

Инжекционные лазеры InGaIP/GaAs оранжевого оптического диапазона (~ 600 нм)

© А.М. Надточий¹, Ю.М. Шерняков², М.М. Кулагина², А.С. Паюсов², Н.Ю. Гордеев²,
М.В. Максимов¹, А.Е. Жуков¹, Т. Denneulin^{3,4}, N. Cherkashin⁴, В.А. Щукин⁵, Н.Н. Леденцов⁵

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Peter Grünberg Institut (PGI-5),
52425 Jülich, Germany

⁴ CEMES-CNRS,
31055 Toulouse Cedex 4, France

⁵ VI Systems GmbH,
10623 Berlin, Germany

E-mail: al.nadtochy@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 23 июля 2019 г.

В окончательной редакции 29 июля 2019 г.

Принята к публикации 29 июля 2019 г.

Продемонстрирована лазерная генерация в оранжевой области спектра (599–605 нм) в лазерных диодах $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}-\text{GaAs}$, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs (211)A и (322)A. Активная область представляла собой 4 слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ вертикально-связанных квантовых точек. Для подавления утечки неравновесных электронов из активной области использовались барьерные вставки, состоящие из четырех квантово-размерных слоев твердого раствора InGaIP с высоким содержанием Ga. Максимальная выходная оптическая мощность в импульсном режиме составила 800 мВт и была ограничена катастрофической оптической деградацией зеркал. Лазеры, изготовленные из структур, выращенных на подложках (322)A, демонстрируют меньшую пороговую плотность тока, большую дифференциальную квантовую эффективность и меньшие внутренние потери по сравнению с лазерами, изготовленными из структур, выращенных на подложках (211)A, что объясняется более высоким барьером для неравновесных электронов в первом случае.

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры, квантовые точки, оранжевое излучение.

DOI: 10.21883/FTP.2019.12.48631.9217

1. Введение

Компактные перестраиваемые по длине волны — когерентные источники света, излучающие в темно-зеленом, желтом, оранжевом и ярко-красном спектральных диапазонах перспективны для применения в лазерных дисплеях, в лазерных системах с фокусными расстояниями, зависящими от длины волны, для создания 3D изображений [1,2], в очках с лазерной подсветкой для расширенной или виртуальной реальности [3,4], лазерах для медико-биологических приложений, таких как дерматология [5], биофотоника [6], фото [7] и конфокальная флуоресцентная микроскопия [8]. Однако достаточно ограниченный набор ширин запрещенных зон и постоянных решеток кристалла, определяющийся существующими эпитаксиальными материалами, делает чрезвычайно сложной задачу создания эффективных лазерных диодов с длинами волны излучения, перекрывающими желто-оранжевую часть спектра (560–620 нм). Действительно, спектральный диапазон излучения коммерческих лазеров на основе GaN ограничен со стороны желто-зеленой области спектра длиной волны

~ 520 нм, в то время как диапазон излучения лазеров на основе соединений InGaIP на подложках GaAs ограничен с красно-оранжевой стороны спектра длиной волны ~ 635 нм. Для создания лазеров, излучающих в области длин волн 560–620 нм, наиболее перспективным подходом представляется использование квантово-размерных эффектов в структурах InGaIP/GaAs [9–12]. Лазерная генерация в желтой части спектра (586 нм) при комнатной температуре и оптическом возбуждении была продемонстрирована еще в 1994 г. [11]. В работах [13,14] инжекционная генерация в желтом спектральном диапазоне была достигнута при 77 К с пороговой плотностью тока ~ 6 кА/см². Совсем недавно инжекционная генерация в лазерных диодах с узким полоском была продемонстрирована при низкой температуре (~ 80 К) в зеленой части спектра ~ 555 нм [15]. Максимальная рабочая температура в импульсном режиме составила 160 К. Информация об ориентации подложки, составах и толщинах слоев, длине резонатора, покрытии торцевых граней не приведена. Лазерная генерация при комнатной температуре вблизи 615 нм была реализована с использованием квантовых ям (КЯ) AlGaInP в качестве

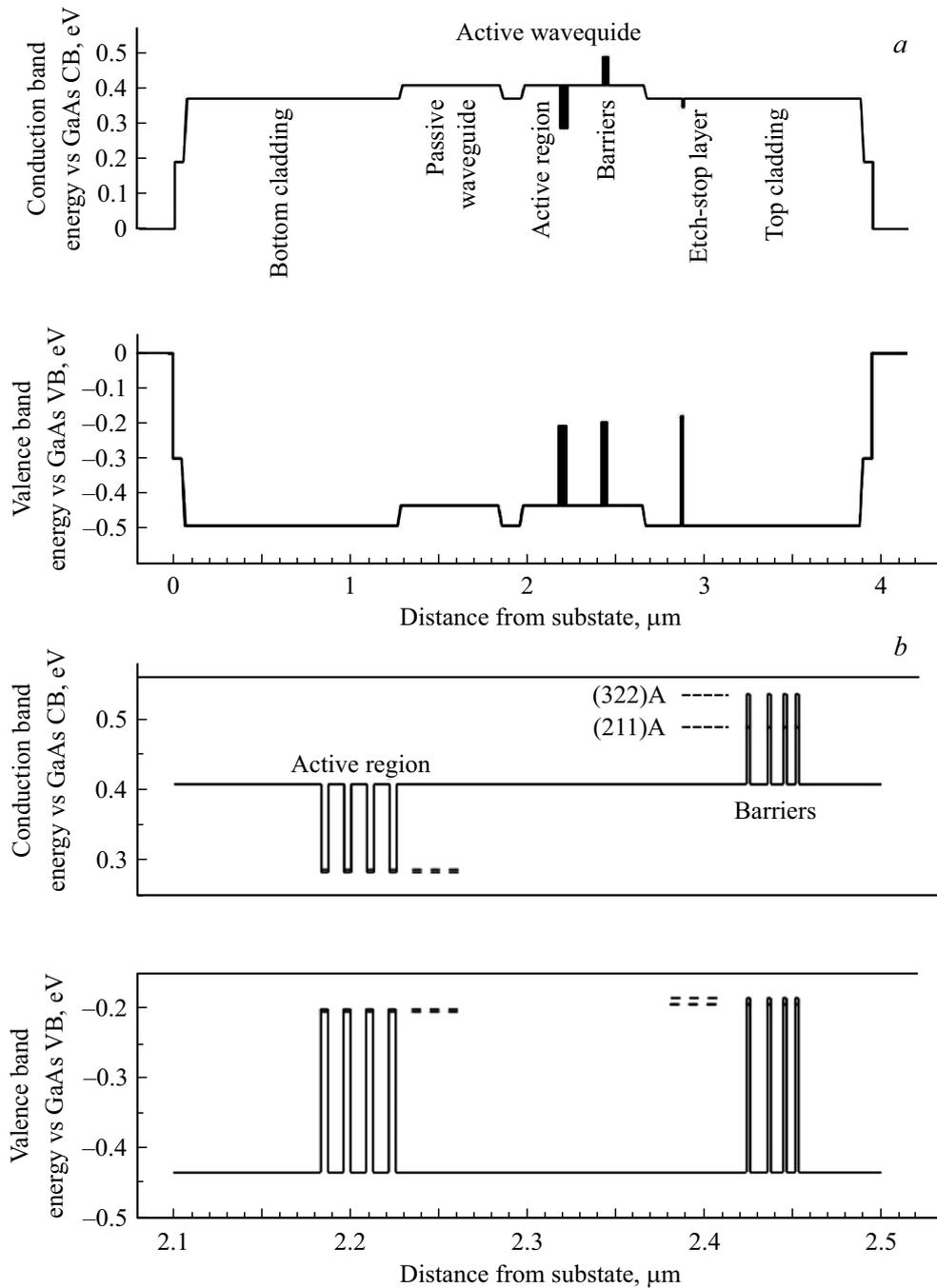


Рис. 1. Зонная диаграмма лазерной структуры. *a* — общая схема структуры; *b* — центральная часть структуры, включающая активную область (4 слоя квантовых точек) и напряженные барьерные слои.

активной среды [16–19]. Такая же длина волны была получена и в лазерах с вертикальным резонатором [20]. Совсем недавно в лазерной структуре, подвергнутой процедуре перемешивания атомов в квантово-размерной активной области (intermixing) при высокотемпературном отжиге, была продемонстрирована возможность инжекционной лазерной генерации на длине волны 608 нм при комнатной температуре [21]. В наших предыдущих публикациях было показано, что светоизлучающие диоды системы материалов (In,Ga,Al)P, выращенные на

высокоиндексных подложках GaAs, разориентированных в направлении [111] по отношению к плоскости (100), и содержащие упругорастянутые барьерные слои широкозонного твердого раствора InGaAlP с высоким содержанием Ga, демонстрируют повышенную интенсивность электролюминесценции (ЭЛ) при комнатной температуре в зелено-оранжевом спектральном диапазоне (~ 558–605 нм) по сравнению с лазерами, выращенными на подложках (100) [22–24]. Этот эффект достигается за счет увеличения высоты барьера в зоне проводимости

для упругорастянутых слоев InGaAlP. В лазерных диодах с активной областью на основе 4 слоев квантовых точек (In,Ga)P, выращенных на подложках (211)A и (322)A, была продемонстрирована лазерная генерация при комнатной температуре с пороговой плотностью тока $7\text{--}10\text{ кА/см}^2$ и длиной волны излучения в диапазоне $599\text{--}603\text{ нм}$. В данной работе мы исследуем внутренние потери, внутреннюю квантовую эффективность и ватт-амперные характеристики таких лазеров.

2. Эксперимент

Структуры выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках GaAs (211)A и (322)A, легированных Si ($\sim 2 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$), далее будут обозначаться как (211)A и (322)A соответственно. Схематическое изображение эпитаксиальной структуры представлено на рис. 1. Для улучшения морфологии поверхности вначале был выращен буферный слой GaAs толщиной 0.3 мкм , легированный Si ($\sim 10^{18}\text{ см}^{-3}$). После буферного слоя выращивался непрямозонный эмиттер $(\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ толщиной 1 мкм , легированный Si (степень легирования постепенно снижалась от $\sim 2 \cdot 10^{18}$ до $\sim 5 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$). Затем был выращен связанный волновод $(\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$, содержащий пассивную и активную части, разделенные промежуточным тонким слоем с малым показателем преломления. В середине активной части находились 4 слоя вертикально-связанных узкозонных областей $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{P}$, разделенных согласованными по параметру решетки слоями $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$.

Рост на подложках GaAs, сильно разориентированных от направления (100) в сторону (111), приводит к спонтанному нанокорругированию поверхности и (или) формированию квантово-размерных структур даже в отсутствие сильных напряжений из-за несоответствия параметров решетки [25–28].

Изображение внедрений $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{P}$ в лазерной структуре, выращенной на подложке GaAs (322)A в проекции (110), показано на рис. 2. На картах распределения напряжений в направлении параллельно слоям (рис. 2, b) по отношению к матрице $\text{Ga}_{0.21}\text{Al}_{0.3}\text{In}_{0.49}\text{P}$ наблюдается наклонный контраст напряжений, характерный для вертикально-коррелированного роста напряженных доменов (отмечено линиями).

Каждый слой квантовых точек формировался осаждением 4 нм $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ ($x \sim 38\text{--}40\%$). Для предотвращения утечки электронов из активной области в верхних слоях структуры на границе между активным волноводом и *p*-эмиттером выращивался барьер из твердого раствора InGaAlP, состоящий из четырех широкозонных барьерных вставок с высоким содержанием Ga, каждая толщиной 2 нм , разделенных тремя слоями $(\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ с толщинами $10, 7$ и 5 нм . Различные толщины слоев между широкозонными барьерными вставками были использованы для предотвращения резонансного туннелирования электронов через энергетические уровни между узкозонными слоями. Таким

образом, четыре вставки с большим содержанием Ga действуют как одиночный барьер толщиной 30 нм . За барьером выращивался эмиттер *p*-типа $(\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$, степень легирования которого увеличивалась от $5 \cdot 10^{17}$ до 10^{18} см^{-3} . Сверху был выращен контактный слой GaAs толщиной 0.2 мкм , легированный Be (10^{18} см^{-3}).

Использование связанного волновода позволяет уменьшить угловую расходимость лазерного луча в вертикальной плоскости [29]. Структуры имеют следующие ключевые особенности (см. рис. 1): 1) активные слои, состоящие из квантовых ям, имеют более глубокий потенциал локализации для дырок ($\sim 230\text{ мэВ}$), чем для электронов ($\sim 120\text{ мэВ}$), что создает проблему, связанную с тепловым выбросом электронов из активной среды; 2) высота барьера для неравновесных электронов для структуры (322)A выше, чем для (211)A.

Лазерные диоды для исследования ЭЛ были изготовлены в полосковой геометрии с шириной полоска 50 мкм . Полоски были ориентированы так, что грани лазера, перпендикулярные полоскам, соответствовали плоскостям скола (011̄). Длина резонатора была в диапазоне $0.25\text{--}2.0\text{ мм}$, диэлектрические зеркала на грани резонатора не наносились. Контактное сопротивление составляло $\sim 5 \cdot 10^{-4}\text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Диоды монтировались *p*-стороной вниз на медный теплоотвод при помощи индиевого припоя. Измерения спектров электролюминесценции и зависимости мощности излучения от тока проводились в импульсном режиме при длительности импульсов тока 100 нс и частоте повторения 4 кГц .

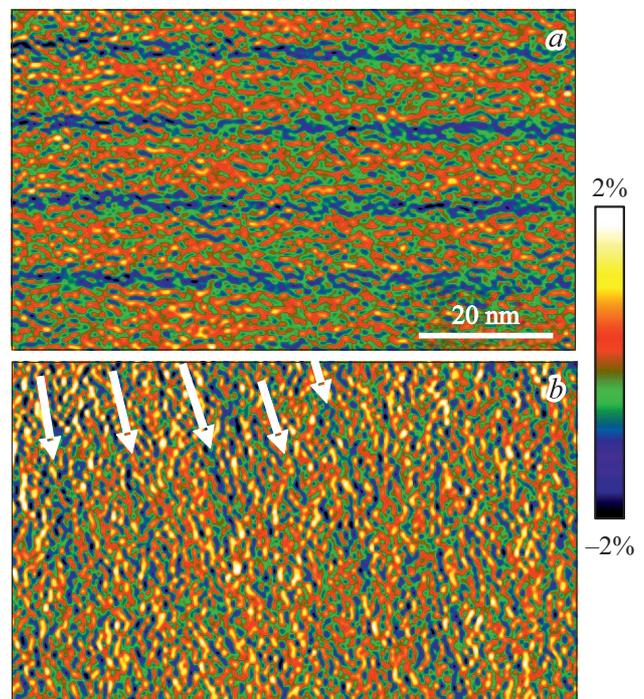


Рис. 2. Изображение внедрений $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{P}$ в лазерной структуре, выращенной на подложке GaAs (322)A в проекции (110). Показаны карты распределения напряжений в направлении перпендикулярно слоям (a) и параллельно слоям (b) по отношению к матрице $\text{Ga}_{0.21}\text{Al}_{0.3}\text{In}_{0.49}\text{P}$.

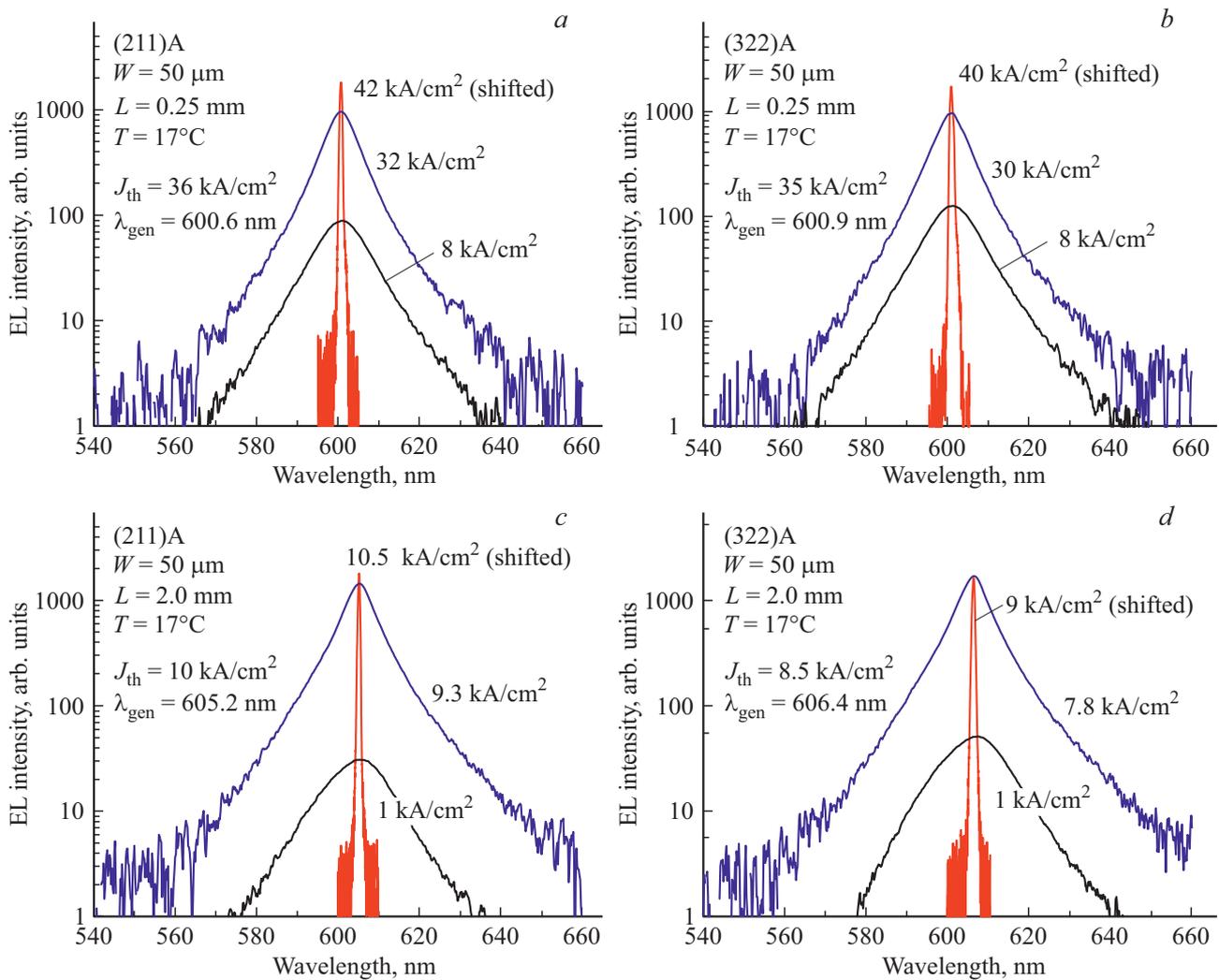


Рис. 3. Спектры ЭЛ при комнатной температуре при различных токах накачки для лазерных диодов с длиной резонатора 0.25 и 2 мм, выращенных на подложках (211)А и (322)А.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны спектры спонтанного излучения и лазерной генерации при комнатной температуре для лазерных чипов длиной 0.25 и 2.0 мм. Длина волны генерации варьировалась по эпитаксиальной пластине в пределах 599–604 нм для обеих ориентаций подложки. Для лазеров длиной 2 мм, выращенных на подложке GaAs (322)А, пороговая плотность тока была ниже (8.5 кА/см^2), чем для лазеров той же длины, выращенных на подложке GaAs (211)А (10 кА/см^2). С уменьшением длины лазера пороговая плотность тока возрастает вследствие увеличения внешних потерь, причем для всех длин резонатора ее значение меньше для лазеров, выращенных на подложке GaAs (322)А, по сравнению со случаем (211)А. Исследования картины распределения дальнего поля в вертикальном направлении показали, что излучение имеет одномодовый характер, полная ширина на половине максимума (FWHM) хорошо со-

ответствует значению, полученному при моделировании (FWHM $\sim 24^\circ$).

На рис. 4 представлены зависимости пороговой плотности тока и обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора лазерных диодов, изготовленных из структур (322)А и (211)А. Из наклона зависимости обратной дифференциальной эффективности от длины резонатора L были определены внутренние потери α_i и внутренняя квантовая эффективность η_i . Для обоих лазеров внутренняя квантовая эффективность составила 4%. Внутренние потери лазеров, изготовленных из структур (322)А и (211)А, составили 3 и 6 см^{-1} соответственно. Меньшие потери в лазерах, выращенных на подложке (322)А, могут быть связаны с более высоким барьером для неравновесных электронов (рис. 1).

Как следует из полученных данных, лазерные структуры обладают большим коэффициентом усиления, достаточным для поддержания генерации в желто-оранжевом диапазоне вплоть до длины резонатора 200 мкм (пороговое усиление $\sim 50 \text{ см}^{-1}$). Данное наблюдение особенно

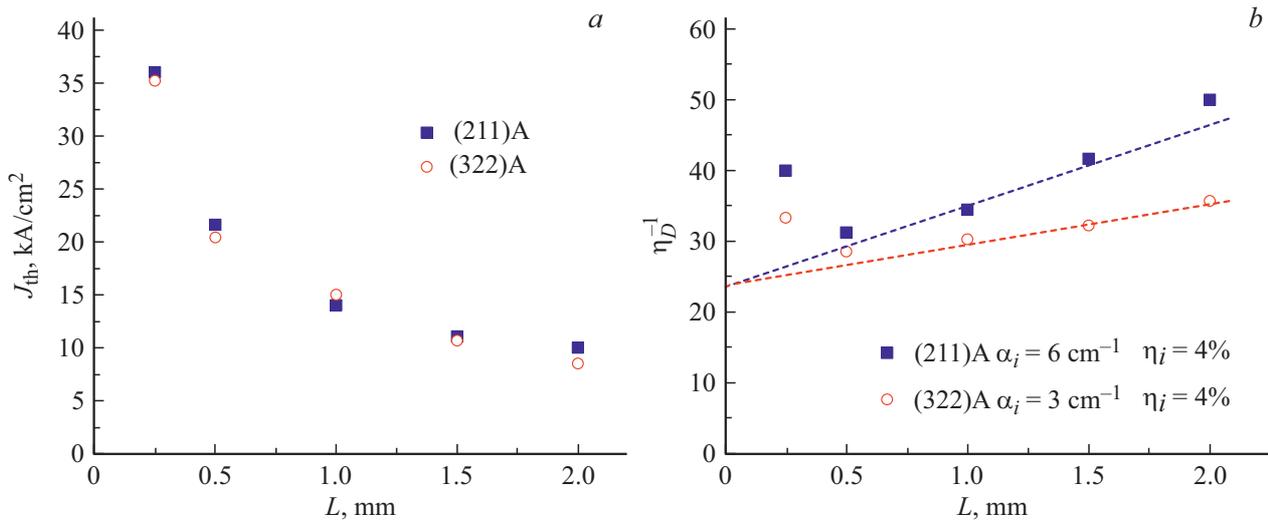


Рис. 4. Зависимости от длины резонатора плотности порогового тока (а) и обратной дифференциальной эффективности (b) лазерных диодов, выращенных на подложках GaAs (322)A и (211)A.

важно для конструирования вертикально-излучающих лазеров желтого спектрального диапазона. При этом, внутренняя квантовая эффективность при комнатной температуре мала, что говорит о высокой роли перехода неравновесных носителей в непрямои минимум зоны проводимости.

На рис. 5 показаны ватт-амперные характеристики лазеров при импульсной накачке с длиной резонатора 0.5 мм, выращенных на подложках (211)A и (322)A. Максимальная достигнутая оптическая мощность была ограничена значением ~ 800 мВт, при дальнейшем увеличении тока накачки происходила катастрофическая оптическая деградация зеркал из-за перегрева и повреждения лазерных граней. Тот факт, что мощность была ограничена именно эффектом катастрофической деградации, а не внутренними параметрами лазера, подтверждается

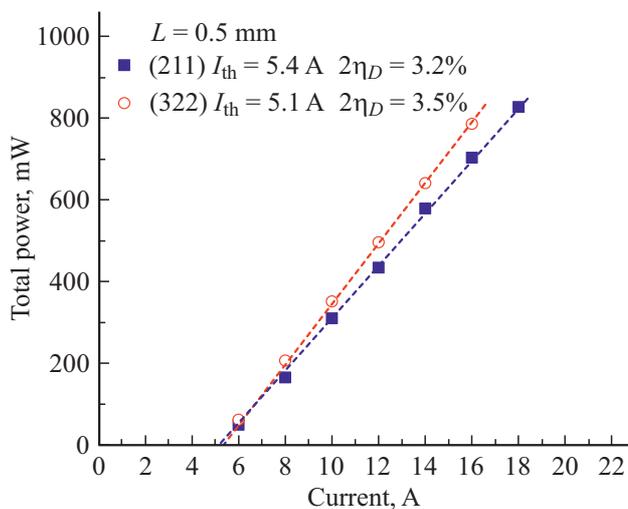


Рис. 5. Ватт-амперные характеристики лазерных диодов длиной 0.5 мм, выращенных на подложках GaAs (322)A и (211)A.

тем, что максимальная мощность ~ 800 мВт была предельной для лазеров различных длин от 0.5 до 2 мм. Перегрев лазера и тепловой загиб ватт-амперной характеристики наблюдался только в наиболее коротких приборах, длиной 0.25 мм. Для увеличения максимальной мощности в импульсном режиме необходимо пассивировать лазерные грани и уменьшать интенсивность электромагнитного поля на торцах лазеров путем нанесения диэлектрических зеркал. Тем не менее в импульсном режиме была достигнута средняя мощность 0.32 мВт. При более высоких коэффициентах заполнения, сохраняя длительность импульса и увеличивая частоту повторения с 4 до 40 кГц, стало возможным достичь более высоких уровней средней мощности — 3 мВт, достаточных для ряда важных практических применений на длине волны 600 нм.

4. Заключение

Исследованы лазеры, выращенные с использованием разработанного нами ранее оригинального метода, направленного на расширение диапазона излучения полупроводниковых светоизлучающих приборов на основе InGaAlP в желто-оранжевую область спектра. Сочетание эпитаксиального роста на высокоиндексных подложках GaAs, сильно наклоненных от поверхности (100) по направлению к $\langle 111 \rangle$, а именно на подложках (211)A и (322)A, с одной стороны, и использование напряженно-растянутых барьерных слоев InGaAlP с большим содержанием Ga, действующих как блокирующие слои для неравновесных электронов с увеличенной высотой барьера, с другой стороны, позволило получить лазерную генерацию в диапазоне 599–605 нм при комнатной температуре. Дальнейшая оптимизация активной среды и барьеров позволит улучшить характеристики желто-оранжевых лазеров и, возможно, получить генерацию в зеленой области спектра при комнатной температуре.

Финансирование работы

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 17-52-16014 НЦНИЛ_а).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K.V. Chellappan, E. Erden, H. Urey. *Appl. Optics*, **49** (25), F79 (2010).
- [2] N. Ledentsov, V. Shchukin. US Patent Application Publication US20170332071A1 (2017).
- [3] H. Jorke, M. Fritz. *Proc. SPIE—IS&T Electronic Imaging, SPIE*, **6055**, 60550G (2006).
- [4] D. Bohn. „Intel made smart glasses that look normal“. *The Verge* 2, Feb. 5 (2018). <https://www.theverge.com/2018/2/5/16966530/intel-vaunt-smart-glasses-announced-ar-video>.
- [5] P. Avci, A. Gupta, M. Sadasivam, D. Vecchio, Z. Pam, N. Pam, M.R. Hamblin. *Semin. Cutan. Med. Surg.*, **32** (1), 41 (2013).
- [6] W.G. Telford. *Methods Cell. Biol.*, **102**, 375 (2011).
- [7] S. Choudhary, K. Nouri, L. Elsaie. *Lasers Med. Sci.*, **24**, 971 (2009).
- [8] M. Mueller. *SPIE Proc.*, **TT69** (2006).
- [9] M. Dallesasse, D.W. Nam, D.G. Deppe, N. Holonyak, R.M. Fletcher, C.P. Kuo, T.D. Osentowski, M.G. Craford. *Appl. Phys. Lett.*, **53** (19), 1826 (1988).
- [10] R.V. Chelakara, M.R. Islam, J.G. Nedd, K.G. Fertitta, A.L. Holmes, F.J. Ciuba, R.D. Dupuis. *J. Cryst. Growth*, **145** (1–4), 179 (1994).
- [11] R.V. Chelakara, M.R. Islam, J.G. Neff, K.G. Fertitta, A.L. Holmes, F.J. Ciuba, R.D. Dupuis, T.A. Richard, N. Holonyak, jr., K.C. Hsieh. *Appl. Phys. Lett.*, **65** (7), 854 (1994).
- [12] W.J. Choi, P.D. Dapkus. *IEEE LEOS Annual Meeting Conf. Proc.*, **2**, 533 (1999).
- [13] W.R. Hitchens, N. Holonyak, jr., P.D. Wright, J.J. Coleman. *Appl. Phys. Lett.*, **27** (4), 245 (1975).
- [14] M. Ikeda, M. Honda, Y. Mori, K. Kaneko, N. Watanabe. *Appl. Phys. Lett.*, **45** (9), 964 (1984).
- [15] X.A. Valster, M.N. Finke, M.J.B. Boermans, J.M.M.V.D. Heijden, C.J.G.R. Spreuwenberg, C.T.H.F. Liednbaum. 12th Int. Semiconductor Laser Conf. (Davos, Switzerland), Post–deadline paper vol. PD-12, p. 25 (1990).
- [16] H. Hamada, K. Tominaga, M. Shono, S. Honda, K. Yodoshi, T. Yamaguchi. *Electron. Lett.*, **28** (19), 1834 (1992).
- [17] T. Tanaka, H. Yanagisawa, M. Takimoto, S. Minagawa. *Electron. Lett.*, **29** (21), 1864 (1993).
- [18] P.D. Bour, D.W. Treat, K.J. Beernink, B.S. Krusor, R.S. Geels, D.F. Welch. *IEEE Trans. Photon. Technol. Lett.*, **6** (2), 128 (1994).
- [19] H. Hamada. *Materials*, **10**, 875 (2017).
- [20] J.A. Lott, K.J. Malloy. Orange vertical cavity surface emitting lasers. In: *CLEO/Pacific Rim'95, Pacific Rim Conf. on Lasers and Electro-Optics* (OSA, 1995) p. 258.
- [21] M.A. Majid, A.A. Al-Jabr, R.T. Elafandy, H.M. Oubei, M.S. Alias, B.A. Alnahhas, D.H. Anjum, T.Kh. Ng, M. Shehata, B.S. Ooi. *Proc. SPIE*, **9767**, Novel In: Plane Semiconductor Lasers XV, 97670A (7 March 2016).
- [22] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, Yu.M. Shernyakov, M.M. Kulagina, A.S. Payusov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, N.A. Cherkashin. *Semicond. Sci. Technol.*, **32** (2), 025016 (2017).
- [23] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, J. Lyytikäinen, O. Okhotnikov, Yu.M. Shernyakov, A.S. Payusov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, S. Schlichting, F. Nippert, A. Hoffmann. *Appl. Phys. Lett.*, **105** (18), 181902 (2014).
- [24] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, J. Lyytikäinen, O. Okhotnikov, N.A. Cherkashin, Yu.M. Shernyakov, A.S. Payusov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, S. Schlichting, F. Nippert, A. Hoffmann. *Proc. SPIE*, **9383**, 93830E (2015).
- [25] R. Nötzel, N.N. Ledentsov, L. Däweritz, M. Hohenstein, K. Ploog. *Phys. Rev. Lett.*, **67** (27), 3812 (1991).
- [26] R. Nötzel, J. Temmyo, T. Tamamura, T. Fukui, H. Hasegawa. *Europhys. News*, **27** (4), 148 (1996).
- [27] V.A. Shchukin, A.I. Borovkov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Phys. Rev. B*, **51**, 10104 (1995).
- [28] N.N. Ledentsov, D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Gerthsen, I.P. Soshnikov, V.A. Shchukin, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zukov, V.A. Volodin, M.D. Efremov, V.V. Preobrazhenskii, B.P. Semyagin, D Bimberg, Zh.I. Alferov. *J. Electron. Mater.*, **30** (5), 463 (2001).
- [29] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, M.V. Maximov, N.Yu. Gordeev, N.A. Kaluzhnyi, S.A. Mintairov, A.S. Payusov, Yu.M. Shernyakov. *Proc. SPIE*, **9733**, 97330P (2016).

Редактор Г.А. Оганесян

InGaAlP/GaAs injection lasers of orange optical range (~ 600 nm)

A.M. Nadtochiy¹, Yu.M. Shernyakov², M.M. Kulagina², A.S. Payusov², N.Yu. Gordeev², M.V. Maximov¹, A.E. Zhukov¹, T. Denneulin^{3,4}, N. Cherkashin⁴, V.A. Shchukin⁵, N.N. Ledentsov⁵

¹ St. Petersburg Academic University, 194021 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

³ Peter Grünberg Institut (PGI-5), 52425 Jülich, Germany

⁴ CEMES–CNRS, 31055 Toulouse Cedex 4, France

⁵ VI Systems GmbH, 10623 Berlin, Germany

Abstract Lasing in orange spectral range (599–605 nm) in $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ –GaAs laser diodes grown by MOVPE on GaAs substrates (211) and (322) was demonstrated. The active region consisted of 4 layers of $n_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ vertically coupled quantum dots. Carrier leakage from the active area was suppressed by using barriers formed with 4 quantum-sized layers of InGaAlP with high Ga content. The maximum optical power in the pulsed regime was limited by catastrophic optical mirror degradation and reached 800 mW. Lower threshold current density, higher differential efficiency, and lower internal losses were demonstrated by lasers processed from epitaxial structures grown on (322)A substrates in comparison to those grown on (211)A. This fact is due to the higher energy barrier for electrons in the first case.