил и тиенил в DED могут взаимодействовать с CsPbI₃ и эффективно пассивировать дефекты, подавляя миграцию ионов, что позволило достичь рекорда эффективности для структур на основе CsPbI₃ — 21,15% на сегодняшний день [18]. Дальнейшее увеличение эффективности возможно за счёт создания гетероструктур на основе перовскитов.

Так, солнечный элемент с фазовым гетеропереходом β -CsPbBr₃/ γ -CsPbBr₃ достигает эффективности 21,59% [19].

Целью данной работы является исследование перспектив создания высокоэффективных структур на основе неорганических перовскитов CsPbI₃ и CsPbBr₃ в качестве фоточувствительных слоёв в солнечных элементах, а также компьютерное моделирование СЭ в программном пакете AFORS-HET. Параметры смоделированных структур с наибольшей расчётной эффективностью были использованы в качестве основы для формирования экспериментальных образцов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования была выбрана следующая структура перовскитного солнечного элемента: подложка с нанесённым слоем прозрачного проводящего материала, выполняющего роль катода, транспортные слои с электронной и дырочной проводимостью, фотоактивный слой и металлический анод (рис. 1). В качестве катода используется оксид олова, легиро-

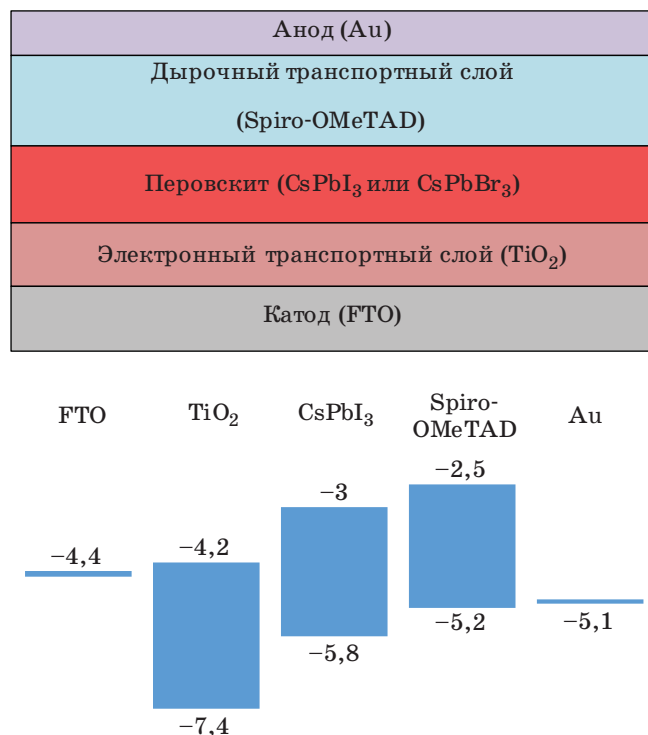


Рис. 1. Структура и энергетическая диаграмма моделируемого перовскитного солнечного элемента

Fig. 1. Structure and band diagram of the simulated perovskite solar cell

ванный фтором (FTO). В качестве материалов, выполняющих функции транспортных слоёв с дырочной и электронной проводимостью, использовались Spiro-OMeTAD и оксид титана TiO₂, соответственно.

Моделирование проводилось в программе AFORS-HET. Программа включает в себя различные физические модели и учитывает оптическую и электрическую составляющую. AFORS-HET — это программное обеспечение с открытым исходным кодом для одномерного моделирования солнечных элементов и других многослойных структур [20]. В частности, оно может применяться для численного моделирования перовскитных солнечных элементов [21, 22]. Данное программное обеспечение используется для определения конструктивных параметров солнечных элементов и может быть использовано для расчёта их основных характеристик, таких как энергетические диаграммы, вольт-амперные характеристики, квантовый выход, коэффициент заполнения, эффективность преобразования энергии и другие [23].

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ФОТОАКТИВНЫХ СЛОЁВ

Оптические свойства слоёв в программе AFORS-HET описываются спектральными зависимостями показателей преломления и поглощения. В работе [24] приведены теоретические зависимости этих параметров для CsPbI₃. Для расчёта значений подвижности и времени жизни электронов и дырок были использованы следующие значения коэффициентов диффузии и диффузионных длин электронов и дырок: $D_n = 0,061 \text{ см}^2/\text{с}$ и $L_n = 1,566 \text{ нм}$ — для электронов; $D_p = 0,057 \text{ см}^2/\text{с}$ и $L_p = 1,427 \text{ нм}$ — для дырок [25]. В результате моделирования были рассчитаны значения подвижности и времени жизни электронов и дырок:

$$\mu_n = D_n \frac{e}{kT} = 2,357 \text{ см}^2/(\text{В} \times \text{с}), \quad (1)$$

$$\mu_p = D_p \frac{e}{kT} = 2,203 \text{ см}^2/(\text{В} \times \text{с}),$$

$$\tau_n = \frac{L_n^2}{D_n} = \frac{1,566 \times 10^{-4}}{0,061} = 402 \text{ нс}, \quad (2)$$

$$\tau_p = \frac{L_p^2}{D_p} = \frac{1,427 \times 10^{-4}}{0,057} = 357 \text{ нс}.$$

Для того, чтобы установить значение концентрации дефектов, необходимо определить сечения захвата электронов и дырок. Сечение захвата электронов принято равным значению, полученному экспериментально в работе [26] для йодида свинца-метиламмония $\sigma_n = 5 \times 10^{-16} \text{ см}^2$. Таким образом, были определены концентрация дефектов и сечение захвата дырок:

$$N_t = \frac{1}{\tau_n v_n \sigma_n} = 4,975 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}, \quad (3)$$

$$\sigma_p = \frac{1}{\tau_p v_p N_t} = 5,63 \times 10^{14} \text{ см}^2, \quad (4)$$

где тепловые скорости электронов v_n и дырок v_p приняты равными 10^7 см/с . Средство к электрону принималось равным $\chi = 3,95 \text{ эВ}$ согласно [27].

Согласно результатам, полученным в [28], эффективные массы электронов и дырок составляют $m_e = 0,23m_0$ и $m_p = 0,24m_0$ соответственно. Отсюда следует, что приведённая масса электронов и дырок:

$$\mu = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p} = \frac{0,23 \times 0,24}{0,23 + 0,24} m_0 = 0,117 m_0. \quad (5)$$

На основе этих значений были рассчитаны эффективные плотности состояний в валентной зоне N_V и зоне проводимости N_C :

$$N_C = 2 \left(\frac{m_e k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} = 2,766 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}, \quad (6)$$

$$N_V = 2 \left(\frac{m_p k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} = 2,948 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}. \quad (7)$$

Константы скорости прямой межзонной и Оже-рекомбинации в CsPbI_3 взяты из [29]. На основе данных, полученных в работе [30], для перовскита CsPbBr_3 был аппроксимирован спектр поглощения $\alpha(\lambda)$, который затем был преобразован в спектр показателя поглощения $k(\lambda)$:

$$a(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda}. \quad (8)$$

Для дальнейших расчётов E_g принимали равной $2,25 \text{ эВ}$ [31], средство к электрону CsPbBr_3 — $3,6 \text{ эВ}$, подвижность и время жизни носителей заряда — $\mu = 13,6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $\tau = 10,5 \text{ нс}$ [32]. Отсюда была рассчитана концентрация дефектов: $N_t = 1,905 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Таблица 1. Параметры материалов, используемых в моделировании [31–35]

Table 1. Parameters of materials used in modeling [31–35]

Параметры	CsPbI_3	CsPbBr_3
Кристаллическая структура	кубическая	ромбическая
Диэлектрическая проницаемость ϵ	10	7,3
Энергия средства к электрону χ , эВ	3,95	3,6
Ширина запрещённой зоны E_g , эВ	1,73	2,25
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_C , см^{-3}	$2,77 \times 10^{18}$	$3,17 \times 10^{18}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне N_V , см^{-3}	$2,95 \times 10^{18}$	$3,17 \times 10^{18}$
Концентрация акцепторной примеси N_A , см^{-3}	10^{15}	10^{15}
Концентрация дефектов N_t , см^{-3}	$4,975 \times 10^{14}$	$1,905 \times 10^{16}$
Подвижность электронов μ_n , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	2,357	13,6
Подвижность дырок μ_p , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	2,203	13,6
Плотность, г/см^3	4,609	4,419
Сечение захвата электронов σ_n , см^2	5×10^{-16}	5×10^{-16}
Сечение захвата дырок σ_p , см^2	$5,63 \times 10^{-16}$	5×10^{-16}
Коэффициент прямой межзонной рекомбинации k_2 , $\text{см}^3/\text{с}$	$1,9 \times 10^{-10}$	2×10^{-9}
Коэффициент Оже-рекомбинации электронов k_{3n} , $\text{см}^6/\text{с}$	6×10^{-29}	10^{-27}
Коэффициент Оже-рекомбинации дырок k_{3p} , $\text{см}^6/\text{с}$	6×10^{-29}	10^{-27}

Используя экспериментально определённое в [33] значение приведённой массы электронов и дырок для орторомбической структуры CsPbBr_3 , были рассчитаны плотности состояний в валентной зоне и зоне проводимости:

$$\mu = \frac{m_{\text{eff}}}{2} = 0,126m_0 \rightarrow m = 2\mu = 0,252m_0, \quad (9)$$

$$N_{\text{C,V}} = 2 \left(\frac{mkT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} = 3,17 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}. \quad (10)$$

Предполагалось, что $m = m_e = m_p$. Значения коэффициентов прямой межзонной и Оже-рекомбинации, равные $2 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$ и $10^{-27} \text{ см}^6/\text{с}$, соответственно, были взяты из экспериментальных работ в [34] и [35]. Параметры перовскитов, используемые в моделировании, приведены в табл. 1.

СТРУКТУРА МОДЕЛИРУЕМОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

В качестве нижнего контакта был выбран оксид олова, легированный фтором. Значения эффективных плотностей состояний в зоне проводимости и валентной зоне рассчитывались на основе экспериментальных значений эффективной массы, как это было сделано для перовскитов. Отметим, что значение $m_e = 0,29m_0$ для FTO было получено при концентрации $N_d = 5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, поэтому в расчё-

Таблица 2. Параметры FTO [36–37]
Table 2. FTO parameters [36–37]

Параметры	FTO
Диэлектрическая проницаемость ϵ	9,86
Энергия сродства к электрону χ , эВ	4,4
Ширина запрещённой зоны E_g , эВ	3,6
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_C , см^{-3}	4×10^{18}
Эффективная плотность состояний в валентной зоне N_V , см^{-3}	4×10^{18}
Концентрация акцепторной примеси N_A , см^{-3}	5×10^{20}
Подвижность электронов μ_n , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	30
Подвижность дырок μ_p , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	30
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	6,99

Таблица 3. Параметры электронного транспортного слоя [38–42]

Table 3. Parameters of ETL material [38–42]

Параметры	TiO_2
Диэлектрическая проницаемость ϵ	10
Энергия сродства к электрону χ , эВ	4,2
Ширина запрещённой зоны E_g , эВ	3,26
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_C , см^{-3}	2×10^{17}
Эффективная плотность состояний в валентной зоне N_V , см^{-3}	6×10^{17}
Концентрация донорной примеси N_D , см^{-3}	10^{18}
Подвижность электронов μ_n , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	100
Подвижность дырок μ_p , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	25
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	4,23
Коэффициент прямой межзонной рекомбинации k^{BB} , $\text{см}^3/\text{с}$	2×10^{-9}
Коэффициент Оже-рекомбинации электронов k_n^A , $\text{см}^6/\text{с}$	10^{-32}
Коэффициент Оже-рекомбинации дырок k_p^A , $\text{см}^6/\text{с}$	10^{-32}

Таблица 4. Параметры дырочного транспортного слоя [43]

Table 4. Parameters of HTL material [43]

Параметры	Spiro-OMeTAD
Диэлектрическая проницаемость ϵ	3
Энергия сродства к электрону χ , эВ	2,2
Ширина запрещённой зоны E_g , эВ	3
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_C , см^{-3}	$2,2 \times 10^{18}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне N_V , см^{-3}	$1,8 \times 10^{19}$
Концентрация акцепторной примеси N_A , см^{-3}	10^{18}
Подвижность электронов μ_n , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	10^{15}
Подвижность дырок μ_p , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$2,1 \times 10^{-3}$
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	$2,16 \times 10^{-3}$

те использовано именно это значение. Параметры FTO представлены в табл. 2.

В качестве электронного транспортного слоя был выбран оксид титана TiO_2 . Основные параметры материалов транспортных слоёв, использованных в моделировании, приведены в табл. 3, 4. Кроме того, для более реалистичного моделирования были добавлены нейтральные дефекты в середине запрещённой зоны. Значения концентрации дефектов и сечения захвата носителей заряда были приняты равными 10^{15} см^{-3} и 10^{-14} см^2 , соответственно. Тепловые скорости электронов и дырок принимались равными 10^7 см/с . В качестве дырочного транспортного слоя был выбран Spiro-OMeTAD.

Для моделирования реальных солнечных элементов было принято: $d = 1 \text{ мкм}$, $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{D,ETL} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$,

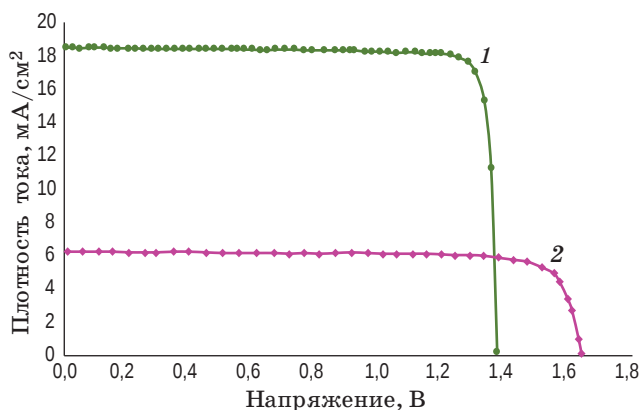


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики фотовольтаических структур. Кривая 1 — CsPbI_3 , кривая 2 — CsPbBr_3

Fig. 2. Current-voltage characteristics of the photovoltaic structures. Curve 1 — CsPbI_3 , 2 — CsPbBr_3

Таблица 5. Параметры солнечных элементов с лучшими характеристиками

Table 5. Parameters of the solar cells with the best characteristics

Параметры	CsPbI_3	CsPbBr_3
η , %	22,5	8,79
U_{OC} , В	1,378	1,638
J_{SC} , мА/см^2	18,95	6,427
Коэффициент заполнения, %	88,44	83,53

$N_{A,HTL} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, материал верхнего контакта — золото, где d — толщина фотоактивного слоя.

В результате моделирования солнечных элементов $\text{FTO/TiO}_2/\text{CsPbI}_3/\text{Spiro-OMeTAD/Au}$ и $\text{FTO/TiO}_2/\text{CsPbBr}_3/\text{Spiro-OMeTAD/Au}$ были построены вольт-амперные характеристики (рис. 2) и рассчитаны основные параметры (табл. 5).

Следует также отметить, что при моделировании не учитывались потери, связанные с затенением поверхности солнечного элемента металлическими контактами. Тем не менее, наилучшая эффективность 22,5% была получена для структуры с перовскитом CsPbI_3 .

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Солнечные элементы на основе перовскита CsPbI_3 были изготовлены на стеклянных подложках с FTO. Подложки были подвергнуты ультразвуковой очистке изопропанолом при 30°C в течение 15 минут. Затем они были промыты дистиллированной водой и высушены сжатым воздухом. Перед переходом к следующему этапу для активации поверхности подложки подвергались УФ обработке в течение 15 минут.

Для создания электронно-транспортного слоя на подложку было нанесено 0,1 мл раствора TiO_2 при 3000 об/мин в течение 10 секунд. После этого образец был подвержен отжигу при 300°C в течение 3 часов. После охлаждения подложки был нанесён раствор перовскита.

Раствор перовскита CsPbI_3 был приготовлен путём смешивания 52 мг CsI и 92 мг PbI_2 в 0,6 мл DMF (диметилформамид) и 0,6 мл DMSO (диметилсульфоксид). Раствор перемешивали при 60°C в течение 60 минут. После перемешивания раствор был нанесён на подложку FTO/ TiO_2 при 3000 об/мин в течение 20 с. Затем образцы отжигались на плитке при 100°C в течение 20 минут.

На фоточувствительный слой перовскита был нанесён дырочный транспортный слой. Раствор Spiro-OMeTAD был приготовлен путём растворения 20 мг Spiro-OMeTAD в 1 мл хлорбензола и перемешивания в течение 1 часа. На образцы было нанесено 0,1 мл раствора при 2000 об/мин в течение 10 с. Затем образцы

были подвержены отжигу при 100 °C в течение 10 минут.

В результате эксперимента были получены фоточувствительные структуры с эффективностью 6–7%, что ниже теоретической. Это может быть связано с фазовой нестабильностью CsPbI₃ при комнатной температуре, поскольку он склонен к фазовому переходу в термодинамически стабильную неперовскитную фазу жёлтого цвета δ -CsPbI₃ [44]. Несмотря на то, что неорганические перовскиты более стабильны, чем гибридные металлоорганические перовскиты, они всё ещё подвержены влиянию факторов окружающей среды, таких как тепло и влага [45]. Более того, воздействие влаги при изготовлении перовскитов на воздухе приводит к ускорению процесса деградации [46]. Транспортные слои также влияют на характеристики фоточувствительной структуры: дефекты в электронно-транспортном слое TiO₂ могут образовывать ловушки, снижающие электронную проводимость [47], а дырочный транспортный слой Spiro-OMeTAD склонен к окислению в присутствии воздуха и интенсивного оптического излучения, что сказывается на его характеристиках [48].

Несмотря на то, что монокристаллические перовскиты имеют большую диффузионную длину носителей заряда, в реальном приборе многочисленные дефекты на границах кристаллических зёрен в поликристаллической перовскитной плёнке могут привести к высокой плотности состояний ловушек и, как следствие, вызвать безызлучательные потери, приводящие к ограничению эффективности [49]. Одним из решений данной проблемы является создание структур на основе композитных материалов, например, перовскитов, модифицированных добавлением наночастиц. Дальнейшее увеличение эффективности возможно за счёт использования композитов на основе перовскитов и фуллеренов C60. Так, в [50] было показано, что включение C60 в состав перовскита MAPbI₃ увеличивает эффективность солнечного элемента с 9,2 до 12,8%. В работе [51] увеличение эффективности до 18,4% также было достигнуто за счёт введения фуллерена C60 в состав перовскита. Увеличение эффективности перовскитных солнечных элементов с добавлением C60 является результатом улучшения оптического поглощения и формирования локализованно-

го дипольного электрического поля, которое усиливает разделение зарядов, что приводит к увеличению плотности тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фотоэлектрические элементы на основе фоточувствительных неорганических перовскитов CsPbI₃ и CsPbBr₃ были смоделированы с помощью программы AFORS-HET. Были оценены основные параметры фотоэлементов: коэффициент заполнения, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, эффективность. В результате моделирования было установлено, что на основе перовскита CsPbBr₃ можно создать солнечный элемент с эффективностью 8,79%, а на основе CsPbI₃ — с эффективностью 22,5%. В то же время, современные солнечные элементы на основе перовскита MAPbI₃ достигают эффективности 21,1% [52], а на основе перовскита FAPbI₃ — 25,8% [53]. Однако наличие метиламмония или формамидина оказывает негативное влияние на температурную стабильность работы структуры, а также увеличивает подверженность деградации во влажной среде [9, 10]. Перовскит MAPbI₃ склонен к разложению при повышенных температурах. Замена катиона MA⁺ на FA⁺ позволяет повысить температурную стабильность, однако FAPbI₃ склонен к переходу из перовскитной α -фазы в неперовскитную δ -фазу при высокой влажности, что негативно сказывается на работе фоточувствительной структуры [54]. Использование катиона Cs⁺ позволяет получать перовскитные солнечные элементы с повышенной стабильностью, при этом их эффективность сравнима с эффективностью элементов на металлоорганических перовскитах. Таким образом, перовскитные солнечные элементы на основе CsPbI₃ обладают высокой теоретической эффективностью, однако параметры созданных экспериментальных образцов на воздухе не достигают высоких значений. Это связано с тем, что перовскитные плёнки могут иметь некоторые недостатки, такие как дефекты, шероховатость поверхности и неполное покрытие, что приводит к снижению поглощения оптического излучения, низким значениям напряжения холостого хода и т.д. Теоретический анализ подтвердил, что эффективное подавление дефектов в плёнке CsPbI₃ улучшает характеристики устройства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Плешанов И.М., Марасанов Д.В., Зеленков Л.Е., Белорус А.О. Технология создания композитов на основе полимеров и нанокристаллов перовскитов для применений в качестве преобразователей излучения датчика искры // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 8. С. 111–119. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-08-111-119>
2. Lee M.M., Teuscher J., Miyasaka T. et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites // Science. 2012. V. 338. № 6107. P. 643–647. <https://doi.org/10.1126/science.1228604>
3. Zhou Y., Wang F., Cao Y. et al. Benzylamine-treated wide-bandgap perovskite with high thermal-photo-stability and photovoltaic performance // Advanced Energy Materials. 2017. V. 7. № 22. P. 1701048. <https://doi.org/10.1002/aenm.201701048>
4. Li H., Tong G., Chen T. et al. Interface engineering using a perovskite derivative phase for efficient and stable CsPbBr₃ solar cells // Journal of Materials Chemistry A. 2018. V. 6. № 29. P. 14255–14261. <https://doi.org/10.1039/C8TA03811B>
5. Kim J.Y., Lee J.W., Jung H.S. et al. High-efficiency perovskite solar cells // Chemical reviews. 2020. V. 120. № 15. P. 7867–7918. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00107>
6. Fateev S.A., Stepanov N.M., Petrov A.A. et al. Successive Solution–Liquid–Vapor conversion of metallic lead films for highly efficient perovskite solar cells // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2022. V. 67. № 7. P. 992–996. <https://doi.org/10.1134/S0036023622070075>
7. Min H., Lee D.Y., Kim J. et al. Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes // Nature. 2021. V. 598. № 7881. P. 444–450. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03964-8>
8. Liang Z., Zhang Y., Xu H. et al. Out-of-plane cations homogenise perovskite composition for solar cells // Nature. 2023. P. 1–3. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06784-0>
9. Juarez-Perez E.J., Ono L.K., Maeda M. et al. Photodecomposition and thermal decomposition in methylammonium halide lead perovskites and inferred design principles to increase photovoltaic device stability // Journal of Materials Chemistry A. 2018. V. 6. № 20. P. 9604–9612. <https://doi.org/10.1039/C8TA03501F>
10. Fateev S.A., Khrustalev V.N., Simonova A.V. et al. Acetamidinium-Methylammonium-based layered hybrid halide perovskite [CH₃C(NH₂)₂][CH₃NH₃]PbI₄: Synthesis, structure, and optical properties // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2022. V. 67. № 7. P. 997–1003. <https://doi.org/10.1134/S0036023622070087>
11. Wang D., Li W., Du Z. et al. Highly efficient CsPbBr₃ planar perovskite solar cells via additive engineering with NH₄SCN // ACS Applied materials & interfaces. 2020. V. 12. № 9. P. 10579–10587. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b23384>
12. Zhu P., Chen C., Dai J. et al. Toward the commercialization of perovskite solar modules // Advanced Materials. 2024. P. 2307357. <https://doi.org/10.1002/adma.202307357>
13. Zhang L., Guo T., Liu B. et al. Intermediate-phase-modified crystallization for stable and efficient CsPbI₃ perovskite solar cells // ACS Applied Materials & Interfaces. 2022. V. 14. № 17. P. 19614–19622. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c04308>
14. Yoon S.M., Min H., Kim J.B. et al. Surface engineering of ambient-air-processed cesium lead triiodide layers for efficient solar cells // Joule. 2021. V. 5. № 1. P. 183–196. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.11.020>
15. Shao J.Y., Li D., Shi J. et al. Recent progress in perovskite solar cells: material science // Science China Chemistry. 2023. V. 66. № 1. P. 10–64. <https://doi.org/10.1007/s11426-022-1445-2>
16. Mehrabian M., Afshar E.N. Improving the efficiency of solar cell based on CsSn_{0.5}Ge_{0.5}I₃ perovskite by using ZnO nanorods. Повышение эффективности солнечных элементов на основе перовскита CsSn_{0.5}Ge_{0.5}I₃ с помощью наностержней ZnO [на англ. яз.] // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 5. С. 78–91. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-05-78-91>
17. Son A.G., Krivogina E.V., Romanov N.V. et al. CsPbI₃ perovskite nanoparticles: Room-temperature synthesis and optical study // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2019. V. 64. P. 1587–1591. <https://doi.org/10.1134/S0036023619120180>
18. Wang J., Che Y., Duan Y. et al. 21.15%-efficiency and stable γ -CsPbI₃ perovskite solar cells enabled by an Acyloin Ligand // Advanced Materials. 2023. V. 35. № 12. P. 2210223. <https://doi.org/10.1002/adma.202210223>
19. Mali S.S., Patil J.V., Shao J.Y. et al. Phase-heterojunction all-inorganic perovskite solar cells surpassing 21.5% efficiency // Nature Energy. 2023. V. 8. № 9. P. 989–1001. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01310-y>
20. Stangl R., Kriegel M., Schmidt M. AFORS-HET, Version 2.2, a numerical computer program for simulation of heterojunction solar cells and measurements // 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference. 2006. V. 2. P. 1350–1353. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.2006.279681>
21. Wang T., Wang P., Ding K. et al. Numerical simulation of carrier transporting layer free planar perovskite cells // Optik. 2019. V. 179. P. 1019–1026. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.11.050>
22. Gagandeep G., Singh M., Kumar R. Simulation of perovskite solar cell with graphene as hole transporting material // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2115. № 1. P. 030548-1–030548-4. <https://doi.org/10.1063/1.5113387>
23. Shakoar A., Nowsherwan G.A., Aamir M.F. et al. Performance evaluation of solar cells by different simulating softwares. Solar PV panels-recent advances and future prospects // IntechOpen. 2023. V. 7. P. 1–21. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111639>
24. Afsari M., Boochani A., Hantezadeh M. Electronic, optical and elastic properties of cubic perovskite CsPbI₃: Using first principles study // Optik. 2016. V. 127. № 23. P. 11433–11443. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.09.013>
25. Li B., Zhang Y., Fu L. et al. Surface passivation engineering strategy to fully-inorganic cubic CsPbI₃ perovskites for high-performance solar cells // Nature communications. 2018. V. 9. № 1. P. 1076. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03169-0>
26. Landi G., Neitzert H.C., Barone C. et al. Correlation between electronic defect states distribution and device performance of perovskite solar cells // Advanced Science. 2017. V. 4. № 10. P. 1700183. <https://doi.org/10.1002/advs.201700183>
27. Laban W.A., Etgar L. Depleted hole conductor-free lead halide iodide heterojunction solar cells // Energy

- & Environmental Science. 2013. V. 6. № 11. P. 3249–3253. <https://doi.org/10.1039/C3EE42282H>
28. Sutton R.J., Filip M.R., Haghighirad A. A. et al. Cubic or orthorhombic? Revealing the crystal structure of metastable black-phase CsPbI₃ by theory and experiment // ACS Energy Letters. 2018. V. 3. № 8. P. 1787–1794. <https://doi.org/10.1021/acsenrgylett.8b00672>
29. Dastidar S., Li S., Smolin S.Y. et al. Slow electron–hole recombination in lead iodide perovskites does not require a molecular dipole // ACS energy letters. 2017. V. 2. № 10. P. 2239–2244. <https://doi.org/10.1021/acsenrgylett.7b00606>
30. Whitcher T.J., Zhu J.X., Chi X. et al. Importance of electronic correlations and unusual excitonic effects in formamidinium lead halide perovskites // Physical Review X. 2018. V. 8. № 2. P. 021034. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.8.021034>
31. Stoumpos C.C., Malliakas C.D., Peters J.A. et al. Crystal growth of the perovskite semiconductor CsPbBr₃: A new material for high-energy radiation detection // Crystal growth & design. 2013. V. 13. № 7. P. 2722–2727. <https://doi.org/10.1021/cg400645t>
32. Chen J. Morrow D.J., Fu Y. et al. Single-crystal thin films of cesium lead bromide perovskite epitaxially grown on metal oxide perovskite (SrTiO₃) // Journal of the American Chemical Society. 2017. V. 139. № 38. P. 13525–13532. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b07506>
33. Yang Z., Surrente A., Galkowski K. et al. Impact of the halide cage on the electronic properties of fully inorganic cesium lead halide perovskites // ACS Energy letters. 2017. V. 2. № 7. P. 1621–1627. <https://doi.org/10.1021/acsenrgylett.7b00416>
34. Gabelloni F., Biccari F., Falsini N. et al. Long-living nonlinear behavior in CsPbBr₃ carrier recombination dynamics // Nanophotonics. 2019. V. 8. № 9. P. 1447–1455. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0013>
35. Srimath Kandada A.R., Neutzner S., D’Innocenzo V. et al. Nonlinear carrier interactions in lead halide perovskites and the role of defects // Journal of the American Chemical Society. 2016. V. 138. № 41. P. 13604–13611. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b06463>
36. Qurashi A. Metal chalcogenide nanostructures for renewable energy applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. 307 p.
37. Rey G., Ternon C., Modreanu M. et al. Electron scattering mechanisms in fluorine-doped SnO₂ thin films // Journal of Applied Physics. 2013. November. V. 114. № 18. P. 183713. <https://doi.org/10.1063/1.4829672>
38. Hossain M.I., Alharbi F.H., Tabet N. Copper oxide as inorganic hole transport material for lead halide perovskite based solar cells // Solar Energy. 2015. V. 120. P. 370–380. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.040>
39. Fuke N., Fukui A., Islam A. et al. Influence of TiO₂/electrode interface on electron transport properties in back contact dye-sensitized solar cells // Solar energy materials and solar cells. 2009. V. 93. № 6–7. P. 720–724. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.09.037>
40. Szydło N., Poirier R. I-V and C-V characteristics of Au/TiO₂ Schottky diodes // Journal of Applied Physics. 1980. V. 51. № 6. P. 3310–3312. <https://doi.org/10.1063/1.328037>
41. Lira-Cantu M. The future of semiconductor oxides in next-generation solar cells. Amsterdam: Elsevier, 2017. 544 p.
42. Yamada Y., Kanemitsu Y. Blue photoluminescence of highly photoexcited rutile TiO₂: Nearly degenerate conduction-band effects // Physical Review B. 2010. V. 82. № 11. P. 113103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.113103>
43. Hossain M.K., Rubel M.H.K., Toki G.I. et al. Effect of various electron and hole transport layers on the performance of CsPbI₃-based perovskite solar cells: A numerical investigation in DFT, SCAPS-1D, and wxAMPS frameworks // ACS omega. 2022. V. 7. № 47. P. 43210–43230. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05912>
44. Yao Z., Zhao W., Liu S. F. Stability of the CsPbI₃ perovskite: From fundamentals to improvements // Journal of Materials Chemistry A. 2021. V. 9. № 18. P. 11124–11144. <https://doi.org/10.1039/D1TA01252E>
45. Dastidar S., Hawley C.J., Dillon A.D. et al. Quantitative phase-change thermodynamics and metastability of perovskite-phase cesium lead iodide // The journal of physical chemistry letters. 2017. V. 8. № 6. P. 1278–1282. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.7b00134>
46. Pathak S.K., Abate A., Ruckdeschel P. et al. Performance and stability enhancement of dye-sensitized and perovskite solar cells by Al doping of TiO₂ // Advanced Functional Materials. 2014. V. 24. № 38. P. 6046–6055. <https://doi.org/10.1002/adfm.201401658>
47. Sanchez R.S., Mas-Marza E. Light-induced effects on Spiro-OMeTAD films and hybrid lead halide perovskite solar cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2016. V. 158. P. 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.024>
48. Mastryukov M.V., Son A.G., Tekshina E.V. et al. Effect of the purity of the precursor SnI₂ on the optical properties of CsSnI₃ perovskite thin films // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2022. V. 67. № 10. P. 1652–1657. <https://doi.org/10.1134/S0036023622100540>
49. Patel M.S., Chaudhary D.K., Kumar P. et al. Fullerene (C60)-modulated surface evolution in CH₃NH₃PbI₃ and its role in controlling the performance of inverted perovskite solar cells // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2020. V. 31. P. 11150–11158. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03664-5>
50. Wu C., Wang K., Yan Y. et al. Fullerene polymer complex inducing dipole electric field for stable perovskite solar cells // Advanced Functional Materials. 2019. V. 29. № 12. P. 1804419. <https://doi.org/10.1002/adfm.201804419>
51. Tai M., Lau C.F.J., Lin H. et al. Advances in phase stability of cesium lead halide perovskites // Solar RRL. 2020. V. 4. № 12. P. 2000495. <https://doi.org/10.1002/solr.202000495>
52. Kim D.W., Noh Y.W., Han J. et al. Efficient MAPbI₃-based perovskite solar cells exceeding 21% efficiency via aging treatment // Chemical Engineering Journal. 2023. V. 475. P. 146451. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146451>
53. Hu J., Yang L., Zhang J. A review on strategies to fabricate and stabilize phase-pure α -FAPbI₃ perovskite solar cells // Solar RRL. 2023. V. 7. № 13. P. 2300187. <https://doi.org/10.1002/solr.202300187>
54. Yang M., Wang H., Cai W. et al. Mixed-halide inorganic perovskite solar cells: Opportunities and challenges // Advanced Optical Materials. 2023. V. 11. № 20. P. 2301052. <https://doi.org/10.1002/adom.202301052>

АВТОРЫ

Александр Эдуардович Дегтерев — аспирант 4-го года обучения СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197022, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57202832938; <https://orcid.org/0000-0002-6151-6567>; aedgterev@etu.ru

Александр Сергеевич Тарасов — магистр 2-го года обучения СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197022, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1360-3137>; astarasov@etu.ru

Мария Михайловна Дегтерева — аспирант 4-го года обучения СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197022, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57213270978; <https://orcid.org/0000-0001-6797-0595>; mmromanovich@etu.ru

Марина Дмитриевна Павлова — аспирант 3-го года обучения СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197022, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57202737636; <https://orcid.org/0000-0001-8815-8993>; mdpavlova@etu.ru

Никита Алексеевич Хоршев — аспирант 1-го года обучения СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197022, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0009-0007-4762-2164>; nakhorshev@etu.ru

Иван Игоревич Михайлов — ассистент СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197022, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 56237734100; <https://orcid.org/0000-0001-5808-6650>; iimikhailov@etu.ru

Иван Анатольевич Ламкин — канд. техн. наук, доцент кафедры фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197022, Россия; Scopus ID: 55312102600; <https://orcid.org/0000-0002-3680-7725>; ialamkin@etu.ru

Сергей Анатольевич Тарасов — доктор технических наук, заведующий кафедрой фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197022, Россия; Scopus ID: 7005125921; <https://orcid.org/0000-0002-6321-0019>; satarasov@etu.ru

AUTHORS

Aleksandr E. Degterev — 4rd year Postgraduate Student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197022, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 57202832938; <https://orcid.org/0000-0002-6151-6567>; aedgterev@etu.ru

Aleksandr S. Tarasov — 2nd year Master Student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197022, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1360-3137>; astarasov@etu.ru

Mariya M. Degtereva — 4rd year Postgraduate Student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197022, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 57213270978; <https://orcid.org/0000-0001-6797-0595>; mmromanovich@etu.ru

Marina D. Pavlova — 3rd year Postgraduate Student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197022, Russia; Scopus ID: 57202737636; <https://orcid.org/0000-0001-8815-8993>; mdpavlova@etu.ru

Nikita A. Khorshev — first year Postgraduate Student of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197022, St. Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0009-0007-4762-2164>; nakhorshev@etu.ru

Ivan I. Mikhailov — Assistant at St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, 197022, Russia; Scopus ID: 56237734100; <https://orcid.org/0000-0001-5808-6650>; iimikhailov@etu.ru

Ivan A. Lamkin — PhD, Associate Professor of the Department of Photonics, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197022, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 55312102600; <https://orcid.org/0000-0002-3680-7725>; ialamkin@etu.ru

Sergey A. Tarasov — Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Photonics, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197022, St. Petersburg, Russia; Scopus ID: 7005125921; <https://orcid.org/0000-0002-6321-0019>; satarasov@etu.ru

Статья поступила в редакцию 10.01.2024
Одобрена после рецензирования 20.02.2024
Принята к печати 28.06.2024

The article was submitted to the editorial office 10.01.2024
Approved after review 20.02.2024
Accepted for publication 28.06.2024