

07;09

Вертикально-излучающий лазер спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ с туннельным переходом на основе слоев $n^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$

© С.А. Блохин¹, М.А. Бобров¹, Н.А. Малеев¹, А.А. Блохин², А.Г. Кузьменков², А.П. Васильев², С.С. Рочас³, А.Г. Гладышев^{3,4}, А.В. Бабичев^{3,4}, И.И. Новиков³, Л.Я. Карачинский^{3,4}, Д.В. Денисов⁵, К.О. Воропаев^{6,7}, А.С. Ионон⁷, А.Ю. Егоров³, В.М. Устинов²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия

⁷ АО „ОКБ-Планета“, Великий Новгород, Россия

E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 22 мая 2020 г.

В окончательной редакции 22 мая 2020 г.

Принято к публикации 25 мая 2020 г.

Предложена и апробирована конструкция туннельного перехода (ТП) на основе слоев $n^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$ для вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ) спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$, реализованных по технологии спекания пластины с оптическим резонатором InAlGaAsP/InP и пластин с распределенными брэгговскими отражателями AlGaAs/GaAs . Наличие слоев InGaAs , устойчивых к окислению, позволяет использовать молекулярно-пучковую эпитаксию на всех этапах технологии изготовления ВИЛ, в том числе для зарощивания поверхностного рельефа в слое ТП. При этом благодаря эффекту Бурштейна–Мосса в $n^{++}\text{-InGaAs}$ и минимизации толщины слоя $p^{++}\text{-InGaAs}$ удалось избежать роста внутренних оптических потерь. В результате характеристики изготовленных приборов сравнимы с характеристиками ВИЛ, использующих ТП $n^{++}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$ и имеющих аналогичный уровень потерь на вывод излучения.

Ключевые слова: вертикально-излучающий лазер, спекание пластин, туннельный переход.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.17.49888.18393

Вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ, англ. vertical-cavity surface-emitting laser) спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ являются перспективными источниками излучения для информационно-телекоммуникационных систем связи и различных устройств радиофотоники. Применение классической конструкции с инжекцией носителей через легированные распределенные брэгговские отражатели (РБО, англ. distributed Bragg reflector), хорошо зарекомендовавшей себя в ВИЛ InAlGaAs/GaAs ближнего ИК-диапазона [1], для практической реализации ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ на подложках InP невозможно из-за необходимости использовать большое число пар четвертьволновых слоев с низким оптическим контрастом, низкой теплопроводностью и резким ростом потерь на свободных носителях. Частичное решение проблемы возможно за счет использования внутрирезонаторных контактных слоев InP n -типа и концепции туннельного перехода (ТП, англ. tunnel junction). Для преодоления ряда фундаментальных ограничений, присущих монолитной (выращенной в едином эпитаксиальном процессе) конструкции ВИЛ InAlGaAsP/InP [2], были предложены варианты гибридной конструкции с инжекцией

носителей через внутрирезонаторные контактные слои в сочетании с РБО на основе других систем материалов, обладающих одновременно высокой теплопроводностью и отражательной способностью [3–6]. Для обеспечения эффективного токового и оптического ограничения широко используется концепция зарощенного туннельного перехода (ЗТП, англ. buried tunnel junction) [5], когда в слое ТП путем травления n^{++} -слоев до p^{++} -слоев формируют поверхностный рельеф в виде меза-структур, а затем выполняют эпитаксиальное зарощивание верхним внутрирезонаторным контактным слоем $n\text{-InP}$. При этом в большинстве работ для зарощивания туннельного перехода используют метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС, англ. metalorganic chemical vapour deposition), поскольку в технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ, англ. molecular beam epitaxy) практически невозможно эффективно удалить окисел с поверхности InAlGaAs путем отжига образцов в камере МПЭ-установки при стандартных температурах, а обеспечить эффективное удаление естественного окисла с помощью предварительной обработки поверхности InAlGaAs не удастся, поскольку любая экспозиция

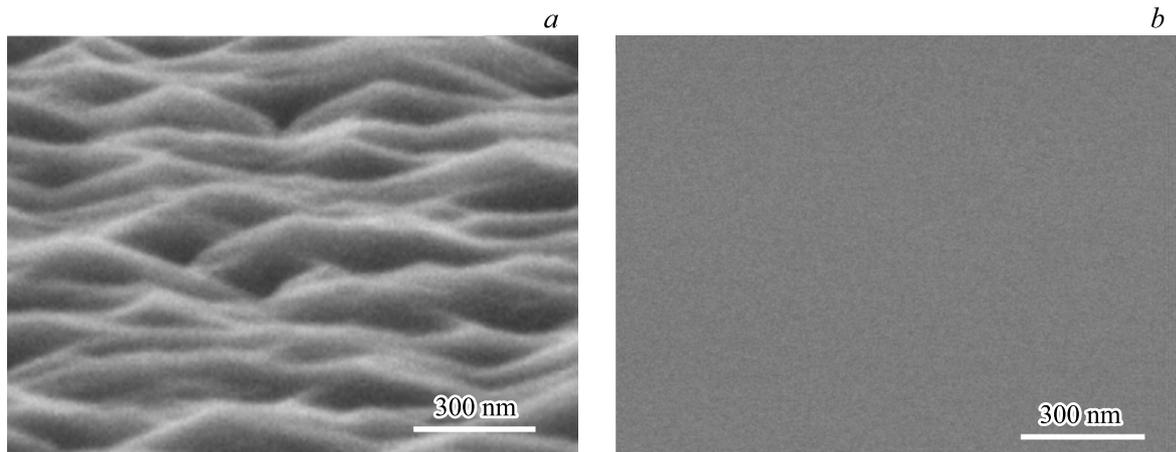


Рис. 1. Изображения поверхностей InAlGaAs (a) и InGaAs (b) после МПЭ-процесса зарощивания слоем InP толщиной 100 nm, полученные с помощью растровой электронной микроскопии.

образца на атмосферу ведет к быстрому образованию нового оксидного слоя ввиду высокой химической активности Al-содержащих слоев. В результате без применения *in situ* систем подчистки поверхности пластин в высоковакуумной системе в рамках метода классической МПЭ с твердотельными источниками не удается реализовать двумерное зарощивание вытравленных мезоструктур ТП верхним внутрирезонаторным контактным слоем n -InP (рис. 1, a). В то же время для слоев InGaAs сочетание химической подчистки поверхности в травителе $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ и последующего отжига в камере МПЭ-установки в диапазоне температур $520\text{--}530^\circ\text{C}$ под потоком элементов V группы позволяет эффективно удалить окисел с поверхности и обеспечить двумерный рост слоя n -InP с низкой шероховатостью поверхности (типичное среднеквадратичное отклонение высот неровностей поверхности $R_q < 1\text{ nm}$) без увеличения плотности дефектов, как показано на рис. 1, b.

В связи с этим актуальной задачей является разработка конструкции длинноволновых ВИЛ, пригодной для реализации зарощивания туннельного перехода методом МПЭ без существенного изменения уровня внутренних оптических потерь.

Классическая конструкция ТП для применения в ВИЛ спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$ основана на использовании сильнолегированных слоев n^{++} -InGaAs и p^{++} -InGaAs. С помощью δ -легирования сопротивление можно снизить до уровня $3 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{cm}^2$ [7], однако ключевым недостатком такой конструкции являются высокие внутренние потери за счет поглощения в узкозонных слоях InGaAs и, как следствие, относительно высокие пороговые токи и низкая дифференциальная эффективность [4]. Известно, что собственным поглощением света в решеточно-согласованном n^{++} -InGaAs вблизи длины волны $1.55\ \mu\text{m}$ можно пренебречь из-за заметного коротковолнового сдвига края межзонного поглощения света (эффект Бурштейна–Мосса). Для устранения поглощения в InGaAs p -типа было предложено заменить

p^{++} -InGaAs на p^{++} -InAlGaAs с шириной запрещенной зоны $\sim 0.83\ \text{eV}$, что позволяет снизить уровень оптических потерь и сохранить небольшую высоту потенциального барьера для эффективного туннелирования носителей и минимизации сопротивления [8]. Такой ТП n^{++} -InGaAs/ p^{++} -InAlGaAs был успешно апробирован в ВИЛ спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$ с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои в сочетании с высококонтрастными диэлектрическими РБО [6,9]. Для дальнейшего снижения уровня внутренних потерь, связанных с поглощением в слоях ТП, было предложено заменить слой n^{++} -InGaAs на оптически прозрачный слой n^{++} -InAlGaAs. Такой ТП n^{++} / p^{++} -InAlGaAs был успешно апробирован в ВИЛ спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$ с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои в сочетании с РБО AlGaAs [10,11]. Следует отметить, что для зарощивания мезоструктуры в туннельном переходе во всех случаях использовалась технология ГФЭ МОС.

Эффективное использование технологии МПЭ для зарощивания поверхностного рельефа, формируемого при травлении мезоструктуры в ТП, при сохранении низких оптических потерь оказывается возможным при применении модифицированной конструкции ТП n^{++} -InGaAs/ p^{++} -InGaAs/ p^{++} -InAlGaAs. Формирование поверхностного рельефа в таком туннельном переходе осуществляется путем травления слоя n^{++} -InGaAs до тонкого слоя p^{++} -InGaAs, что обеспечивает предотвращение окисления поверхности, характерного для Al-содержащих слоев. Экспериментальная апробация предложенной конструкции ТП была проведена для ВИЛ спектрального диапазона $1.55\ \mu\text{m}$ в геометрии с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои n -типа в сочетании с РБО AlGaAs и токовым оптическим ограничением на основе ЗТП (рис. 2). Для формирования данного ВИЛ была применена технология спекания пластин (от англ. wafer fusion) [12]. Под воздействием высокого давления при

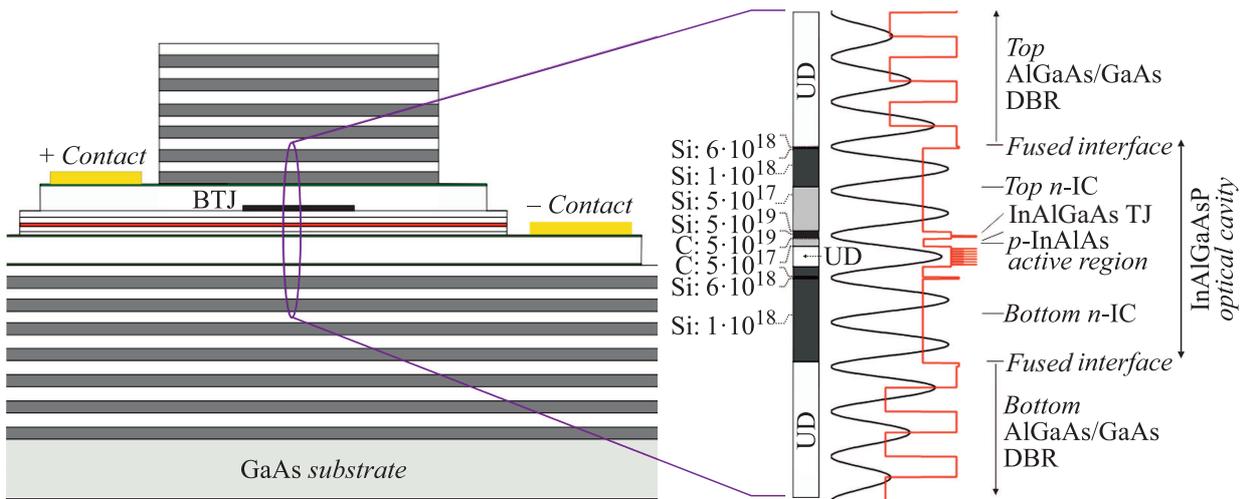


Рис. 2. Схематическое изображение поперечного сечения СП-ВИЛ и распределение интенсивности электромагнитного поля вдоль профиля показателя преломления в области микрорезонатора. DBR — распределенный брэгговский отражатель, IC — внутрирезонаторный контакт, TJ — туннельный переход, BTJ — заращенный туннельный переход.

повышенной температуре за счет взаимной диффузии происходит соединение пластины гетероструктуры InAlGaAsP оптического резонатора, выращенной на подложке InP, с двумя пластинами гетероструктур верхнего (20.5 пар GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As) и нижнего (35 пар GaAs/Al_{0.95}Ga_{0.05}As) РБО, выращенных на подложках GaAs (далее СП-ВИЛ). Процесс формирования гетероструктуры оптического резонатора InAlGaAsP общей толщиной 2.5λ включает в себя две ростовые и одну постростовую операции. Сначала на подложке InP синтезируются нижний внутрирезонаторный контактный слой n-InP толщиной 1λ с сильнолегированным контактным слоем n-InGaAsP, активная область на основе напряженных квантовых ям In_{0.74}Ga_{0.26}As, тонкий эмиттер p-In_{0.52}Al_{0.48}As и ТП n⁺⁺-In_{0.53}Ga_{0.47}As/p⁺⁺-In_{0.53}Ga_{0.47}As/p⁺⁺-In_{0.53}Al_{0.16}Ga_{0.31}As. Затем с помощью контактной фотолитографии формируется поверхностный рельеф путем локального травления n⁺⁺-In_{0.53}Ga_{0.47}As до p⁺⁺-In_{0.53}Ga_{0.47}As и после химической подчистки поверхности выполняется заращивание верхним внутрирезонаторным контактным слоем n-InP толщиной 1λ и сильнолегированным контактным слоем n-InGaAsP. Для всех ростовых операций использовался метод МПЭ. На рис. 2 приведены продольные распределения электромагнитного поля стоячей волны фундаментальной моды резонатора, профили показателя преломления и уровня легирования в исследуемом СП-ВИЛ спектрального диапазона 1.55 мкм. Активная область расположена в максимуме электромагнитного поля оптической моды резонатора, тогда как туннельный переход, сильнолегированные контактные слои и границы спекания — в ее минимумах.

На рис. 3 приведены вольт- и ватт-амперные характеристики СП-ВИЛ спектрального диапазона 1.55 мкм с ТП n⁺⁺-InGaAs/p⁺⁺-InGaAs/p⁺⁺-InAlGaAs, измерен-

ные в непрерывном режиме работы. Приборы с латеральным размером ЗТП мезы 8 μm при комнатной температуре демонстрируют эффективную лазерную генерацию через фундаментальную моду (так называемый одномодовый режим) с пороговым током менее 2 mA и дифференциальной эффективностью ~ 0.46 W/A. Увеличение температуры до 90°C ведет к росту порогового тока до 7.7 mA и падению выходной оптической мощности с 6 до 1.2 mW. В то же время при аналогичном уровне потерь на вывод излучения СП-ВИЛ с ТП n⁺⁺/p⁺⁺-InAlGaAs и латеральным размером ЗТП мезы 7 μm при комнатной температуре демонстрируют одномодовую лазерную генерацию с пороговым током менее 1.5 mA и дифференциальной эффективностью ~ 0.48 W/A [11]. Следует отметить, что для СП-ВИЛ с ТП n⁺⁺/p⁺⁺-InAlGaAs нами были продемонстрированы рекордно низкие внутренние оптические потери ~ 6.5 cm⁻¹ при эффективности токовой инжекции более 90% [13]. Принимая во внимание идентичность конструкции РБО и оптического резонатора для двух типов исследуемых ВИЛ, можно сделать оценку сверху внутренних оптических потерь для СП-ВИЛ с ТП n⁺⁺-InGaAs/p⁺⁺-InGaAs/p⁺⁺-InAlGaAs на уровне 10 cm⁻¹, что коррелирует с опубликованными значениями для СП-ВИЛ с ТП n⁺⁺/p⁺⁺-InAlGaAs, полученных с использованием технологии ГФЭ МОС [10], и ВИЛ гибридной конструкции с ТП n⁺⁺-InGaAs/p⁺⁺-InAlGaAs и диэлектрическими зеркалами [11]. Относительно невысокая температурная стабильность характеристик исследуемых СП-ВИЛ с ТП n⁺⁺-InGaAs/p⁺⁺-InGaAs/p⁺⁺-InAlGaAs, по-видимому, обусловлена меньшим (на 20 nm) спектральным рассогласованием резонансной длины волны микрорезонатора относительно пика усиления активной области и/или более слабым волноводным эффектом ЗТП (глубина травления ТП

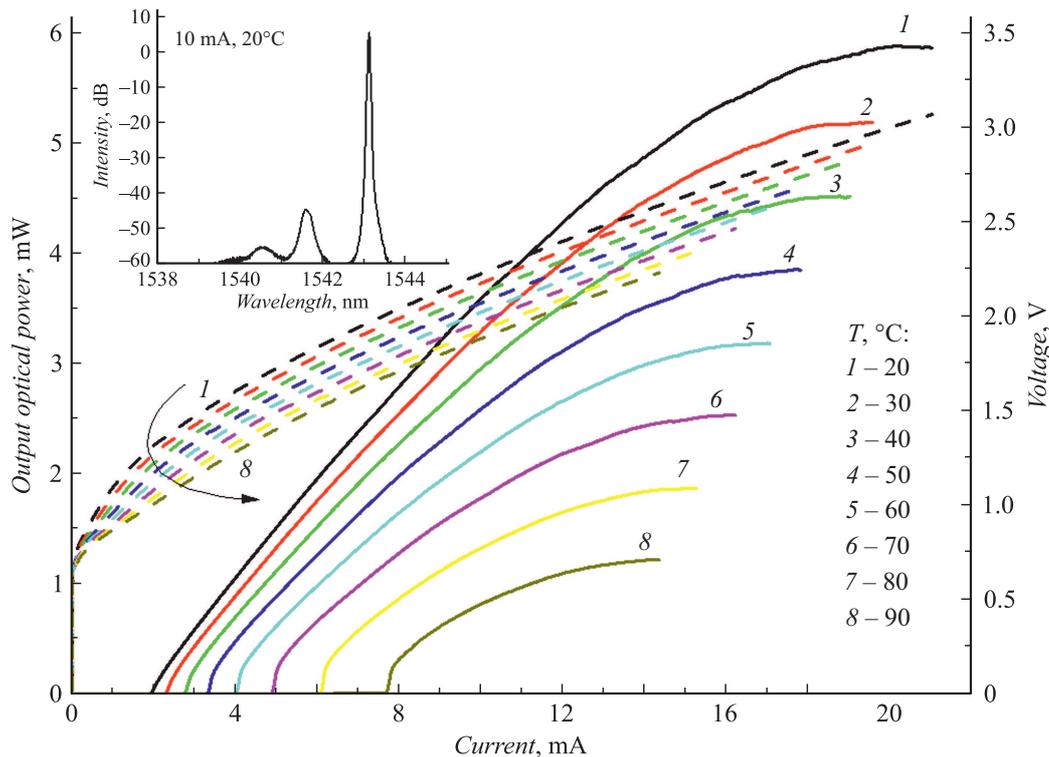


Рис. 3. Ватт-амперные (сплошные линии) и вольт-амперные (штриховые линии) характеристики СП-ВИЛ спектрального диапазона $1.55 \mu\text{m}$ с размером ЗТП мезы $8 \mu\text{m}$ при различных температурах. На вставке приведен типичный спектр генерации при 10 mA и 20°C .

меньше на 10 nm) по сравнению с характеристиками СП-ВИЛ с ТП $n^{++}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$, имеющих аналогичную конструкцию микрорезонатора. Возможность улучшения температурной стабильности требует дополнительных исследований.

Таким образом, предложенная конструкция ТП $n^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$ позволяет воспроизводить изготавливать гетероструктуры для длинноволновых ВИЛ методом МПЭ из твердотельных источников без необходимости применения технологии ГФЭ МОС для заравнивания поверхностного рельефа, сформированного в туннельном переходе. В случае использования ТП $n^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InGaAs}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$ удается избежать заметного повышения уровня внутренних оптических потерь по сравнению с конструкцией с ТП $n^{++}/p^{++}\text{-InAlGaAs}$ благодаря низкому поглощению в слое $n^{++}\text{-InGaAs}$, обусловленному эффектом Бурштейна–Мосса, и использованию малой толщины слоя $p^{++}\text{-InGaAs}$. Изготовленные длинноволновые ВИЛ с двумя типами конструкции ТП при аналогичном уровне потерь на вывод излучения демонстрируют практически идентичные статические характеристики.

Благодарности

Авторы выражают благодарность С.И. Трошковой за проведение исследований образцов методом растровой электронной микроскопии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Michalzick R. VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 560 p.
- [2] Park M.-R., Kwon O.-K., Han W.-S., Lee K.-H., Park S.-J., Yoo B.-S. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2006. V. 18. N 16. P. 1717–1719.
- [3] Karim A., Abraham P., Lofgreen D., Chiu Y.J., Piprek J., Bowers J. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. N 18. P. 2632–2633.
- [4] Syrbu A., Mircea A., Mereuta A., Caliman A., Berseth C.-A., Suruceanu G., Iakovlev V., Achtenhagen M., Rudra A., Kapon E. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2004. V. 16. N 5. P. 1230–1232.
- [5] Ortsiefer M., Shau R., Böhm G., Köhler F., Amann M.-C. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. N 16. P. 2179–2181.
- [6] Hofmann W. // IEEE Photon. J. 2010. V. 2. N 5. P. 802–815.
- [7] Arzberger M., Lohner M., Böhm G., Amann M.-C. // Electron. Lett. 2000. V. 36. N 1. P. 87–88.
- [8] Ortsiefer M., Shau R., Böhm G., Köhler F., Abstreiter G., Amann M.-C. // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. V. 39. Pt 1. N 4A. P. 1727–1729.
- [9] Spiga S., Soenen W., Andrejew A., Schoke D.M., Yin X., Bauwelinck J., Böm G., Amann M.C. // IEEE J. Lightwave Technol. 2017. V. 35. N 4. P. 727–733.

- [10] *Ellafi D., Iakovlev V., Sirbu A., Suruceanu G., Mickovic Z., Caliman A., Mereuta A., Kapon E.* // Opt. Express. 2014. V. 22. N 26. P. 32180.
- [11] *Babichev A.V., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Gladyshev A.G., Blokhin S.A., Mikhailov S., Iakovlev V., Sirbu A., Stepniak G., Chorchos L., Turkiewicz J.P., Voropaev K.O., Ionov A.S., Agustin M., Ledentsov N.N., Egorov A.Y.* // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2017. V. 53. N 6. P. 2400808.
- [12] *Kapon E., Sirbu A.* // Nature Photon. 2009. V. 3. N 1. P. 27–29.
- [13] *Блохин С.А., Бобров М.А., Блохин А.А., Кузьменков А.Г., Малеев Н.А., Устинов В.М., Колодезный Е.С., Рочас С.С., Бабичев А.В., Новиков И.И., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Денисов Д.В., Ворopaев К.О., Ионо в А.С., Егоров А.Ю.* // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. В. 1. С. 145–149.