

07

## Исследование влияния растекания тока на особенности работы микросветодиодов GaP/GaPNAs/GaP на Si

© Л.Н. Дворецкая<sup>1</sup>, А.М. Можаров<sup>1</sup>, В.С. Волосатова<sup>1</sup>, В.В. Федоров<sup>1,2</sup>, А.К. Кавеев<sup>1,3</sup>, Д.В. Минив<sup>1</sup>, И.С. Мухин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Liliyabutler@gmail.com

Поступило в Редакцию 28 августа 2025 г.

В окончательной редакции 23 сентября 2025 г.

Принято к публикации 24 сентября 2025 г.

Рассматривается светоизлучающее полупроводниковое устройство на основе системы материалов GaP/GaPNAs/GaP, работающее в красно-оранжевом спектральном диапазоне. Представлено численное моделирование растекания тока в рассматриваемой системе материалов, а также экспериментальные данные, демонстрирующие электролюминесценцию в красном диапазоне частот. Показано, что для  $p-i-n$  GaP/GaPNAs/GaP-гетероструктуры при формировании приборных светоизлучающих областей не требуется создания разделительных мез, так как область эмиссии света в большей степени ограничивается областью верхнего электрода, что существенно упрощает технологический процесс изготовления светодиодов.

**Ключевые слова:** GaPNAs на Si, GaP на Si, текстурирование GaP(N,As), матричные светодиоды, кремний, полупроводники.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.03.62175.20485

Сопряжение прямозонных полупроводниковых материалов и электронных компонентов на кремнии открывает новые возможности для развития оптоэлектронных устройств в различных приложениях [1,2]. При этом на данный момент существуют ограничения при прямой эпитаксии большинства прямозонных полупроводниковых соединений  $A_3B_5$  непосредственно на Si из-за несоответствия симметрии и постоянных кристаллической решетки, что приводит к образованию дислокаций и негативно сказывается на работе конечного устройства. В связи с этим для создания элементов оптоэлектронных устройств, как правило, используют решеточно-согласованные подложки соединений  $A_3B_5$  (GaAs, InP) [3]. Также применяют метаморфные толстые буферные слои, существенно усложняющие технологию роста и, как следствие, повышающие конечную стоимость гетероструктур [4].

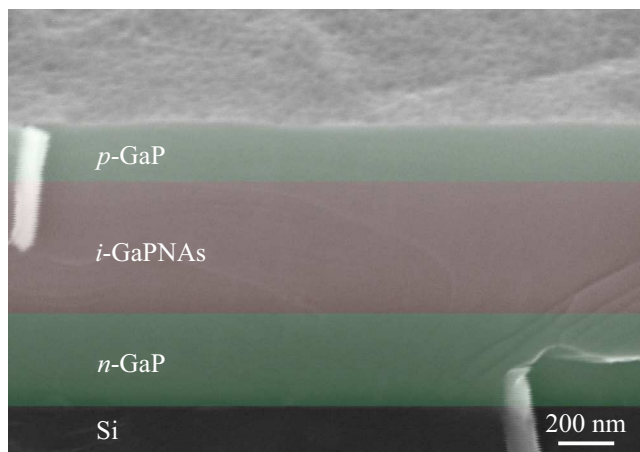
При невозможности прямого синтеза на Si реализация элементов оптоэлектронного устройства на кремнии осуществляется с помощью склеивания (бондинга) полупроводниковой структуры с кремниевой подложкой [5]. При этом требуется поддержание высокой степени чистоты, так как частицы размером порядка  $1\text{ }\mu\text{m}$ , расположенные на интерфейсе склейки, негативно влияют на качество и характеристики всего устройства [6,7].

В свою очередь монокристаллическая эпитаксиальная интеграция на Si предпочтительнее гибридного подхода, при котором элементы переносятся на поверхность Si. К ее преимуществам относятся масштабируемость, технологичность, уменьшенное тепловое сопротивление и сни-

женные паразитные параметры электрических межсоединений. В зависимости от полупроводникового материала и конечного устройства оптоэлектронные приборы могут характеризоваться различными параметрами, такими как длина волны, интенсивность излучения, геометрия структуры и др. Например, высокоразрешающие микродисплеи, очки виртуальной реальности, требуют создания массивов микроизлучателей или точечных источников света, что в настоящее время реализуется за счет многоуровневого технологического процессирования для формирования микросветодиодов на основе тонкопленочной полупроводниковой технологии [8,9].

В качестве наиболее решеточно-согласованного с кремнием материала выступает GaP, при этом GaP имеет непрямозонную структуру, что затрудняет использование данного материала в оптических структурах. В свою очередь эпитаксиальные гетероструктуры GaP и его твердые растворы, такие как азотсодержащие GaP(N,As), являются новым классом полупроводниковых материалов, перспективных для создания энергоэффективных светоизлучающих диодов, работающих в видимом и ближнем ИК-диапазоне (600–800 nm) [10,11].

Принцип работы микросветодиода на основе  $p-i-n$ -гетероструктуры GaP(N,As) основан на рекомбинации электрон-дырочных пар в активной области GaPNAs, что приводит к возникновению фотонов. На данный момент существуют работы по изучению электрооптических свойств полупроводниковых гетероструктур GaPNAs на Si для создания светоизлучающих диодов и фотоэлектрических преобразователей на их



**Рис. 1.** СЭМ-изображение скла синтезированной  $p-i-n$  GaP/GaPNAs/GaP-гетероструктуры и состав ее слоев.

основе [12–14]. При формировании микросветодиодов на Si для повышения разрешения микродисплеев, работающих в красном спектральном диапазоне, требуется оптимизация технологического процессирования.

В настоящей работе численно и экспериментально показано, что при формировании приборных светоизлучающих микроструктур на основе GaP(N,As) на Si не требуется создания разделительных мез, так как область эмиссии света в большей степени ограничивается областью верхнего контакта в связи с низкой подвижностью носителей зарядов в эмиттерах, что существенно упрощает технологический процесс изготовления светодиодов.

В работе рассмотрена  $p-i-n$  GaP/GaPNAs/GaP-гетероструктура, выращенная на Si-подложке методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на установке Veeco GEN-III. Для роста гетероструктур использовались вицинальные подложки кремния (001) с углом разориентации  $4.0 \pm 0.5^\circ$  в направлении  $\langle 110 \rangle$ . Подложки Si очищались по методу Ширази. Поверхностный окисел кремния удалялся термическим отжигом при минимально необходимой температуре ( $T = 820 \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $t = 30$  min). При этом на картинах дифракции быстрых электронов наблюдалось формирование однотипной поверхностной реконструкции Si ( $2 \times 1$ ). Эпитаксия первых буферных слоев GaP на Si (001) осуществлялась с помощью двухстадийного метода, обеспечивающего разделение стадий зарождения и роста слоя GaP и состоящего из низкотемпературного ( $450 \pm 10^\circ\text{C}$ ) и высокотемпературного ( $580 \pm 10^\circ\text{C}$ ) этапов, что обеспечивает получение эпитаксиального слоя без двойникования. Состав и толщины слоев, а также изображение скла структуры, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), приведены на рис. 1. Для формирования светоизлучающей приборной структуры требуется создание омических контактов к эмиттерным слоям, а также фор-

мирование приборных мез, ограничивающих область инжекции носителей заряда, а значит, их рекомбинации и эмиссии света. В гетероструктурах с высокой подвижностью носителей заряда (и значимыми длинами пробегов) для ограничения областей эмиссии света методом травления части гетероструктуры создаются ограничительные мезы. При этом на боковой стенке мезы могут возникать центры безызлучательной рекомбинации, негативно влияющие на характеристики светодиода. В случае относительно малых длин пробега носителей заряда формирование мез не требуется, и область эмиссии ограничивается областью контакта.

С использованием пакета численного моделирования COMSOL Multiphysics и модуля AC/DC было проведено исследование процессов растекания тока в рассматриваемой гетероструктуре GaP/GaPNAs/GaP на Si. Рассматриваемая геометрия представляла собой слои  $p-i-n$ -структуры, к которым с противоположных сторон формировались перекрестные контакты шириной  $5\text{ }\mu\text{m}$ . Такое расположение контактов обеспечивает протекание тока в основном в области пересечения электродов. Данная геометрия приближена к одномерной модели и при этом позволяет учесть конечное сопротивление эмиттерных слоев. Для обеспечения вывода света, связанного с рекомбинацией носителей заряда в активной области, один из электродов имел центральное квадратное отверстие (окно) с размером сторон в диапазоне  $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ . На рис. 2 представлены полученные зависимости растекания тока в сечении структуры.

Можно видеть, что основное протекание тока осуществляется в области пересечения контактов. На основании построенных карт можно оценить размер области неоднородности плотности тока вблизи пересечения контактов, который составил  $1.5\text{--}2.5\text{ }\mu\text{m}$ . Таким образом, можно сделать вывод, что для формирования светодиодов в случае использования скрещенных контактов не требуется проводить разграничительное травление гетероструктуры, что упрощает технологический процесс изготовления. Анализ размеров вскрытого окна в одном из контактов показывает, что падение уровня тока в центре окна составляет 7% для стороны окна  $1\text{ }\mu\text{m}$  и 20% для  $2\text{ }\mu\text{m}$ . Таким образом, непосредственно под металлическим контактом, а также вблизи контакта будет доминировать механизм излучательной рекомбинации в базе, что приведет к увеличению удельной проводимости базы и обеспечит протекание большей доли тока через нее. За счет ограниченной величины латеральной проводимости GaP-эмиттеров данный эффект приведет к быстрому падению разности потенциалов в эмиттерах с латеральным отдалением от границы металла и переходу к доминированию механизма рекомбинации Шокли–Рида–Холла. Таким образом, граница области, в которой наблюдается неоднородность тока, т.е. растекание тока, соответствует переходу от доминирующего механизма излучательной рекомбинации к рекомбинации Шокли–Рида–Холла. В связи с этим для улучшения вывода света

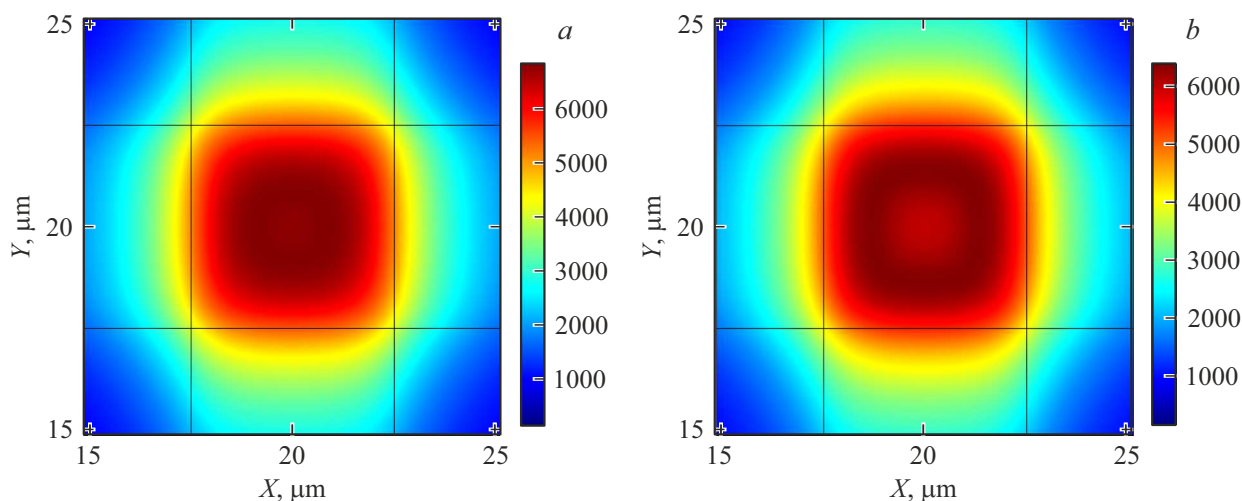


Рис. 2. Карты растекания тока при приложенном напряжении смещения 1.8 В для окна шириной 1 (а) и 2  $\mu\text{m}$  (b).

возможно изготовление перфорированных электродов с размером окон в диапазоне 1–2  $\mu\text{m}$ .

Для структуры с толщиной активной области 200 nm и толщиной эмиттерных слоев 500 nm было проведено численное моделирование процесса вывода света из активной области. Расчетные данные для диаграммы направленности представлены на рис. 3. Можно видеть, что основная доля излучения, выходящая из структуры, направлена в угловом растворе  $\pm 45^\circ$  (относительно нормали к плоскости слоев). Наличие пиков на графике связано с образованием стоячих волн в тонкопленочной структуре и модуляцией эффективности вывода света. Полная доля света, который преодолевает ограничение полного внутреннего отражения и выходит из структуры, составляет около 30 %.

Для экспериментальной валидации расчетных данных к выращенной гетероструктуре были сформированы контакты, измерены вольт-амперные характеристики и

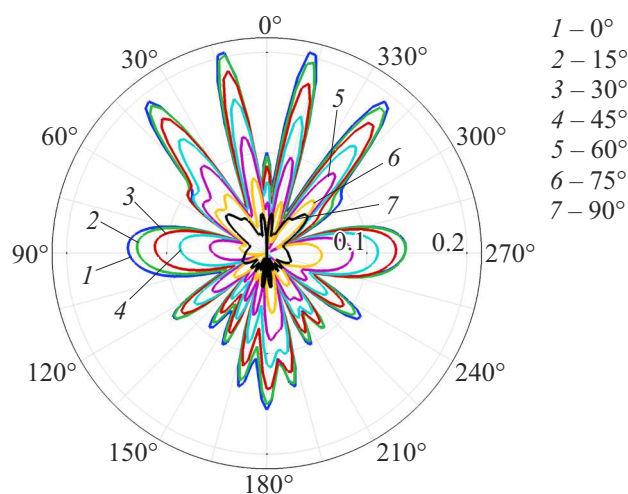
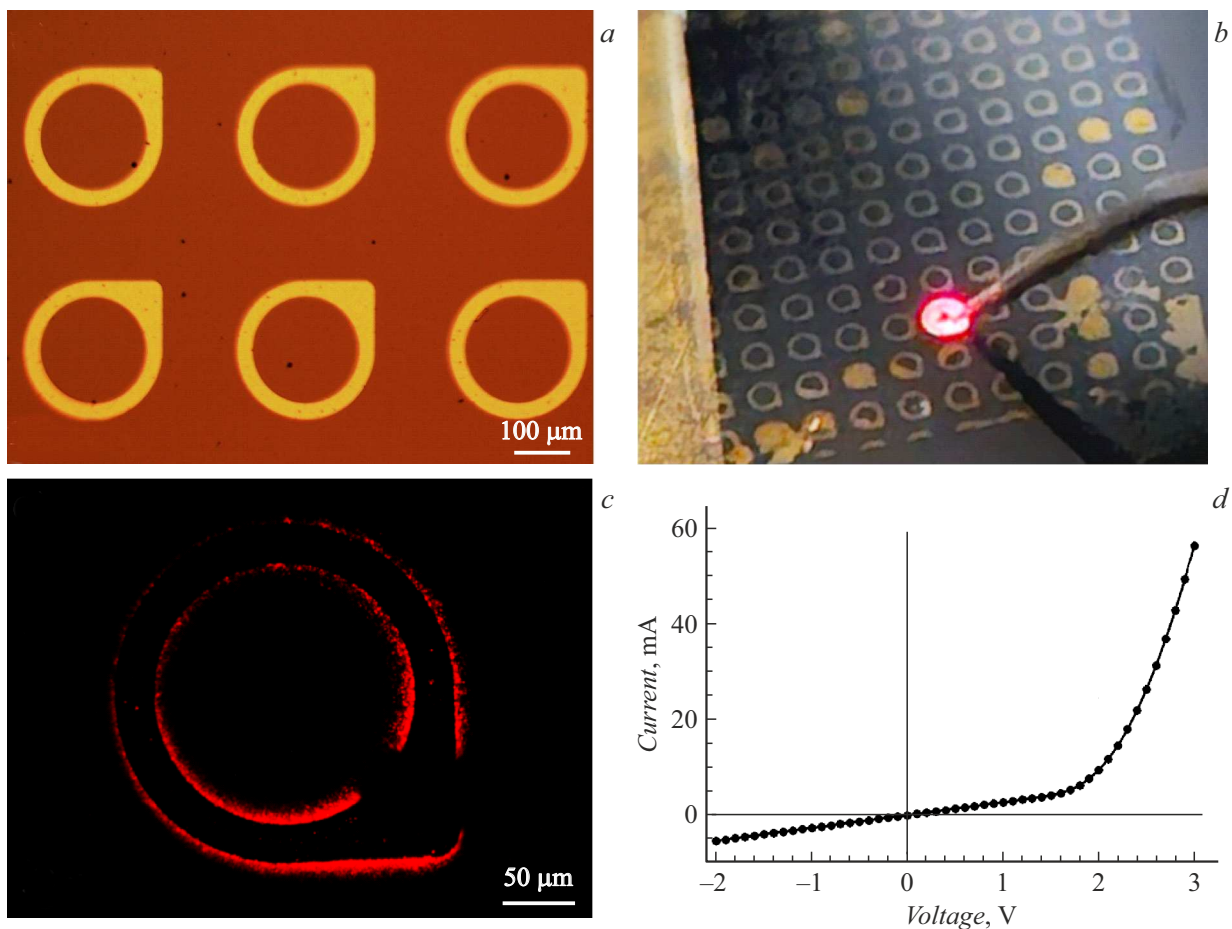


Рис. 3. Зависимость диаграммы направленности излучения светодиодной структурой от ориентации одиночного излучателя (диполя).

определена область растекания тока в  $p-i-n$ -структуре. Также проводились измерения спектров электролюминесценции.

С помощью методов лазерной (Heidelberg DWG 66FS) и проекционной (Suss MJB4) фотолитографии был создан фотосаблон и сформирована фотомаска на поверхности гетероструктуры для нанесения верхнего контакта. Далее с использованием термического напыления металлов в вакууме и взрывной литографии были сформированы кольцевые контактные площадки из Cr/Au (20/150 nm) на поверхности эмиттерного слоя  $p$ -GaP (рис. 4, а). Оптимальная температура вжигания контакта составила 350  $^\circ\text{C}$ . В качестве материала нижнего общего контакта к подложке  $n$ -Si использовался Al. Для нивелирования действия поверхностных состояний на контакт с подложкой проводилась предварительная обработка образца в растворе плавиковой кислоты (3:1) в течение 2 min. В рамках данной процедуры происходило удаление оксидного слоя с тыльной поверхности подложки и ее водородная пассивация, что резко снижало концентрацию поверхностных состояний на время, достаточное для загрузки образца в установку напыления и проведения процедуры откачки, что предотвращает образование новой оксидной пленки.

Проведенные измерения сформированных приборных структур показали электролюминесценцию в красной области спектрального диапазона (рис. 4, b). На оптическом изображении электролюминесценции от одиночного кольца (рис. 4, c) можно отметить область свечения по периферии верхнего контакта. Проведенные результаты позволили оценить размер области растекания тока на уровне 4–8  $\mu\text{m}$ . Полученное значение по порядку величины совпадает с величиной, определенной на этапе численного моделирования, и превосходит ее в 2–4 раза. Причина данного отклонения связана с некоторым различием рассматриваемых геометрий. В экспериментах легированная Si-подложка выступает в качестве общего электрода, что исключает



**Рис. 4.** *a* — оптическое изображение сформированной структуры; *b* — общий вид экспериментального образца с электролюминесцирующим элементом; *c* — изображение электролюминесценции от кольца; *d* — типичный вид вольт-амперной характеристики.

из полного размера области растекания длину протекания тока через нижний эмиттерный слой, что более чем в 2 раза увеличивает проводимость излучающей структуры вне металлического контакта и во столько же раз увеличивает область растекания. С учетом полученных результатов можно утверждать, что большая часть рождаемого света теряется в области под контактом и необходима оптимизация геометрии контактных слоев для обеспечения эффективного вывода излучения. В частности, необходимо создание перфорированного электрода (в соответствии с результатами численного моделирования). Анализ полученной вольт-амперной характеристики (рис. 4, *d*) позволяет оценить напряжение открытия диодной структуры на уровне 1.8–2 В.

Таким образом, в работе продемонстрировано численное моделирование растекания тока в гетероструктуре, которое показало, что при использовании квадратных прозрачных окон шириной  $2\text{ }\mu\text{m}$  в слое металлизации эффективность протекания тока в центре окна падает не более чем на 20 %. Исследование процесса излучения света структурой показало, что большая часть света излучается в телесный угол, отвечающий линейному углу  $90^\circ$ .

Можно отметить высокий уровень согласованности результатов численного моделирования и экспериментальных данных. Проведенные исследования показывают, что для рассматриваемой  $p-i-n$  GaP/GaPNAs/GaP-гетероструктуры при формировании приборных светоизлучающих областей не требуется создания разделительных мез и область эмиссии света в основном ограничивается областью верхнего электрода, что существенно упрощает технологический процесс изготовления светодиодов. Результаты настоящей работы предполагают интеграцию с КМОП-микросхемами, что обеспечит технологическую базу для создания микродисплеев нового поколения на основе объединения  $\text{A}_3\text{B}_5$ - и Si-технологий.

### Финансирование работы

Экспериментальная работа выполнена при финансовой поддержке гранта Санкт-Петербургского научного фонда 23-РБ-02-08. Л.Н. Дворецкая благодарит РНФ (25-72-00195) за финансовую поддержку при выполнении численного расчета.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] G. Roelkens, L. Liu, D. Liang, R. Jones, A. Fang, B. Koch, J. Bowers, *Laser Photon. Rev.*, **6**, 751 (2010). DOI: 10.1002/lpor.200900033
- [2] H. Schmid, M.Borg, K. Moselund, L. Gignac, C.M. Breslin, J. Bruley, D. Cutaia, H. Riel, *Appl. Phys. Lett.*, **106** (23), 233101 (2015). DOI: 10.1063/1.4921962
- [3] D. Chen, Y.C. Chen, G. Zeng, D.W. Zhang, H.L. Lu, *Research*, **6**, 0047 (2023). DOI: 10.34133/research.0047
- [4] U. Koren, S. Margalit, T. Chen, K. Yu, A. Yariv, N. Bar-Chaim, I. Ury, *IEEE J. Quantum Electron.*, **18** (10), 1653 (1982). DOI: 10.1109/JQE.1982.1071397
- [5] F. Zubov, M. Maximov, E. Moiseev, A. Vorobyev, A. Mozharov, Y. Berdnikov, N. Kaluzhnyy, S. Mintairov, M. Kulagina, N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov, *Opt. Lett.*, **46** (16), 3853 (2021). DOI: 10.1364/OL.432920
- [6] U. Gösele, Q.Y. Tong, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **28** (1), 215 (1998). DOI: 10.1146/annurev.matsci.28.1.215
- [7] D. Pasquariello, K. Hjort, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **8** (1), 118 (2002). DOI: 10.1109/2944.991407
- [8] X. Wu, X. Zhu, S. Wang, X. Tang, T. Lang, V. Belyaev, A. Abduev, A. Kazak, C. Lin, Q. Yan, J. Sun, *Materials*, **18** (8), 1783 (2025). DOI: 10.3390/ma18081783
- [9] J.E. Ryu, S. Park, Y. Park, S.W. Ryu, K. Hwang, H.W. Jang, *Adv. Mater.*, **35** (43), 2204947 (2023). DOI: 10.1002/adma.202204947
- [10] R. Kudrawiec, *J. Appl. Phys.*, **105** (6), 063529 (2009). DOI: 10.1063/1.3087781
- [11] I.H. Ho, G.B. Stringfellow, *J. Cryst. Growth*, **178** (1-2), 1 (1997). DOI: 10.1016/S0022-0248(97)00078-X
- [12] A.A. Lazarenko, E.V. Nikitina, A.S. Gudovskikh, A.I. Baranov, M.S. Sobolev, E.V. Pirogov, A.Y. Egorov, *Opt. Laser Technol.*, **129**, 106308 (2020). DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106308
- [13] A.B. Бабичев, В.Ю. Бутко, М.С. Соболев, Е.В. Никитина, Н.В. Крыжановская, А.Ю. Егоров, *ФТП*, **46** (6), 815 (2012). [A.V. Babichev, V.Yu. Butko, M.S. Sobolev, E.V. Nikitina, N.V. Kryzhanovskaya, A.Yu. Egorov, *Semiconductors*, **46** (6), 796 (2012). DOI: 10.1134/S106378261206005X].
- [14] A.A. Lazarenko, E.V. Nikitina, E.V. Pirogov, A.S. Gudovskikh, A.I. Baranov, A.M. Mizerov, M.S. Sobolev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2227** (1), 012021 (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2227/1/012021