

08

## Конструкция источника одиночных фотонов спектрального диапазона $1.3\ \mu\text{m}$ с инжекционной накачкой на основе вертикального микрорезонатора с внутриврезонаторными контактами

© С.А. Блохин<sup>1</sup>, М.А. Бобров<sup>1</sup>, Н.А. Малеев<sup>1</sup>, А.А. Блохин<sup>2</sup>, А.П. Васильев<sup>2</sup>, А.Г. Кузьменков<sup>2</sup>,  
Е.С. Колодезный<sup>3</sup>, V.A. Shchukin<sup>4,5</sup>, N.N. Ledentsov<sup>5</sup>, S. Reitzenstein<sup>4</sup>, В.М. Устинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Technische Universität Berlin, Berlin, Germany

<sup>5</sup> VI Systems GmbH, Berlin, Germany

E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 20 ноября 2020 г.

Принято к публикации 21 ноября 2020 г.

Методами математического моделирования исследованы различные варианты конструкции источников одиночных фотонов с инжекционной накачкой на основе оптических микрорезонаторов с одиночными квантовыми точками. Предложен вариант конструкции источника одиночных фотонов спектрального диапазона  $1.3\ \mu\text{m}$  с внутриврезонаторными контактами и несколькими апертурными слоями, обеспечивающий практически двукратное увеличение эффективности ввода излучения в стандартное одномодовое оптоволокно по сравнению с таковой в случае широко используемой конструкции на основе цилиндрического микростолбикового резонатора (микропила).

**Ключевые слова:** источник одиночных фотонов, микрорезонатор, квантовая точка, эффективность вывода фотонов.

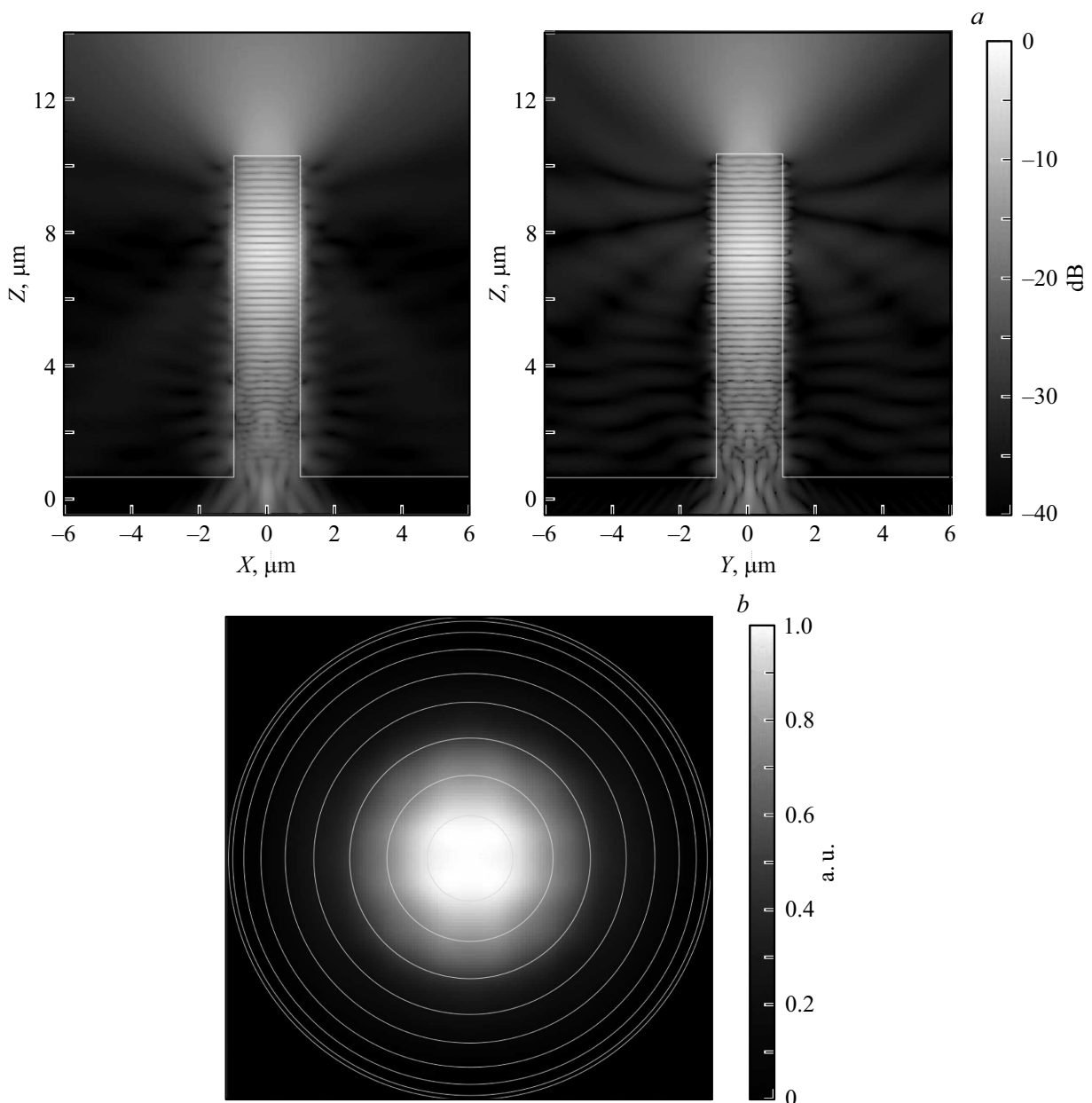
DOI: 10.21883/PJTF.2021.05.50672.18615

В последние годы ведутся активные исследования по созданию источников одиночных фотонов на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ), перспективных для использования в задачах квантовой криптографии и для реализации фотонных кубитов в квантовых вычислительных цепях [1]. Конструкция источника одиночных фотонов (ИОФ) должна обеспечивать не только высокую общую эффективность вывода фотонов из излучателя (англ. photon extraction efficiency, PEE), но и направленность однофотонного излучения для эффективного ввода в одномодовое волокно или интегральный оптический волновод. Конструкции ИОФ на основе вертикального оптического микрорезонатора в отличие от конструкций ИОФ на основе фотонных нанопроволок/наноантенн [2] или радиальных брэгговских решеток [3] позволяют реализовать не только оптическую, но и инжекционную накачку [4]. При использовании КТ InAs/GaAs спектрального диапазона  $900\ \text{nm}$  для ИОФ на основе вертикального оптического микрорезонатора была продемонстрирована общая PEE  $\sim 74\%$  при оптической накачке [5] и общая PEE  $\sim 61\%$  при инжекционной накачке [6]. В то же время экспериментально измеренная эффективность вывода фотонов для ИОФ телекоммуникационного диапазона остается довольно низкой:  $\sim 3.3\%$  в апертурном угле  $NA = 0.45$  для ИОФ на основе вертикального оптического микрорезонатора с КТ InAs/InGaAs/GaAs [7],

$\sim 10\%$  в апертурном угле  $NA = 0.4$  для ИОФ на основе вертикального оптического микрорезонатора с монокристаллической микролинзой и КТ InGaAs/InGaAs/GaAs [8] и  $\sim 36\%$  в апертурном угле  $NA = 0.7$  для ИОФ на основе фотонного кристалла оптического микрорезонатора с КТ InAs/InP [9]. Сравнительно недавно была предложена гибридная конструкция ИОФ спектрального диапазона  $1.3\ \mu\text{m}$  на основе радиальной брэгговской решетки с эффективностью вывода PEE в апертурном угле  $NA = 0.8$  более  $95\%$  [10], однако реализация излучателей с инжекционной накачкой в такой геометрии представляется проблематичной. В связи с этим разработка конструкций эффективных однофотонных излучателей телекоммуникационного диапазона с инжекционной накачкой является актуальной задачей.

В настоящей работе методами математического моделирования исследованы различные варианты конструкции ИОФ с инжекционной накачкой на основе оптических микрорезонаторов и предложен вариант, обеспечивающий практически двукратное увеличение эффективности ввода излучения в стандартное одномодовое оптоволокно.

Для детального исследования различных типов геометрий микрорезонаторов использовался трехмерный (3D) метод конечных разностей во временной области (FDTD). Для упрощения расчетов поглощение на свободных носителях в легированных слоях не учитыва-



**Рис. 1.** Микрорезонатор типа I. *a* — распределение электромагнитного поля фундаментальной моды в плоскостях  $X-Z$  и  $Y-Z$ , сплошная линия описывает контур микростолбика; *b* — угловое распределение интенсивности излучения в дальнем поле, сетка концентрических кругов построена с шагом  $10^\circ$ .

лось. Одиночная квантовая точка (излучающий элемент) аппроксимировалась диполем с линейной поляризацией вдоль оси  $X$ , помещенным в центр активной области микрорезонатора для возбуждения электромагнитных колебаний. Для оценки долей оптического излучения, выходящего вверх из микрорезонатора (РЕЕ), уходящего вниз из микрорезонатора и выходящего через боковую поверхность микрорезонатора, вычислялся поток энергии, проходящий через соответствующие плоскости зондового бокса, окружающего микрорезонатор, с последующей нормировкой на полный поток энергии, проходящий через зондовый бокс, окружающий диполь [11].

Эффективность сбора фотонов (англ. photon collection efficiency, PCE) в заданном апертурном угле оценивалась как отношение мощности, излучаемой диполем в дальнем поле в заданном апертурном угле, к общей мощности, излучаемой в верхнюю полусферу. Величина РЕЕ в заданном апертурном угле рассчитывалась как произведение общей РЕЕ на величину PCE в заданном апертурном угле.

На рис. 1 приведены результаты расчетов для классической конструкции цилиндрического микростолбикового резонатора (микропила) диаметром  $2\ \mu\text{m}$  на основе монолитной структуры спектрального диапазона  $1.3\ \mu\text{m}$ ,

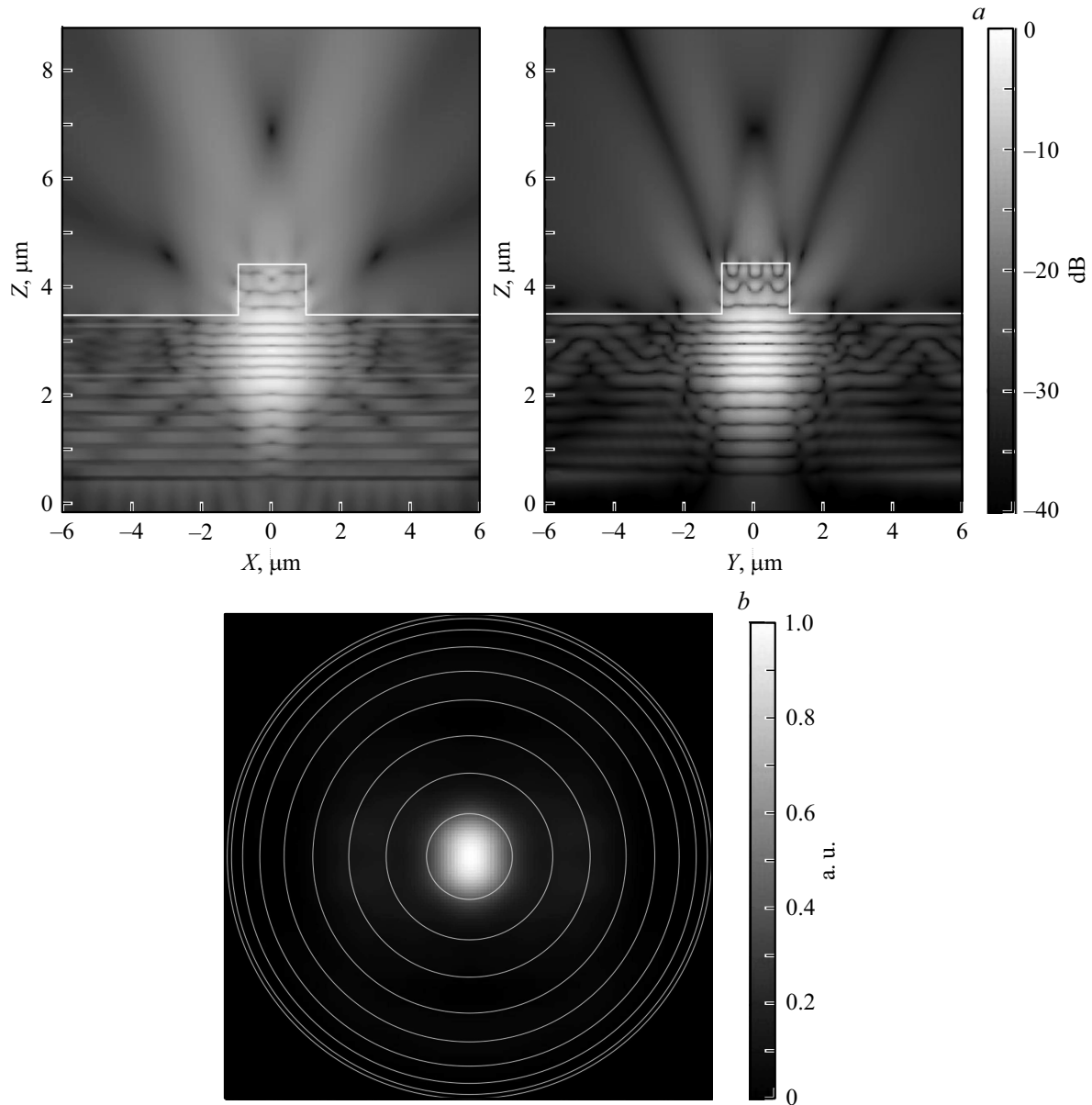
содержащей нижний распределенный брэгговский отражатель (РБО)  $n$ -типа на основе 30 пар четвертьволновых слоев GaAs/AlAs,  $1\lambda$ -резонатор с размещенной в центре одиночной КТ и верхний РБО  $p$ -типа на основе 13 пар четвертьволновых слоев GaAs/AlAs (далее микрорезонатор типа I). Следует отметить, что параметры РБО и диаметр микрорезонатора выбраны так, чтобы обеспечить максимальную эффективность вывода излучения при сохранении высокой добротности микрорезонатора [6,11]. Благодаря сильному поперечному ограничению электромагнитное поле фундаментальной моды эффективно локализовано внутри микрорезонатора типа I, а доля излучения, выходящего через его боковую поверхность, составляет всего 6% (рис. 1, *a*). Вследствие рассеяния света на пьедестале цилиндрического микрорезонатора доля излучения, уходящего в подложку, достигает 4%. Согласно результатам моделирования дальнего поля (рис. 1, *b*), эффективность РСЕ в апертурном угле  $NA = 0.7$  достигает 92%, что позволяет оценить эффективность РСЕ в апертурном угле  $NA = 0.7$  на уровне 84%. Благодаря малой длине резонатора фактор Парселла достигает 14 при добротности микрорезонатора  $\sim 2400$ . В то же время для микрорезонаторов типа I характерна широкая диаграмма направленности излучения: эффективность РСЕ в пределах апертурного угла  $NA = 0.12$  составляет всего  $\sim 6\%$ , что ограничивает эффективность ввода излучения такого источника в стандартное одномодовое оптоволокно SMF28 на уровне  $\sim 5\%$ . Помимо отмеченного недостатка при разработке ИОФ телекоммуникационного диапазона ( $1.3/1.55 \mu\text{m}$ ) с инжекционной накачкой нужно учитывать резкий рост поглощения света на свободных носителях, особенно в слоях  $p$ -типа [12], и необходимость использования в проводящих РБО градиентных интерфейсов с повышенным уровнем легирования на гетерограницах четвертьволновых слоев AlGaAs разного состава. Указанные факторы неминуемо приводят к падению отражательной способности РБО, уменьшению добротности микрорезонатора и падению фактора Парселла, что снижает эффективность излучения инжекционных ИОФ на основе микрорезонатора типа I.

Одним из относительно простых альтернативных решений является применение вертикального микрорезонатора с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои  $n$ - и  $p$ -типа (далее ВРК-слои), имеющие модулированные профили легирования для снижения оптических потерь на свободных носителях. Аналогичный подход эффективно используется при создании длинноволновых вертикально-излучающих лазеров [1]. Следует отметить, что применение ВРК-слоев требует увеличения общей толщины резонатора с  $1\lambda$  минимум до  $2\lambda$ , поскольку необходимо не только прецизионно вскрыть контактные слои при формировании меза-структуры, но и обеспечить эффективное растекание тока по площади резонатора. Следует отметить, что микростолбик теперь необходимо формировать только в верхнем РБО (т.е. глубина травления микростолбика

равна суммарной толщине верхнего РБО), поскольку в противном случае невозможно реализовать инжекцию носителей через ВРК-слои, а для ограничения области инжекции носителей заряда в структуру вводится оксидная токовая апертура. Однако для конструкции микрорезонатора с ВРК-слоями и полупроводниковыми РБО GaAs/AlAs наблюдается резкое падение добротности и фактора Парселла в 3.5–4 раза вследствие более слабого латерального оптического ограничения по сравнению с микрорезонатором типа I, а также существенное снижение эффективности РСЕ в апертурном угле  $NA = 0.7$  до уровня 37–40%, обусловленное ростом утечки излучения через боковую поверхность и в сторону подложки, что делает данный вариант конструкции микрорезонатора малоперспективным.

Чтобы подавить утечку излучения из резонатора в сторону подложки, уменьшить долю излучения через боковую поверхность микрорезонатора и частично перенаправить излучение из резонатора вверх, необходимо увеличить диапазон углов падения света, в котором для обоих зеркал наблюдается полоса высокого отражения. Высококонтрастные РБО, например, на основе четвертьволновых слоев GaAs/AlGaO, Si/ $\alpha$ -Si или CaF<sub>2</sub>/ $\alpha$ -Si обеспечивают более эффективное отражение света практически во всем диапазоне углов падения, чем РБО GaAs/AlAs, а также меньшую глубину проникновения электромагнитного поля в зеркала. Внедрение в микрорезонатор толстых ( $\sim 200 \text{ nm}$ ) оксидных апертур, расположенных вблизи пучностей электромагнитного поля, позволяет существенно перераспределить электромагнитное поле оптической моды и усилить волноводный эффект, однако такие апертуры вносят высокие механические напряжения. Тонкие ( $\sim 20 \text{ nm}$ ) оксидные апертуры вносят меньше упругих напряжений, возникающих за счет линейного сжатия апертурного слоя после селективного окисления AlGaAs, что повышает механическую стабильность микрорезонатора, однако слабо влияют на электромагнитное поле. Компромисса можно достичь при использовании нескольких оксидных апертур с толщиной  $\sim 60 \text{ nm}$ . Предложенная конструкция ИОФ может быть реализована в рамках планарной технологии изготовления вертикально-излучающих лазеров в геометрии с внутрирезонаторными контактами и непроводящими РБО [13,14].

На рис. 2 приведены результаты расчетов для предлагаемой конструкции микрорезонатора спектрального диапазона  $1.3 \mu\text{m}$  на основе гибридной структуры, содержащей  $3\lambda$ -резонатор с ВРК-слоями, нижний РБО на основе шести пар четвертьволновых слоев CaF<sub>2</sub>/ $\alpha$ -Si и верхний РБО на основе трех пар четвертьволновых слоев CaF<sub>2</sub>/ $\alpha$ -Si (далее микрорезонатор типа II). Диэлектрические РБО спроектированы так, чтобы коэффициенты отражения в центре полосы высокого отражения РБО были идентичны коэффициентам отражения полупроводниковых РБО, использованных в микрорезонаторе типа I. В конструкцию  $3\lambda$ -резонатора введены четыре оксидные апертуры толщиной  $60 \text{ nm}$  и диаметром  $2 \mu\text{m}$ ,



**Рис. 2.** Микрорезонатор типа II. *a* — распределение электромагнитного поля фундаментальной моды в плоскостях  $X-Z$  и  $Y-Z$ , сплошная линия описывает контур микростолбика; *b* — угловое распределение интенсивности излучения в дальнем поле, сетка концентрических кругов построена с шагом  $10^\circ$ .

расположенные вблизи пучностей электромагнитного поля. Применение четырех оксидных апертур позволяет усилить латеральное ограничение и радикально увеличить добротность микрорезонатора типа II до 2250. В совокупности с меньшей глубиной проникновения поля в диэлектрические РБО это ведет к повышению фактора Парселла до 12,5, несмотря на увеличение длины резонатора до  $3\lambda$ . Следует отметить, что по указанным характеристикам микрорезонатор типа II сопоставим с классическим микрорезонатором типа I. При этом высококонтрастные РБО позволяют уменьшить долю излучения через боковую поверхность микрорезонатора до 24% и утечку излучения из резонатора вниз до  $\sim 1\%$  (рис. 2, *a*). Согласно результатам моделирования, при-

веденным на рис. 2, *b*, эффективность РСЕ в апертурном угле  $NA = 0.7$  превышает 89%. При этом эффективность РЕЕ в апертурном угле  $NA = 0.7$  составляет 67%, что ниже соответствующего параметра для микрорезонатора типа I. Однако для предложенной конструкции наблюдается значительное заужение диаграммы направленности излучения, что позволяет поднять эффективность РЕЕ в апертурном угле  $NA = 0.12$  практически в 2,5 раза (до уровня  $\sim 13\%$ ) по сравнению с эффективностью в случае микрорезонатора типа I, несмотря на меньшую величину общей эффективности вывода фотонов.

Таким образом, предложенная конструкция микрорезонатора типа II обеспечивает практически двукратное увеличение эффективности ввода излучения ИОФ в

стандартное одномодовое оптоволокно и потенциально позволяет реализовать инжекционную схему накачки без ухудшения основных оптических характеристик.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) совместно с Немецким научно-исследовательским сообществом (ННИО) в рамках научного проекта РФФИ № 20-52-12006 и проекта ННИО Re2974/24-1.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] R. Michalzik, *VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers* (Springer-Verlag, Berlin, 2013). DOI: 10.1007/978-3-642-24986-0
- [2] H. Mäntynen, N. Anttu, Z. Sun, H. Lipsanen, *Nanophotonics*, **8** (5), 747 (2019). DOI: 10.1515/nanoph-2019-0007
- [3] M.I. Davanco, M.T. Rakher, D. Schuh, A. Badolato, K. Srinivasan, *Appl. Phys. Lett.*, **99** (4), 041102 (2011). DOI: 10.1063/1.3615051
- [4] S. Reitzenstein, A. Forchel, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43** (3), 033001 (2010). DOI: 0.1088/0022-3727/43/3/033001
- [5] S. Unsleber, Y.-M. He, S. Gerhardt, S. Maier, C.-Y. Lu, J.-W. Pan, N. Gregersen, M. Kamp, C. Schneider, S. Höfling, *Opt. Express*, **24** (8), 8539 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.008539
- [6] A. Schlehahn, A. Thoma, P. Munnely, M. Kamp, S. Höfling, T. Heindel, C. Schneider, S. Reitzenstein, *APL Photon.*, **1** (1), 011301 (2016). DOI: 10.1063/1.4939831
- [7] Z.-S. Chen, B. Ma, X.-J. Shang, H.-Q. Ni, J.-L. Wang, Z.-C. Niu, *Nanoscale Res. Lett.*, **12**, 378 (2017). DOI: 10.1186/s11671-017-2153-2
- [8] N. Srocka, A. Musiał, P.-I. Schneider, P. Mrowiński, P. Holewa, S. Burger, D. Quandt, A. Strittmatter, S. Rodt, S. Reitzenstein, G. Sek, *AIP Adv.*, **8** (8), 085205 (2018). DOI: 10.1063/1.5038137
- [9] J.-H. Kim, T. Cai, C.J.K. Richardson, R.P. Leavitt, E. Waks, *Optica*, **3** (6), 577 (2016). DOI: 10.1364/OPTICA.3.000577
- [10] L. Rickert, T. Kupko, S. Rodt, S. Reitzenstein, T. Heindel, *Opt. Express*, **27** (25), 36824 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.036824
- [11] Y.-L.D. Ho, T. Cao, P.S. Ivanov, M.J. Cryan, I.J. Craddock, C.J. Railton, J.G. Rarity, *IEEE J. Quant. Electron.*, **43** (6), 462 (2007). DOI: 10.1109/JQE.2007.897905
- [12] C. Asplund, S. Mogg, G. Plaine, F. Salomonsson, N. Chitica, *J. Appl. Phys.*, **90** (2), 794 (2001). DOI: 10.1063/1.1376407
- [13] Н.А. Малеев, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, С.С. Михрин, А.Г. Кузьменков, Д.А. Бедарев, Ю.М. Задранов, М.М. Кулагина, Ю.М. Шерняков, А.С. Шуленков, В.А. Быковский, Ю.М. Соловьев, С. Möller, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, *ФТП*, **37** (10), 1265 (2003). [Пер. версия: 10.1134/1.1619524].
- [14] Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, М.М. Кулагина, Ю.М. Задранов, А.П. Васильев, С.А. Блохин, А.С. Шуленков, С.И. Трошков, А.Г. Гладышев, А.М. Надточий, М.М. Павлов, М.А. Бобров, Д.Е. Назарук, В.М. Устинов, *ФТП*, **47** (7), 985 (2013). [Пер. версия: 10.1134/S1063782613070166].