

Краткое сообщение
УДК 535.3, 004.353.254.5
DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19107>

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСТРАКЦИИ СВЕТА ИЗ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ С ЗОЛОТОЙ НАНОЧАСТИЦЕЙ

К. Н. Новикова^{1,2} , А. С. Фунтикова^{1,2},
А. М. Можаров¹, И. С. Мухин^{1,2}

¹ Академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 novikova_k@spbau.ru

Аннотация. С целью развития технологии изготовления нитевидных нанокристаллов GaP (ННК GaP), интегрированных с Au-наночастицами, перспективных для создания микросветодиодов красного диапазона, проанализирована эффективность экстракции света из ННК GaP как с золотой наночастицей, так и без нее. Кроме того, была исследована связь указанной эффективности с расположением активной области в светодиодной гетероструктуре «ядро-оболочка». При этом применялось полноволновое оптическое численное моделирование распространения света с помощью пакета «COMSOL Multiphysics» в модуле «Wave Optics». Исследованная система состояла из кремниевой подложки в воздушной среде и прикрепленного к ней ННК с Au-наночастицей. В качестве источника излучения была использована имитация оптического точечного диполя. Показано, что наличие Au-наночастицы приводит к существенному (примерно на 12%) повышению эффективности экстракции света вследствие локализованного плазмонного резонанса и усиления ближнего электрического поля в области контакта частицы с нанокристаллом.

Ключевые слова: фосфид галлия, GaAsPN, наночастица золота, гибридная наноструктура, эффективность экстракции света

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (грант государственного задания FSEG-2024-0017).


Для цитирования: Новикова К. Н., Фунтикова А. С., Можаров А. М., Мухин И. С., Численное исследование эффективности экстракции света из нитевидных нанокристаллов фосфида галлия, интегрированных с золотой наночастицей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 1. С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19107>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Brief communication

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19107>

NUMERICAL STUDY OF THE LIGHT EXTRACTION EFFICIENCY FROM GALLIUM PHOSPHIDE NANOWIRES INTEGRATED WITH A GOLD NANOPARTICLE

К. Н. Novikova^{1,2} , А. С. Funtikova^{1,2},
А. М. Mozharov¹, I. S. Mukhin^{1,2}

¹ Alferov University of RAS, St. Petersburg, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 novikova_k@spbau.ru

Abstract. In order to develop the fabrication technology of GaP nanowires (NWs) integrated with Au nanoparticles (NPs), i.e., of an object promising for creating red-range micro-LEDs, its light extraction efficiency has been analyzed both with and without the Au NP. Moreover, the relationship between this efficiency and the position of the active region within the core-shell LED heterostructure was investigated. In this case the full-wave optical numerical simulation of light propagation using the "COMSOL Multiphysics" software package, specifically the "Wave Optics" module, was performed. The system under study included a silicon substrate in the aerial environment with the object (GaP NW + Au NP) clamped to. An imitation of an optical point dipole was taken as a radiation source. The presence of the Au nanoparticle was shown to lead to a significant increase (of approximately 12%) in light extraction efficiency due to localized surface plasmon resonance and the enhancement of the near electric field in the contact area of the Au particle with the nanocrystal.

Keywords: gallium phosphide, GaAsPN, gold nanoparticle, hybrid nanostructure, light extraction efficiency

Funding: The reported study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment Grant No. FSEG-2024-0017).

For citation: Novikova K. N., Funtikova A. S., Mozharov A. M., Mukhin I. S., Numerical study of the light extraction efficiency from gallium phosphide nanowires integrated with a gold nanoparticle, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (1) (2026) 83–90. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19107>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Проведение синтеза фосфида галлия на кремниевых подложках позволяет создавать недорогие оптические устройства, совместимые с хорошо освоенными кремниевыми технологиями. Благодаря высокому показателю преломления фосфид галлия может выступать в качестве волновода для видимого излучения, а возможность синтеза прямозонных твердых растворов GaAsPN делает этот материал перспективным для создания светоизлучающих устройств.

Нитевидные нанокристаллы (ННК) вызывают особый практический интерес, ввиду эффективной релаксации в них упругих напряжений, не сопровождаемых образованием структурных дефектов; эта их особенность позволяет сохранять высокое кристаллическое качество синтезированных структур. В связи с этим развивается с нарастающей силой синтез ННК фосфида галлия методом молекулярно-пучковой эпитаксии, который относится к подходам «снизу-вверх». Такие подходы подразумевают сборку наноструктур из атомов или молекул. Метод молекулярно-пучковой эпитаксии позволяет выращивать нано- и микроструктуры необходимой геометрии и состава на разных подложках, в том числе и рассогласованных по параметру кристаллической решетки с синтезируемой структурой. Как было показано в статье [1], указанный подход позволяет создавать структуры «ядро-оболочка» с разным типом легирования. Такие особенности позволяют перейти к созданию микросветодиодов нового поколения на основе ННК фосфида галлия GaP. Микросветодиоды перспективны как с практической, так и с чисто научной точки зрения. Требования к размерам светодиодов различны и зависят от их назначения. В частности, для носимой электроники и дисплеев телефонов актуальны размеры порядка 5 – 50 мкм [2 – 4]; при том, что для высокого разрешения в системах виртуальной/дополненной реальности пользуются спросом светодиоды размером 1 – 5 мкм. При миниатюризации планарных устройств по технологии «сверху-вниз», которая заключается в травлении полупроводниковых слоев, происходит возникновение дефектов в активной области светодиода, что ведет к снижению внешней квантовой эффективности. Такого снижения можно избежать, если использовать ННК с гетероструктурой типа «ядро-оболочка», обладающей активной областью, закрытой от внешнего воздействия. В этом случае наноразмерное разрешение светодиода достигается благодаря естественной

геометрии ННК, формируемой в процессе роста. На рис. 1, *a* представлено схематическое изображение *p-i-n*-гетероструктуры ядро-оболочка на основе ННК GaP/GaAsPN/GaP.

Известно, что наличие локализованного плазмонного резонанса, связанного с наночастицами благородных металлов, и его чувствительность к окружающей среде, форме и размерам наночастиц находят широкое применение в сенсорике и медицине. При этом локальное усиление электрического поля в наночастице на частоте локализованного плазмонного резонанса способствует повышению уровня оптической накачки и ускорению излучательной рекомбинации исходной полупроводниковой структуры; а плазмон-индуцированная генерация горячих электронов в металлических наночастицах обеспечивает дополнительный транспорт и накопление носителей заряда в полупроводнике. Таким образом, интеграция металлических наночастиц с полупроводниковыми соединениями

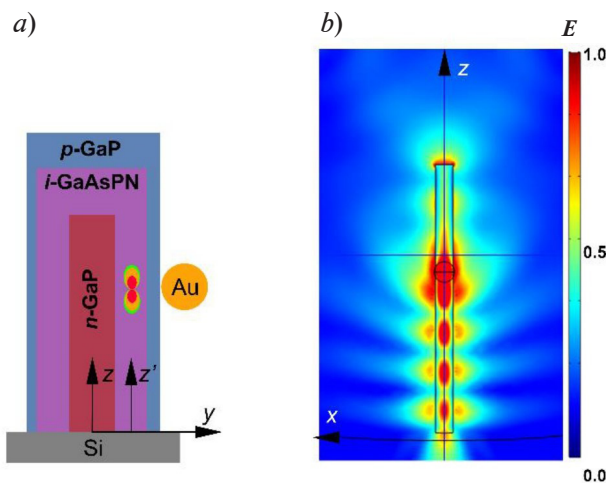


Рис. 1. Графическое представление сечений объекта исследования в двух плоскостях: *a* – схематическое изображение ННК структуры GaP/GaAsPN/GaP с закрепленной золотой частицей (показано примерное расположения диполя в расчете); *b* – распределение напряженности электрического поля по исследуемой системе (в нормированных единицах)

позволяет повысить эффективность устройств на их основе [5, 6]. Однако светодиоды на основе ННК GaP со структурой ядро-оболочка, интегрированные с наночастицами золота Au, и их оптические свойства на сегодняшний день остаются практически неизученными и пробуждают особый интерес для множества приложений.

Цели настоящей работы – анализ зависимости эффективности экстракции света (Light Extraction Efficiency (LEE)) из микросветодиодов на основе нитевидных нанокристаллов фосфида галлия при модернизации их поверхности наночастицами Au, а также выявление связи LEE с расположением активной области светодиодной гетероструктуры ядро-оболочка на основе ННК GaP/GaAsPN/GaP.

Для достижения поставленных целей было проведено численное моделирование изучаемой системы с помощью пакета “COMSOL Multiphysics”.

Материалы и методы

Для оценки изменения эффективности экстракции света при наличии наночастицы золота на поверхности светодиода было проведено полноволновое оптическое моделирование распространения света с помощью пакета “COMSOL Multiphysics” в модуле “Wave Optics”. Исследуемая система состояла из кремниевой подложки в воздушной среде и прикрепленного к ней ННК с наночастицей золота.

В качестве источника излучения был использован оптический точечный диполь, который представляет собой стандартную (и хорошо себя зарекомендовавшую) модель для имитации локального электрического диполя, возникающего при излучательной рекомбинации электронно-дырочной пары в квантовой яме или активной области полупроводника. Ориентация и положение диполя варьировались в ходе расчета. Необходимость варьирования угла поляризации диполя обусловлена тем, что в реальной активной области ориентация дипольного момента рекомбинирующих пар может оказаться случайной. Расчет же для разных ориентаций позволяет усреднить результаты и получить тем самым наиболее реалистичный вариант.

Схематическое изображение системы в сечении *zy* представлено на рис. 1, *a*. В качестве аналога активной области в структуре типа ядро-оболочка брался оптический точечный диполь, расположенный на оси *z'*, смещенной по оси *y*. Под активной областью светодиода в данном исследовании подразумевается нелегированный слой структуры *i*-GaAsPN

в составе $p-i-n$ -гетероструктуры ядро-оболочка. Эта активная область служит потенциальной ямой для носителей заряда, где происходит их излучательная рекомбинация с испусканием фотонов. Поскольку реальная толщина i -го слоя в нанокристалле мала, его влияние на оптические свойства структуры моделировалось с использованием точечного электрического диполя (это стандартный подход при численном анализе излучения в наноразмерных полупроводниковых структурах). Перемещение активной области в процессе численного моделирования соответствовало смещению позиции диполя вдоль оси y , что имитировало расположение i -го слоя ближе или дальше от боковой поверхности ННК. Такое смещение реализуется технологически путем регулировки момента осаждения материала активной области при выращивании нанокристалла методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

Длина и диаметр ННК были фиксированными и составляли 3,0 и 0,2 мкм, соответственно; выбор основывался на результатах, полученных нами в предыдущих работах [7, 8] и опубликованных экспериментальных данных. Диэлектрическая проницаемость кремния, фосфида галлия и золота была взята из статей [9 – 11]. Для подавления нефизических отражений от границ расчетной области и имитации бесконечного открытого пространства со всех сторон, кроме границы с подложкой, был использован идеально согласованный слой (*англ.* Perfectly Matched Layer (PML)).

Моделирование заключалось в решении уравнений Максвелла в частотной области для длины волны 650 нм, которая не только характерна для красных светодиодов, но и соответствует предполагаемой ширине запрещенной зоны для твердого раствора GaAsPN [12, 13]. Эффективность LEE определялась как отношение мощности потока вектора Пойнтинга через верхнюю контрольную поверхность (расположена над структурой) к полной мощности, излучаемой диполем.

Важно отметить, что результаты данного расчета, выполненного для фосфида галлия, можно экстраполировать на структуры с GaAsPN, поскольку качественное поведение системы должно быть аналогичным благодаря близости оптических параметров этих материалов. Ключевой же волноводный эффект в ННК обеспечивается контрастом между высоким значением показателя преломления всего кристалла ($n_{\text{GaP}} \approx 3,4$) и воздушной окружающей средой ($n_{\text{air}} \approx 1,0$).

Результаты и их обсуждение

В результате полноволнового оптического моделирования распределения света были получены следующие данные: нормированное распределение напряженности электрического поля в исследуемой системе, а также зависимость эффективности экстракции света от радиуса наночастицы. Кроме того, было найдено оптимальное смещение положения точечного диполя относительно частицы. В расчетах варьировался угол поляризации диполя для каждой геометрической конфигурации и определялась доля мощности электромагнитной волны, излучаемой диполем, поступившая в верхнюю плоскость исследуемой системы. Типичное распределение амплитуды напряженности электрического поля при фиксированной конфигурации диполя и позиции золотой наночастицы показано на рис. 1, *b*. Это распределение дает представление об увеличении локализации электрического поля вокруг наночастицы, а также о преимущественном выводе излучения через верхнюю грань ННК.

В результате численного моделирования была определена зависимость эффективности экстракции света в вертикальном направлении от радиуса НЧ золота в диапазоне от 25 до 200 нм (рис. 2, *a*) при смещении диполя по оси y на 50 нм. Нулевая точка на графике соответствует числовому расчету в отсутствие Au-наночастицы при положении диполя, смещенного по оси y . Позиция диполя по оси z' была выбрана в максимуме нормы напряженности электрического поля (см. нашу работу [7]). Немонотонная зависимость эффективности LEE от радиуса наночастицы (см. рис. 2, *a*) типична для плазмонных систем и обусловлена резонансным характером взаимодействия.

При определенном размере наночастицы золота частота ее локализованного плазмонного резонанса согласуется наилучшим образом с рабочей длиной волны диполя (650 нм). Такое оптимальное согласование способствует максимальному усилению ближнего поля и, как следствие, повышению эффективности переизлучения энергии в дальнее поле.

Таким образом, установлено, что наличие частицы золота радиусом около 175 нм приводит к увеличению эффективности экстракции света из ННК в верхнюю плоскость на 12%, по сравнению со структурой в отсутствие частицы.

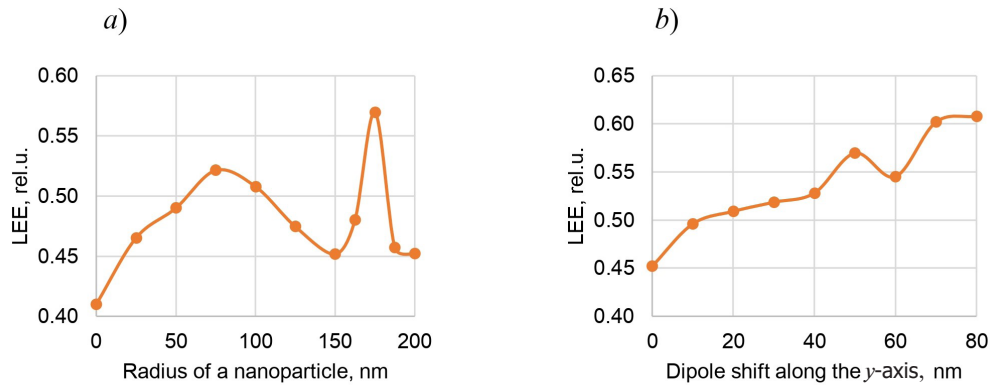


Рис. 2. Графики зависимости эффективности LEE от радиуса Au-наночастицы при сдвиге диполя на 50 нм по оси y (a) и от сдвига диполя по оси y при оптимальном радиусе наночастицы около 175 нм (b)

Для оценки оптимального положения активной области светодиода было проведено численное моделирование эффективности экстракции света в зависимости от положения диполя по оси y (рис. 2, b), причем такой расчет эквивалентен оценке необходимой толщины эмиттерного «ядра» и положения «оболочки» активной области. Из данных рис. 2, b следует, что эффективность экстракции света (LEE) монотонно растет по мере приближения диполя к наночастице (смещения по оси y). Полученные зависимости показывают, что эффективность экстракции света возрастает при приближении активной области к Au-наночастице и достигает максимума при смещении диполя примерно на 80 нм. Однако дальнейшее укорочение расстояния между активной областью и наночастицей затруднено технологически, поскольку при этом верхний p -слой GaP становится чересчур тонким и теряет необходимую электропроводность. Другими словами, полностью приближать активную область к поверхности нанокристалла оказывается нецелесообразным. Исходя из этого, оптимальное смещение составляет примерно 70 нм. При таком значении смещения сохраняется баланс между повышенной эффективностью экстракции света и толщиной p -области, которая достаточна, чтобы обеспечить стабильный токоперенос и надежную работу светодиодной структуры.

Заключение

Проведено численное моделирование структуры типа ядро-оболочка на основе нитевидных нанокристаллов GaP/GaAsPN с точечным излучающим источником, смещенным относительно оси нанокристалла и декорированной наночастицей золота.

Показано, что наличие золотой наночастицы приводит к существенному повышению эффективности экстракции света (LEE) вследствие локализованного плазмонного резонанса и усиления ближнего электрического поля в области контакта Au-наночастицы с нанокристаллом GaP/GaAsPN. Оптимальный радиус наночастицы составляет около 175 нм для длины волны 650 нм (рабочая длина волны диполя); при этом значении радиуса наблюдается максимальное усиление вывода излучения в верхнее полупространство.

Установлено также, что эффективность экстракции света возрастает при смещении активной области светодиодной структуры в сторону Au-наночастицы. Однако на приближение активной области к поверхности нанокристалла накладывается технологическое ограничение, связанное с утончением верхнего p -слоя, приводящее к ухудшению его электропроводности. На основе результатов моделирования найдено оптимальное смещение активной области (около 70 нм) от оси нанокристалла, обеспечивающее наилучший баланс между эффективностью оптического вывода и электрическими свойствами структуры.

Полученные результаты позволяют определять оптимальные параметры светодиодных гетероструктур на основе НК GaP/GaAsPN/GaP, интегрированных с наночастицами золота, и могут быть использованы при разработке высокоэффективных микросветодиодов нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sharov V., Novikova K., Mozharov A., Fedorov V., Kirilenko D., Alekseev P., Mukhin I. Highly-doped MBE-grown GaP nanowires: Synthesis, electrical study and modeling // Scripta Materialia. 2024. Vol. 248. 15 July. P. 116128.
2. Wu T., Sher Ch.-W., Lin Y., et al. Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. No. 9. P. 1557.
3. Chen Z., Yan S., Danesh C. MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges // Journal of Physics D: Applied Physics. 2021. Vol. 54. No. 12. P. 123001.
4. Anwar A. R., Sajjad M. T., Johar M. A., Hernández-Gutiérrez C. A., Usman M., Lepkowski S. P. Recent progress in micro-LED-based display technologies // Laser & Photonics Reviews. 2022. Vol. 16. No. 6. P. 2100427.
5. Shin D.-Y., Kim T., Akuyz O., Demir H. V., Lee I.-H. Ag@SiO₂-embedded InGaN/GaN nanorod array white light-emitting diode with perovskite nanocrystal films // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 898. 25 March. P. 162974.
6. Chen R., Li D., Hu H., et al. Tailoring optical properties of silicon nanowires by Au nanostructure decorations: Enhanced Raman scattering and photodetection // The Journal of Physical Chemistry C. 2012. Vol. 116. No. 7. Pp. 4416–4422.
7. Novikova K. N., Funtikova A. S., Mozharov A. M., Mukhin I. S. Numerical investigation of influence GaP nanowire geometry to light extraction efficiency of red light-emitting diode // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics. 2024. Vol. 17. No. 3.2. Pp. 84–87.
8. Funtikova A. S., Mozharov A. M., Fedorov V. V., Sharov V. A., Mukhin I. S. Numerical modal analysis of GaP optical microcavity // St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. 2024. Vol. 17. No. 3.1. Pp. 115–119.
9. Adachi S. Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, Al_xGa_{1-x}As, and In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} // Journal of Applied Physics. 1989. Vol. 66. No. 12. Pp. 6030–6040.
10. Green M. A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2008. Vol. 92. No. 11. Pp. 1305–1310.
11. McPeak K. M., Jayanti S. V., Kress S. J. P., Meyer S., Iotti S., Rossinelli A., Norris D. J. Plasmonic films can easily be better: Rules and recipes // ACS Photonics. 2015. Vol. 2. No. 3. Pp. 326–333.
12. Fedorov V. V., Dvoretckaia L. N., Mozharov A. M., Fedina S. V., Kirilenko D. A., Berezovskaya T. N., Faleev N. N., Yunin P. A., Drozdov M. N., Mukhin I. S. Dual-functional light-emitting and photo-detecting GaAsPN heterostructures on silicon // Materials Science in Semiconductor Processing. 2023. Vol. 168. December. P. 107867.
13. Можаров А. М., Кудряшов Д. А., Большаков А. Д., Цырлин Г. Э., Гудовских А. С., Мухин И. С. Численное моделирование характеристик солнечных элементов на основе GaPNAs/Si гетероструктур и GaN нитевидных нанокристаллов // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 11. С. 1543–1547.

REFERENCES

1. Sharov V., Novikova K., Mozharov A., et al., Highly-doped MBE-grown GaP nanowires: Synthesis, electrical study and modeling, Scr. Mater. 248 (15 July) (2024) 116128.
2. Wu T., Sher Ch.-W., Lin Y., et al., Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology, Appl. Sci. 8 (9) (2018) 1557.
3. Chen Z., Yan S., Danesh C., MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress, and challenges, J. Phys. D. Appl. Phys. 54 (12) (2021) 123001.
4. Anwar A. R., Sajjad M. T., Johar M. A., et al., Recent progress in micro-LED-based display technologies, Laser Photon. Rev. 16 (6) (2022) 2100427.

5. Shin D.-Y., Kim T., Akuyz O., et al., Ag@SiO₂-embedded InGaN/GaN nanorod array white light-emitting diode with perovskite nanocrystal films, *J. Alloys Compd.* 898 (25 March) (2022) 162974.
6. Chen R., Li D., Hu H., et al., Tailoring optical properties of silicon nanowires by Au nanostructure decorations: Enhanced Raman scattering and photodetection, *J. Phys. Chem. C.* 116 (7) (2012) 4416–4422.
7. Novikova K. N., Funtikova A. S., Mozharov A. M., Mukhin I. S., Numerical investigation of influence GaP nanowire geometry to light extraction efficiency of red light-emitting diode, *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics.* 17 (3.2) (2024) 84–87.
8. Funtikova A. S., Mozharov A. M., Fedorov V. V., et al., Numerical modal analysis of GaP optical microcavity // *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics.* 17 (3.1) (2024) 115–119.
9. Adachi S., Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, Al_xGa_{1-x}As, and In_{1-x}Ga_xAsP_{1-y}, *J. Appl. Phys.* 66 (12) (1989) 6030–6040.
10. Green M. A., Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients, *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells.* 92 (11) (2008) 1305–1310.
11. McPeak K. M., Jayanti S. V., Kress S. J. P., et al., Plasmonic films can easily be better: Rules and recipes, *ACS Photonics.* 2 (3) (2015) 326–333.
12. Fedorov V. V., Dvoretckaja L. N., Mozharov A. M., et al., Dual-functional light-emitting and photo-detecting GaAsPN heterostructures on silicon, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 168 (Dec) (2023) 107867.
13. Mozharov A. M., Kudryashov D. A., Bolshakov A. D., et al., Numerical simulation of the properties of solar cells based on GaPNAs/Si heterostructures and GaN nanowires, *Semicond.* 50 (11) (2016) 1521–1525.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НОВИКОВА Кристина Николаевна – лаборант лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории эпитаксиальных наноструктур соединений A³B⁵ на кремнии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
 novikova_k@spbau.ru
 ORCID: 0000-0001-8440-494X

ФУНТИКОВА Анастасия Сергеевна – аспирантка Академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории эпитаксиальных наноструктур соединений A³B⁵ на кремнии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
 n.fn@mail.ru
 ORCID: 0009-0000-3147-6974

МОЖАРОВ Алексей Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
 mozharov@spbau.ru
 ORCID: 0000-0002-8661-4083

МУХИН Иван Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

imukhin@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9792-045X

THE AUTHORS

NOVIKOVA Kristina N.

Alferov University of RAS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

8-3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia

novikova_k@spbau.ru

ORCID: 0000-0001-8440-494X

FUNTIKOVA Anastasiia S.

Alferov University of RAS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

n.fn@mail.ru

ORCID: 0009-0000-3147-6974

MOZHAROV Alexey M.

Alferov University of RAS

8-3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia

mozharov@spbau.ru

ORCID: 0000-0002-8661-4083

MUKHIN Ivan S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Alferov University of RAS

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

imukhin@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9792-045X

*Статья поступила в редакцию 17.10.2025. Одобрена после рецензирования 10.11.2025.
Принята 10.11.2025.*

Received 17.10.2025. Approved after reviewing 10.11.2025. Accepted 10.11.2025.