

07.2

Гетероструктуры квантово-каскадных лазеров с неселективным заращиванием методом газофазной эпитаксии

© А.В. Бабичев¹, А.Г. Гладышев², Д.В. Денисов³, В.В. Дюделев¹, Д.А. Михайлов¹, С.О. Слипенченко¹, А.В. Лютецкий¹, Л.Я. Карачинский^{1,2,4}, И.И. Новиков^{1,2,4}, А.Ю. Андреев⁵, И.В. Яроцкая⁵, К.А. Подгаецкий⁵, А.А. Мармалюк⁵, А.А. Падалица⁵, М.А. Ладугин⁵, Н.А. Пихтин¹, Г.С. Соколовский¹, А.Ю. Егоров⁴

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

² ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁵ АО „НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия

E-mail: a.babichev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 сентября 2021 г.

В окончательной редакции 23 сентября 2021 г.

Принято к публикации 24 сентября 2021 г.

Показана возможность создания гетероструктур квантово-каскадных лазеров спектрального диапазона $4.6\ \mu\text{m}$ методом молекулярно-пучковой эпитаксии с неселективным заращиванием методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Активная область лазера была сформирована на основе гетеропары твердых растворов $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$. Слои фосфида индия выполняли функцию обкладок волновода. Результаты исследования карт поверхностных дефектов гетероструктур квантово-каскадных лазеров, рентгеноструктурного анализа позволяют сделать вывод о высоком структурном качестве гетероструктур и низкой оценочной величине среднеквадратичной поверхностной шероховатости, не превышающей $0.7\ \text{nm}$. Лазеры с четырьмя сколотыми гранями демонстрируют генерацию при комнатной температуре с относительно низкой плотностью порогового тока порядка $1\ \text{kA}/\text{cm}^2$.

Ключевые слова: сверхрешетки, квантово-каскадный лазер, эпитаксия, фосфид индия.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.24.51800.19014

При создании мощных квантово-каскадных лазеров (ККЛ), работающих в непрерывном режиме токовой накачки, актуальной проблемой, требующей решения, является отвод тепла от гетероструктуры как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Для отвода тепла вдоль слоев гетероструктуры применяют технику заращивания полоскового лазера полуизолирующими слоями фосфида индия [1]. Для теплоотвода в вертикальном направлении используют толстые слои легированного InP наряду с монтажом кристалла ККЛ на теплоотвод на основе AlN или алмаза [1,2]. При этом исторически для увеличения фактора перекрытия оптической моды со слоями активной области (Г-фактора) при формировании обкладок волновода используют тонкие слои InGaAs. Однако детальный расчет, проведенный методом конечных элементов, показывает, что использование дополнительных слоев InGaAs в слоях обкладок волновода приводит к слабому увеличению Г-фактора с 64 до 65% [3,4]. В то же время теплопроводность тройного твердого раствора InGaAs в 12 раз ниже теплопроводности InP [3]. Таким образом, для повышения эффективности теплоотвода ККЛ в вертикальном направлении более предпочтительным является использование обкладок волновода, полностью сформированных на основе фосфида индия [2,3].

Поскольку метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) позволяет создавать более резкие гетерограницы, чем метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) [5], для реализации лазеров с рекордными характеристиками комбинируют две технологии эпитаксии [1,6,7]: для выращивания активной области используют метод МПЭ, а для формирования слоев фосфида индия, образующих верхнюю обкладку волновода, используют метод МОГФЭ.

В настоящей работе представлены результаты по неселективному заращиванию методом МОГФЭ гетероструктур ККЛ спектрального диапазона $4.6\ \mu\text{m}$, выращенных методом МПЭ.

Гетероструктура ККЛ была выращена на подложке InP с ориентацией (001) компанией „Коннектор Оптик“ на промышленной установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber 49 [8,9]. Активная область двух типов гетероструктур ККЛ сформирована из 30 и 45 каскадов на основе гетеропары твердых растворов $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$ [10]. После выращивания слоев активной области формировался слой InP толщиной $100\ \text{nm}$ (уровень легирования $n = 1.0 \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$). После предварительной характеристики структурного качества в чистых помещениях производилось неселективное заращивание гетероструктуры методом МОГФЭ. В качестве исходных реагентов использовались

Плотность нормальных и овальных дефектов, а также величина параметра *haze* для гетероструктур ККЛ после заращивания методом МОГФЭ

Число каскадов в структуре	Плотность нормальных дефектов, cm^{-2}	<i>Haze</i> в диапазоне $0.6\text{--}10\ \mu\text{m}^2/\delta$, ppm/nm	Плотность овальных дефектов, cm^{-2}	<i>Haze</i> в диапазоне $10\text{--}250\ \mu\text{m}^2/\delta$, ppm/nm
30	253	147/0.7	104	114/0.6
30	181	127/0.7	49	96/0.6
30	165	130/0.7	53	103/0.6
45	222	128/0.7	69	105/0.6
45	191	136/0.7	65	110/0.6
45	161	120/0.6	47	94/0.6
45	176	143/0.7	56	109/0.6

триметилгаллий, триметилиндий, фосфин и арсин. Температура роста составляла $600\text{--}670^\circ\text{C}$. Образцы перед заращиванием подвергались предварительному отжигу в атмосфере фосфина (PH_3) при температуре 600°C в течение 5 min. Типичная скорость роста для InP составляла $1.8\ \mu\text{m/h}$, для $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ — $0.3\ \mu\text{m/h}$. Таким образом, на поверхности гетероструктуры, выращенной методом МПЭ, с помощью метода МОГФЭ были сформированы слои верхней обкладки волновода суммарной толщиной $2.9\ \mu\text{m}$ на основе фосфида индия (с переменным уровнем легирования в диапазоне $1.0 \cdot 10^{17}\text{--}3.0 \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$). Толщина контактного слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с уровнем легирования $2.5 \cdot 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ составила $200\ \text{nm}$. Формирование кристалла 4-сколотых ККЛ проводилось по методике, аналогичной описанной ранее [11]. Размеры 4-сколотых лазеров составили 360×360 и $340 \times 340\ \mu\text{m}$ для структур ККЛ с активной областью на основе 30 и 45 каскадов соответственно. Монтаж лазерного кристалла проводился эпитаксиальной поверхностью вниз на медный теплоотвод при помощи индиевого припоя.

Структурное качество гетероструктуры, а также толщина слоев в каскадах оценивались методом рентгеновской дифрактометрии. Измерения спектров рентгеновской дифракции были проведены вблизи симметричного рефлекса (004) InP на дифрактометре PANalytical X'PertPro в параллельной геометрии пучка рентгеновского излучения.

Исследование карт поверхностных дефектов гетероструктур ККЛ проводилось на автоматизированной системе контроля состояния поверхности и определения плотности дефектов подложек и структур Surfscan KLA Tencor. Плотность нормальных дефектов (с размерами в диапазоне $0.6\text{--}10\ \mu\text{m}^2$) для структур, включающих 30 каскадов, перед процессом заращивания методом МОГФЭ находилась в диапазоне $57\text{--}74\ \text{cm}^{-2}$, а плотность овальных дефектов (с размерами в диапазоне $10\text{--}250\ \mu\text{m}^2$) не превышала $5\ \text{cm}^{-2}$. Величина параметра *haze*, характеризующего шероховатость, в диапазоне $0.6\text{--}10\ \mu\text{m}^2$ не превысила значения $16\ \text{ppm}$, что соответствует оценочной величине среднеквадратичной поверхностной шероховатости δ , не превышающей $0.2\ \text{nm}$. Оценка параметра δ проведена с использованием выра-

жения [12]:

$$\delta = (\lambda/4 \cdot \pi)(H/R_0)^{0.5},$$

где R_0 — коэффициент отражения материала, H — величина *haze*, λ — длина волны накачки в системе контроля состояния поверхности и определения плотности дефектов подложек и структур Surfscan KLA Tencor, которая составила $488\ \text{nm}$. Величина параметра *haze* в диапазоне $10\text{--}250\ \mu\text{m}^2$ близка к нулевому значению, что характеризует отсутствие среднеквадратичной поверхностной шероховатости δ .

Плотность нормальных дефектов для структур, включающих 45 каскадов, перед процессом заращивания методом МОГФЭ находилась в диапазоне $81\text{--}88\ \text{cm}^{-2}$, а плотность овальных дефектов не превышала $10\ \text{cm}^{-2}$. Величина параметра *haze* в диапазоне $0.6\text{--}10\ \mu\text{m}^2$ не превысила значения $20\ \text{ppm}$, что соответствует оценочной величине δ , не превышающей $0.3\ \text{nm}$. Величина параметра *haze* в диапазоне $10\text{--}250\ \mu\text{m}^2$ не превысила $2\ \text{ppm}$, что соответствует оценочной величине δ , не превышающей $0.1\ \text{nm}$.

Результаты оценки плотности дефектов после заращивания представлены в таблице.

Плотность нормальных дефектов для всех исследованных гетероструктур после процесса заращивания методом МОГФЭ не превышала $260\ \text{cm}^{-2}$, а плотность овальных дефектов — $104\ \text{cm}^{-2}$. Величина параметра *haze* в диапазоне $0.6\text{--}10\ \mu\text{m}^2$ не превысила $150\ \text{ppm}$, что соответствует оценочной величине δ , не превышающей $0.7\ \text{nm}$. Величина параметра *haze* в диапазоне $10\text{--}250\ \mu\text{m}^2$ не превысила $115\ \text{ppm}$, что соответствует оценочной величине δ , не превышающей $0.6\ \text{nm}$. Ранее для гетероструктур ККЛ спектрального диапазона $4.6\ \mu\text{m}$, полностью выращенных методом МПЭ [10], плотность нормальных дефектов не превышала $140\ \text{cm}^{-2}$, а плотность овальных дефектов — $25\ \text{cm}^{-2}$. Величина параметра *haze* в диапазоне $0.6\text{--}10\ \mu\text{m}^2$ не превышала $100\ \text{ppm}$, что соответствует оценочной величине δ , не превышающей $0.6\ \text{nm}$. Величина параметра *haze* в диапазоне $10\text{--}250\ \mu\text{m}^2$ не превышала $66\ \text{ppm}$, что соответствует оценочной величине δ , не превышающей $0.5\ \text{nm}$.

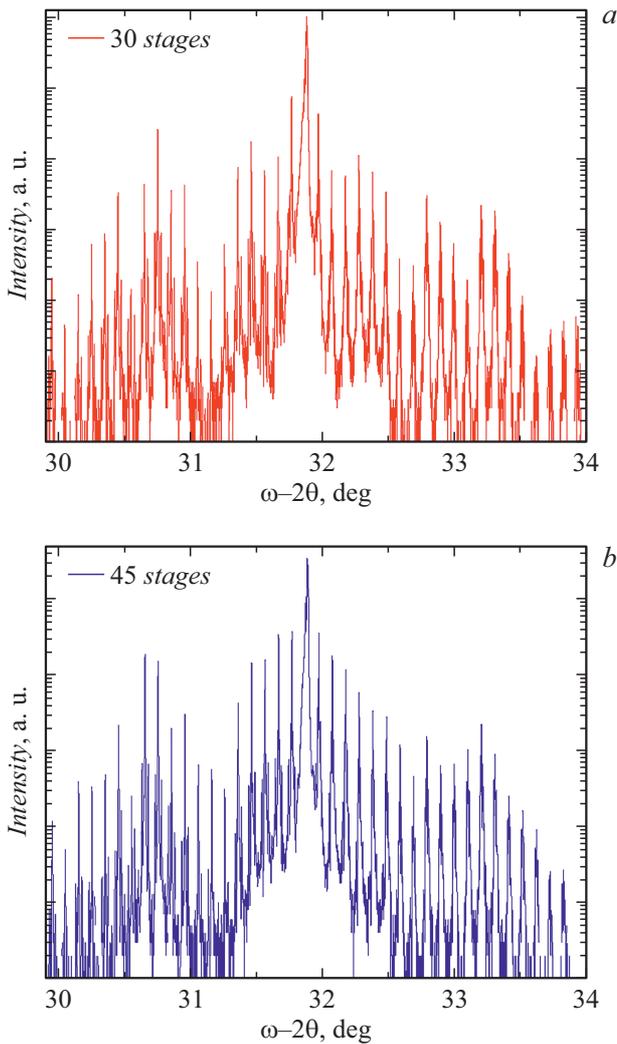


Рис. 1. Рентгенодифракционные кривые гетероструктур ККЛ с неселективным зарастанием методом МОГФЭ. *a* — ККЛ с активной областью на основе 30 каскадов, *b* — ККЛ с активной областью на основе 45 каскадов.

На рис. 1 представлены экспериментальные кривые качания гетероструктур ККЛ с активной областью на основе 30 и 45 каскадов. Измерения проведены после процесса зарастания методом МОГФЭ. На рентгенодифракционных кривых наблюдается полное совпадение нулевого пика сателлитной структуры с положением пика от подложки InP. Данный факт свидетельствует о точном соответствии химического состава эпитаксиальных слоев заданным значениям, приведенным в ростовой спецификации. На кривых качания наблюдается большое количество (порядка 40) пиков-сателлитов высоких порядков, характерных для периодической структуры каскадов. Анализ кривых дает довольно малое значение средней ширины на полувысоте (FWHM) пиков-сателлитов $13 \pm 2''$, что свидетельствует о высокой однородности состава и толщин различных каскадов в полученных гетероструктурах и соотносится с результатами [10].

На основании положения 20 пиков-сателлитов была проведена оценка средней толщины периода каскада, которая составила 50.8 ± 0.2 и 50.5 ± 0.4 nm для гетероструктур ККЛ с активной областью на основе 30 и 45 каскадов соответственно. Таким образом, данные рентгенодифракционного анализа свидетельствуют о высоком структурном совершенстве гетероструктур ККЛ с активными областями, выращенных методом МПЭ с последующим формированием слоев верхней обкладки волновода и контактных слоев методом МОГФЭ.

Характеристики ККЛ исследовались в импульсном режиме. Длительность импульсов накачки составляла 200 ps при частоте повторения 25 kHz. Для получения зависимости интенсивности излучения ККЛ от тока накачки излучение лазера коллимировалось при помощи высокоапертурной линзы и регистрировалось охлаждаемым фотоприемником Vigo PVI-4TE-10.6, подключенным к осциллографу Agilent 54835. Полоса пропускания обоих приборов составляла 1 GHz. Параллельная регистрация на осциллографе импульсов фототока и импульсов тока накачки позволила получить одновременную запись данных для построения импульсной вольт-амперной характеристики, а также зависимости импульсной интенсивности излучения ККЛ от тока накачки. Зависимости импульсной интенсивности излучения, а также вольт-амперные характеристики 4-сколотых ККЛ представлены на рис. 2. Значение пороговой плотности тока составило порядка 1.0 kA/cm^2 , что соотносится с ранее полученными результатами для ККЛ спектрального диапазона $4.6 \mu\text{m}$, полностью выращенных методом МПЭ [10]. Пороговое напряжение в лазерах составило 7.5–8.0 и 12 V для ККЛ с активной областью на основе 30 и 45 каскадов соответственно. Регистрация спектров

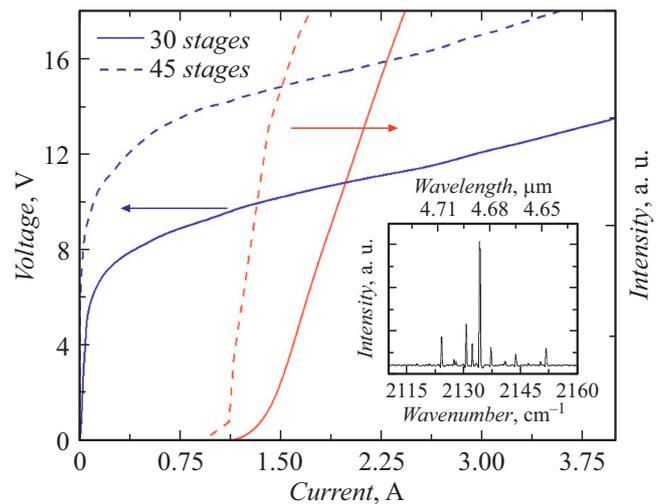


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики (левая ось) и зависимости импульсной интенсивности излучения от уровня накачки (правая ось) для 4-сколотых ККЛ с активной областью на основе 30 (сплошные линии) и 45 (штриховые линии) каскадов. На вставке — типичный спектр генерации вблизи порогового значения для ККЛ с активной областью на основе 30 каскадов.

генерации ККЛ проводилась при помощи вакуумированного фурье-спектрометра BrukerVertex 70v. Типичный спектр лазерной генерации представлен группой оптических мод в спектральном диапазоне 4.65–4.70 μm (см. вставку на рис. 2).

Таким образом, в ходе исследований получены результаты по созданию и изучению характеристик ККЛ спектрального диапазона 4.6 μm . Комбинирование двух технологий эпитаксии для создания гетероструктур ККЛ позволило реализовать 4-сколотые лазеры, демонстрирующие пороговые плотности тока, сопоставимые с результатами для аналогичных структур ККЛ, полностью выращенных методом МПЭ [10]. С учетом того, что полосковые ККЛ, изготовленные из гетероструктур, полностью выращенных методом МПЭ, демонстрируют высокую выходную оптическую мощность (на уровне 10 W) [13,14], можно сделать вывод о перспективности применения комбинированного подхода в эпитаксии гетероструктур для реализации мощных ККЛ спектрального диапазона 4.6 μm . При этом увеличение числа каскадов до 45 может дополнительно повысить выходную оптическую мощность в сравнении с ранее представленными результатами [14], что является предметом дальнейших исследований.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-30020).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Q. Lu, S. Slivken, D. Wu, M. Razeghi, *Opt. Express*, **28** (10), 15181 (2020). DOI: 10.1364/oe.393069
- [2] M. Suttinger, R. Kaspi, A. Lyakh, in *Mid-infrared optoelectronics*, ed. by E. Tournié, L. Cerutti (Woodhead Publ., Sawston, UK, 2020), p. 181–205. DOI: 10.1016/b978-0-08-102709-7.00005-x
- [3] P. Figueiredo, M. Suttinger, R. Go, E. Tsviid, C.K.N. Patel, A. Lyakh, *Appl. Opt.*, **56** (31), H15 (2017). DOI: 10.1364/ao.56.000h15
- [4] A. Lyakh, M. Suttinger, R. Go, P. Figueiredo, A. Todi, *Appl. Phys. Lett.*, **109** (12), 121109 (2016). DOI: 10.1063/1.4963233
- [5] R. Maulini, A. Lyakh, A. Tsekoun, C.K.N. Patel, *Opt. Express*, **19** (18), 17203 (2011). DOI: 10.1364/oe.19.017203
- [6] F. Kapsalidis, M. Shahmohammadi, M.J. Süess, J.M. Wolf, E. Gini, M. Beck, M. Hundt, B. Tuzson, L. Emmenegger, J. Faist, *Appl. Phys. B*, **124** (6), 107 (2018). DOI: 10.1007/s00340-018-6973-2
- [7] L. Consolino, S. Jung, A. Campa, M. De Regis, S. Pal, J.H. Kim, K. Fujita, A. Ito, M. Hitaka, S. Bartalini, P. De Natale, M.A. Belkin, M.S. Vitiello, *Sci. Adv.*, **3** (9), e1603317 (2017). DOI: 10.1126/sciadv.1603317
- [8] А.В. Бабичев, В.В. Дюделев, А.Г. Гладышев, Д.А. Михайлов, А.С. Курочкин, Е.С. Колодезний, В.Е. Бугров, В.Н. Неведомский, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Д.В. Денисов, А.С. Ионов, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Г.С. Соколовский, А.Ю. Егоров, *Письма в ЖТФ*, **45** (14), 48 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.14.48025.17824 [A.V. Babichev, V.V. Dudelev, A.G. Gladyshev, D.A. Mikhailov, A.S. Kurochkin, E.S. Kolodeznyi, V.E. Bougrov, V.N. Nevedomskiy, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, D.V. Denisov, A.S. Ionov, S.O. Slipchenko, A.V. Lutetskiy, N.A. Pikhtin, G.S. Sokolovskii, A.Yu. Egorov, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (7), 735 (2019). DOI: 10.1134/s1063785019070174].
- [9] А.В. Бабичев, А.Г. Гладышев, А.С. Курочкин, В.В. Дюделев, Е.С. Колодезний, Г.С. Соколовский, В.Е. Бугров, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Д.В. Денисов, А.С. Ионов, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров, *Письма в ЖТФ*, **45** (8), 31 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.08.47618.17716 [A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, A.S. Kurochkin, V.V. Dudelev, E.S. Kolodeznyi, G.S. Sokolovskii, V.E. Bugrov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, D.V. Denisov, A.S. Ionov, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, N.A. Pikhtin, A.Yu. Egorov, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (4), 398 (2019). DOI: 10.1134/s1063785019040205].
- [10] А.В. Бабичев, А.Г. Гладышев, В.В. Дюделев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Д.В. Денисов, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Г.С. Соколовский, А.Ю. Егоров, *Письма в ЖТФ*, **46** (9), 35 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49371.18243 [A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, V.V. Dudelev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, D.V. Denisov, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, N.A. Pikhtin, G.S. Sokolovskii, A.Yu. Egorov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (5), 442 (2020). DOI: 10.1134/s1063785020050028].
- [11] А.Ю. Егоров, А.В. Бабичев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Е.В. Никитина, М. Тчернычева, А.Н. Софронов, Д.А. Фирсов, Л.Е. Воробьев, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов, ФТП, **49** (11), 1574 (2015). [A.Yu. Egorov, A.V. Babichev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, E.V. Nikitina, M. Tchernycheva, A.N. Sofronov, D.A. Firsov, L.E. Vorobjev, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, *Semiconductors*, **49** (11), 1527 (2015). DOI: 10.1134/s1063785020050028].
- [12] A. Steinbach, A. Belyaev, B. Pinto, D. Chen, S. Radovanovic, G. Neskovic, H. Yeh, A. Wang, J. Cao, J. Reich, D. Kavaljdjev, P. Dighe, R. Bammi, L. Vintro, D. Bloom, in *Be market ready*, ed. by U. Subramaniam. Yield management solutions (KLA-Tencor Corporation, San Jose, California, 2006), p. 64–67. Доступно онлайн: <https://www.ymsmagazine.com/wp-content/uploads/summer06.pdf#page=64> (дата обращения 03.09.2021).
- [13] В.В. Дюделев, Д.А. Михайлов, А.В. Бабичев, С.Н. Лосев, Е.А. Когновицкая, А.В. Лютецкий, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, А.Г. Гладышев, Д.В. Денисов, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, В.И. Кучинский, А.Ю. Егоров, Г.С. Соколовский, *Квантовая электроника*, **50** (8), 720 (2020). [V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, A.V. Babichev, S.N. Losev, E.A. Kognovitskaya, A.V. Lyutetskii, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kuchinskii, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii, *Quantum Electron.*, **50** (8), 720 (2020). DOI: 10.1070/qel17332].

- [14] В.В. Дюделев, Д.А. Михайлов, А.В. Бабичев, Г.М. Савченко, С.Н. Лосев, Е.А. Когновицкая, А.В. Лютецкий, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, А.Г. Гладышев, Д.В. Денисов, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, В.И. Кучинский, А.Ю. Егоров, Г.С. Соколовский, Квантовая электроника, **50** (11), 989 (2020). [V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, A.V. Babichev, G.M. Savchenko, S.N. Losev, E.A. Kognovitskaya, A.V. Lyutetskii, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhthin, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kuchinskii, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii, Quantum Electron., **50** (11), 989 (2020). DOI: 10.1070/qel17396].