

Высокоэффективные поперечно-одномодовые суперлюминесцентные диоды красного диапазона спектра

Е.В.Андреева, А.С.Аникеев, С.Н.Ильченко, А.Ю.Чаморовский, С.Д.Якубович

Оптимизация процесса эпитаксиального роста AlGaInP/GaInPAs-наногетероструктур и усовершенствование технологий формирования активного канала и нанесения р-контакта позволили заметно повысить внешнюю дифференциальную квантовую эффективность (до 0.5 мВт/мА), порог катастрофической оптической деградации (до 40 мВт) и ширину спектра (FWHM более 15 нм) поперечно-одномодовых суперлюминесцентных диодов с центральной длиной волны излучения около 675 нм. Ресурсные испытания продемонстрировали высокую надежность этих приборов при непрерывной выходной оптической мощности до 30 мВт.

Ключевые слова: полупроводниковая наногетероструктура, суперлюминесцентный диод, красный диапазон спектра.

1. Введение

Полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) «красного» диапазона спектра на основе AlGaInP/GaInPAs-гетероструктур получили широчайшее распространение. Они используются в оптических системах записи и считывания информации, в медицинских приборах, в лазерных указках, дальномерах, прицелах и в целом ряде других устройств. По оценкам агентства Strategies Unlimited (USA) годовой выпуск таких лазеров составляет сотни миллионов штук. Их исследованию и совершенствованию посвящены сотни публикаций. В тоже время объем выпуска красных суперлюминесцентных диодов (СЛД), разработанных более 20 лет назад [1], на несколько порядков меньше и по нашим оценкам составляет несколько тысяч штук в год. Посвященные им публикации можно пересчитать по пальцам. Однако для некоторых практических применений (атомно-силовая микроскопия [2], низкокогерентная подсветка [3, 4], медико-биологические исследования и терапия [5–8]) красные СЛД оказались оптимальными источниками света.

Достижимый уровень выходной оптической мощности красных лазерных диодов близок к таковому у ЛД ближнего ИК диапазона спектра на основе AlGaAs/InGaAs-гетероструктур (сотни милливатт в непрерывном режиме для поперечно-одномодовых приборов с шириной активного канала несколько микрометров). У тех и других он ограничивается порогом катастрофической оптической деградации (КОД), связанной, как правило, с разрушением торцевых зеркал. Уровень выходной оптической мощности красных СЛД на порядок ниже. У серийно вы-

пускаемых приборов спектрального диапазона 650–680 нм (SUPERLUM, EXALOS, NoLaTech, Inject, QPhotonics) он не превышает 15 мВт (серия SLD-26-HP, SUPERLUM) [9, 10]. Ограничивающая эту величину КОД, как правило, не связана с разрушением торцевых граней. Как известно, СЛД отличаются от ЛД значительно более высокой концентрацией неравновесных носителей заряда в рабочем режиме. Несмотря на это, в фиолетово-синем и ближнем ИК-диапазонах спектра выходная мощность наиболее эффективных СЛД приближается по порядку величины к таковой у ЛД с теми же размерами активного канала (см., напр., [11, 12]). Нам не известны исследования, направленные на выявление доминирующего механизма деградации красных СЛД.

В настоящей работе исследованы образцы СЛД с центральной длиной волны излучения около 675 нм, при изготовлении которых использованы усовершенствованные технологии эпитаксиального роста наногетероструктуры, формирования активного канала и нанесения р-контакта. Они заметно превосходят по выходным характеристикам лучшие из серийно выпускаемых приборов данного типа.

2. Экспериментальные образцы

Уже многие годы приборы вышеупомянутой серии SLD-26-HP изготавливаются на основе трёхслойной квантоворазмерной гетероструктуры [9], которая выращивается на подложке из GaAs, ориентированной в кристаллографической плоскости (100). В рамках настоящей работы эта гетероструктура была воспроизведена в общих чертах с помощью ростовой МОС-гидридной установки с горизонтальным реактором AIXTRON AIX 200/4 на подложке, разориентированной под углом 6° относительно одной из плоскостей спайности. Кроме того, были внесены технологические усовершенствования в процесс формирования одномодового гребневидного световода, что обеспечило более жесткое боковое оптическое ограничение и более слабое оптическое ограничение в перпендикулярном гетерослоям направлении «новой» гетероструктуры по сравнению с традиционно используемой («старой») (рис.1). Забегая вперед, укажем, что это обес-

Е.В.Андреева, А.С.Аникеев, С.Н.Ильченко. ООО «Оптон», Россия, 119330 Москва, ул. Мосфильмовская, 17б
А.Ю.Чаморовский. Superlum Ltd., Unit B3, Fota Point Enterprise Park, Carrigtwohill, Co Cork, Ireland
С.Д.Якубович. Московский технологический университет (МИРЭА), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78;
e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

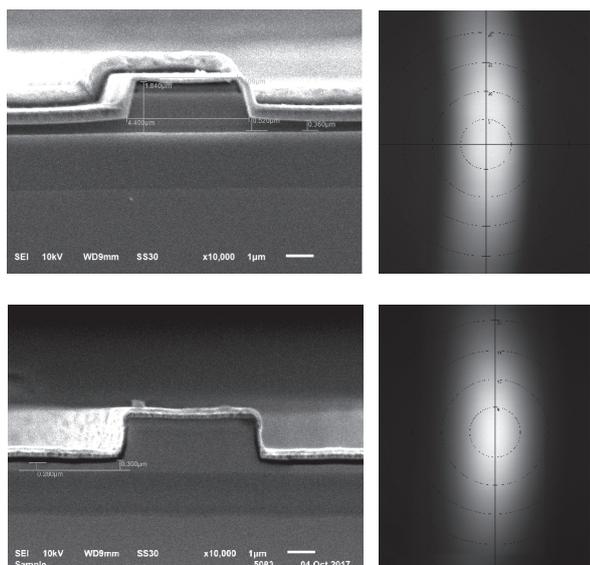


Рис.1. Микрофотографии торцов активных каналов ($w = 4$ мкм) и сечения выходных световых пучков «старых» (а) и «новых» (б) СЛД.

печило достаточно высокий (60%–70%) коэффициент ввода излучения СЛД в одномодовые волоконные световоды (ОВС) с использованием торцевой цилиндрической микролинзы. Ранее этот коэффициент не превышал 55%. О высокой однородности выращенной гетероструктуры и высоком качестве ее постростовой обработки свидетельствует гистограмма (рис.2), иллюстрирующая повторяемость центральной длины волны суперлюминесценции образцов одинаковой конфигурации, изготовленных из различных участков традиционно используемой «старой» и оптимизированной «новой» гетероструктур.

Разработанный комплект фотолитографических шаблонов позволял изготавливать активные каналы СЛД шириной $w = 2$ и 4 мкм. Их оси составляли угол 7° относительно нормали к плоскости спайности кристалла. Длина активного канала L_a определялась местами скалывания и могла варьироваться в диапазоне 200–2000 мкм. На торцевые грани кристаллов наносились двухслойные антиотражающие покрытия. На рис.3 представлены типичные вольт-амперные и ватт-амперные характеристики лучших из «старых» и «новых» СЛД одинаковой конфигурации

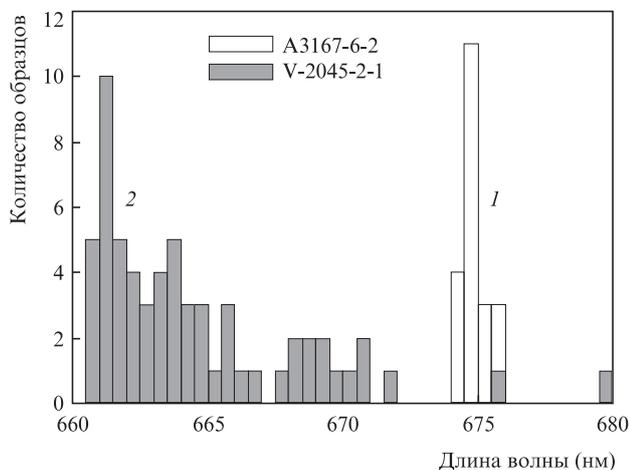


Рис.2. Гистограмма, иллюстрирующая воспроизводимость медианной длины волны излучения «старых» (1) и «новых» (2) СЛД одинаковой конфигурации в одинаковых рабочих режимах.

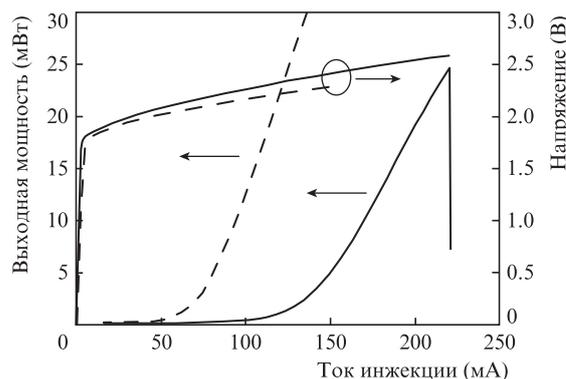


Рис.3. Вольт-амперные и ватт-амперные характеристики «новых» (сплошные линии) и «старых» (штриховые линии) СЛД одинаковой конфигурации ($L_a = 1200$ мкм, $w = 4$ мкм).

($w = 4$ мкм, $L_a = 1200$ мкм). Приведенные кривые наглядно демонстрируют значительное преимущество разработанных образцов по дифференциальному сопротивлению, внешней квантовой эффективности и порогу КОД.

3. Основные физические характеристики исследованных СЛД

На рис.4 показаны типичные ватт-амперные характеристики в непрерывном режиме инжекции при температуре 25°C образцов СЛД с $w = 4$ мкм, различающихся величиной L_a . При малых L_a (не более 800 мкм) выходная оптическая мощность ограничена тепловым насыщением. При больших L_a это ограничение определяется порогом КОД, составляющим 35–40 мВт и практически не зависящим от L_a . Таким образом, указанная величина порога КОД определяется главным образом плотностью лучевого потока на выходе СЛД. Отсюда следует, что изготовление СЛД с длиной L_a более 1200–1400 мкм с целью повышения выходной мощности нецелесообразно. Следует отметить, что указанные значения порога КОД были зарегистрированы у длинных СЛД, прошедших наработку в течение 120–150 ч. Приведенное в [13] значение порога КОД около 50 мВт было зарегистрировано у свежизготовленных образцов.

Излучение всех образцов в развитом режиме суперлюминесценции было сильно поляризовано – отношение ТЕ/ТМ более 20 дБ. Глубина остаточной модуляции спектра модами Фабри–Перо не превышала 2%.

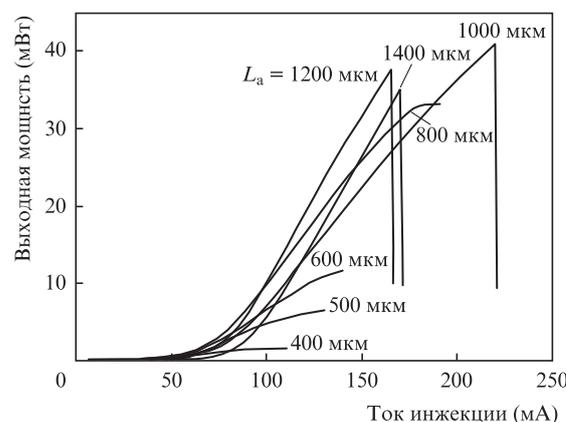


Рис.4. Типичные ватт-амперные характеристики СЛД с различной длиной активного канала ($w = 4$ мкм).

Табл.1. Основные параметры СЛД с различными размерами активного канала.

w (мкм)	L_a (мкм)	I (мА)	J (кА/см ²)	P_{FS} (мВт)	P_{SM} (мВт)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	МТТФ (ч)
2.0	400	80	1.05	2.0	0.9	675	19.0	2 500
	500	110	1.09	6.0	3.3	674	14.0	5 000
	600	110	0.91	11.5	6.9	674	12.1	10 000
	1000	110	0.57	16.0	11.2	670	8.6	н/д
4.0	1200	110	0.46	18.4	12.9	673	7.5	20 000
	400	90	0.56	1.8	0.7	675	19.5	20 000
	500	120	0.59	7.1	3.6	673	14.9	20 000
	600	150	0.58	12.2	8.2	673	12.6	25 000
4.0	800	150	0.44	21.9	15.1	670	9.6	н/д
	1000	150	0.35	23.0	16.1	672	8.8	н/д
	1200	150	0.29	31.5	22.0	674	8.2	30 000
	1400	150	0.25	25.3	17.7	677	7.1	35 000

Примечание: w – ширина гребневидного световода, L_a – длина активного канала, I – ток инжекции, J – плотность тока инжекции, P_{FS} – выходная оптическая мощность в открытое пространство, P_{SM} – выходная оптическая мощность через ОВС, λ_m – медианная длина волны, $\Delta\lambda$ – полуширина спектра, МТТФ – медианное время жизни при 25°C.

Образцы СЛД с $w = 2$ мкм обладают бóльшей дифференциальной квантовой эффективностью, однако их порог КОД составляет 20–25 мВт. Их изготовление целесообразно, если требуемая выходная мощность не превышает ~ 15 мВт.

В табл.1 представлены типичные параметры выходного излучения исследованных образцов СЛД. Важно отметить, что СЛД с малыми L_a при выходной мощности в единицы мВт позволяют получить спектры выходного

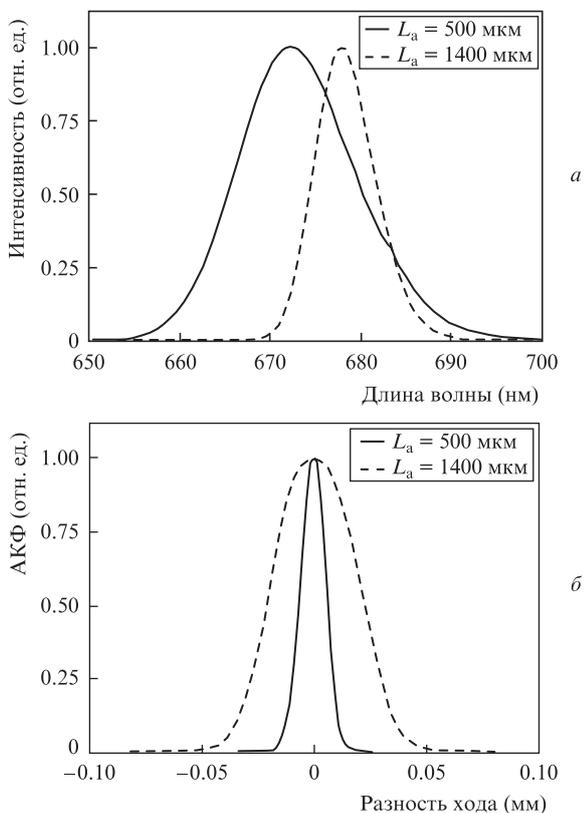


Рис.5. Спектры (а) и АКФ (б) излучения СЛД ($w = 4$ мкм) с $L_a = 500$ и 1400 мкм.

излучения с полушириной (FWHM) до 20 нм (с длиной когерентности менее 10 мкм), тогда как у серийно выпускаемых СЛД красного диапазона спектральная полуширина не превышает 10 нм. Для некоторых практических применений СЛД, в частности для оптической когерентной томографии, этот параметр является ключевым.

На рис.5 изображены типичные спектры излучения СЛД с длинами L_a , равными 500 и 1400 мкм, и соответствующие им автокорреляционные функции интенсивности (АКФ). Форма спектра близка к гауссовой, вследствие чего центральный пик АКФ не имеет «пьедестала», характерного для спектров иной формы. Такие АКФ являются оптимальными для источников света, используемых в интерференционных измерительных устройствах, так как они обеспечивают их максимальную чувствительность. Несомненный интерес представляет использование разработанных СЛД в качестве активных элементов полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) и созда-

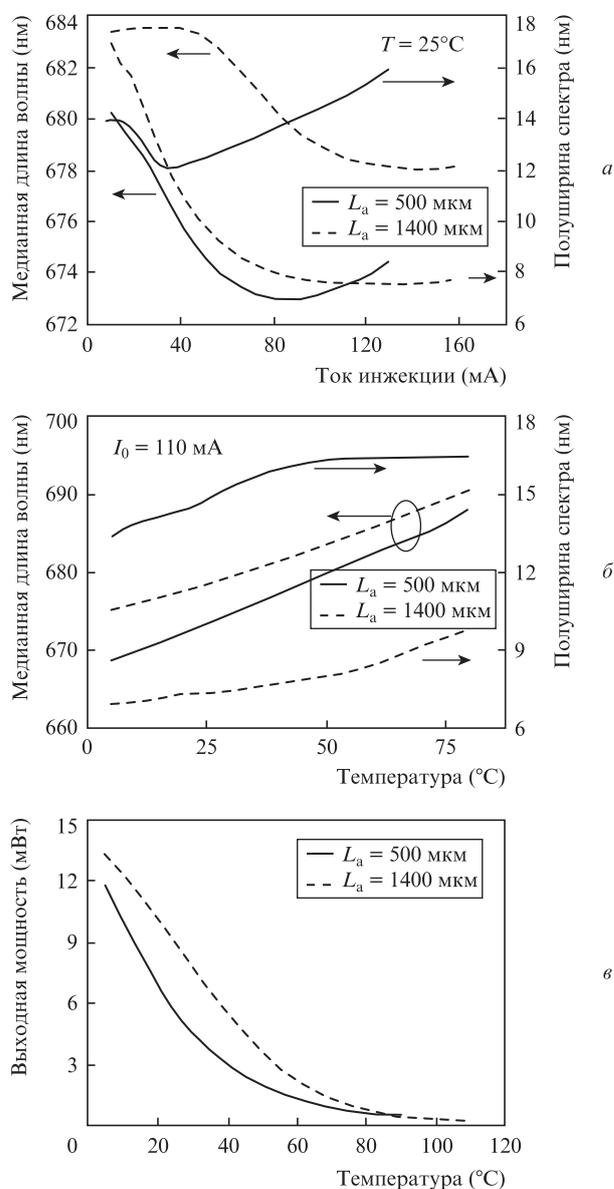


Рис.6. Зависимости медианной длины волны излучения λ_m и спектральной полуширины $\Delta\lambda$ от тока инжекции при $T = 25^\circ\text{C}$ (а) и температуры при токе $I = 110$ мА (б) для тех же образцов, что и на рис.5, а также температурные зависимости их выходной мощности (в).

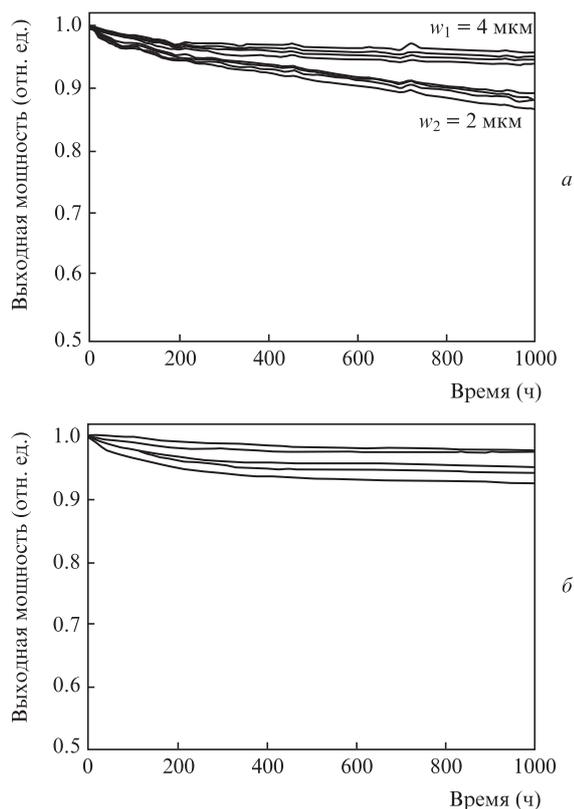


Рис.7. Хронограммы предварительных ресурсных испытаний СЛД с длиной активного канала $L_a = 500$ мкм ($w_1 = 2$ мкм, $I_1 = 110$ мА; $w_2 = 4$ мкм, $I_2 = 120$ мА) (а) и 1400 мкм ($w = 4$ мкм, $I = 150$ мА) (б).

ние на их основе подобных описанным в [14] лазеров, перестраиваемых в диапазоне 665–685 нм.

На рис.6 для тех же образцов СЛД представлены зависимости медианной длины волны излучения и спектральной полуширины от тока инжекции при фиксированной температуре сабмаунта СЛД и от температуры при фиксированном токе инжекции. Там же изображены температурные зависимости выходной мощности. Приведенные кривые показывают, что в условиях термостабилизации спектральные параметры длинных мощных СЛД слабо зависят от тока инжекции, тогда как у коротких широкополосных СЛД с увеличением тока длина волны и спектральная полуширина заметно растут, что связано с их большим тепловым сопротивлением. Таким образом, для первых возможно использование режима автоматического контроля мощности, а для вторых предпочтительна стабилизация тока инжекции. Рис.6,б и 6,в иллюстрируют сильную температурную зависимость выходной мощности и спектральных характеристик исследованных СЛД и указывают на то, что для большинства практических применений термостабилизация необходима.

На рис.7 представлены хронограммы предварительных ресурсных испытаний в режиме автоматического контроля

тока при $T = 25^\circ\text{C}$ СЛД с длинами 500 и 1400 мкм. Оценка медианного времени жизни (МТТФ) проводилась общепринятым методом – линейной экстраполяцией подобных кривых до 50%-ного спада выходной мощности. Полученные значения МТТФ представлены в крайнем правом столбце табл.1. Для большинства практических применений СЛД срок службы более 20 000 ч является приемлемым. Следует отметить, что изготовление широкополосных СЛД с $w = 2$ мкм нецелесообразно из-за их относительно низкой надежности.

В настоящее время СЛД новой серии с условным наименованием SLD-26-UHP ($P_{FS} = 25$ мВт, $P_{SM} = 15$ мВт) находится в стадии внедрения в серийное производство.

Итак, совершенствование технологий роста и постуростовой обработки AlGaInP/GaInPAs-наногетероструктур позволило разработать достаточно надежные СЛД традиционной конфигурации, излучающие в красном диапазоне оптического спектра и превосходящие в полтора-два раза по основным выходным характеристикам лучшие из серийно выпускаемых приборов указанного типа.

Авторы выражают благодарность В.Р.Шидловскому за инициирование проведенных исследований. Работа частично поддержана Минобрнауки РФ (Проект №8.4853.2017/БЧ).

1. Semenov A.T., Shidlovski V.R., Safin S.A., Konyaev V.P., Zverkov M.V. *Electron. Lett.*, **29** (6), 530 (1993).
2. Rode S., Stark R., Lübke J., Tröger L., Schütte J., Umeda K., Kobayashi K., Yamada H., Kühnle A. *Rev. Sci. Instrum.*, **82** (073703), 073703-1 (2011).
3. Gastinger K., Løvhaugen P., Skotheim Ø., Hunderi O. *Proc. SPIE*, **6616**, 66163K-1 (2007).
4. Lansdorp B.M., Tabrizi S.J., Dittmore A., Saleh O.A. *Rev. Sci. Instrum.*, **84** (044301), 044301-1 (2013).
5. Støren T., Simonsen A., Royset A.K., Lokberg O.J., Svaasand L.O., Tore Lindmo T. *Proc. SPIE*, **4956**, 197 (2003).
6. Li H., Lu J., Shi G., Zhang Y. *J. Biomed. Opt.*, **16** (11), 110504 (2011).
7. Zawadzki R., Zhang P., Zam A., Miller E., Goswami M., Wang X., Jonnal R., Lee S., Kim D., Flannery J., Werner J., Burns M., Pugh E. *Biomed. Opt. Express*, **6**, 2191 (2015).
8. Karu T., Andreichuk T., Ryabykh T. *Lasers Surg. Med.*, **13** (4), 453 (1993).
9. Рябоштан Ю.Л., Горлачук П.В., Мармалюк А.А., Лобинцов А.А., Ильченко С.Н., Якубович С.Д. *Труды XVI Международного симп. «Нанофизика и нанoeлектроника»*, **2**, 372 (2012).
10. Padalitsa A., Marmalyuk A., Yarotskaya I., Gorlachuk P., Ryaboshтан Yu., Il'chenko S., Lobintsov A., Yakubovich S. *17th Int. Conf. MOVPE (Lausanne, 2014, Web-Poster 0-71, p.1)*.
11. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Курняк Ю.В., Лукьянов В.Н., Шидловский В.Р., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **46** (7), 594 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (7), 594 (2016)].
12. Kefar A., Standzie S., Wisniewski P., Oto T., Makarova I., Targovski G., Suski T., Perlin P. *Phys. Stat. Solidi A*, **212** (5), 997 (2015).
13. Andreeva E.V., Anikeev A.S., Il'chenko S.N., Chamorovsky A.Yu., Yakubovich S.D. *Electron. Lett.*, **53** (23), 1535 (2017).
14. Костин Ю.О., Ладугин М.А., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Чаморовский А.Ю., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **45** (8), 697 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (8), 697 (2015)].