

Генерация квантово-каскадных лазеров на длине волны излучения $9.6 \mu\text{m}$

© А.В. Бабичев,¹ Г.А. Гусев,² А.Н. Софронов,² Д.А. Фирсов,² Л.Е. Воробьев,² А.А. Усикова,¹ Ю.М. Задиранов,¹ Н.Д. Ильинская,¹ В.Н. Неведомский,¹ В.В. Дюделев,¹ Г.С. Соколовский,^{1,3} А.Г. Гладышев,⁴ Л.Я. Карачинский,^{1,4,5}, И.И. Новиков,^{1,4,5} А.Ю. Егоров^{5,¶}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197376 Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО „Коннектор Оптик“,
194292 Санкт-Петербург, Россия

⁵ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

¶ e-mail: anton.egorov@connector-optics.com

(Поступило в Редакцию 2 марта 2018 г.)

Продемонстрирована генерация полосковых квантово-каскадных лазеров (ККЛ), изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на длине волны излучения $9.6 \mu\text{m}$ в импульсном режиме накачки при температуре 140 К. Активная область основана на конструкции с трехфононным резонансным рассеянием электронов. При построении периодов ККЛ использована гетеропара твердых растворов $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$. Применена геометрия волновода с толстой верхней обкладкой на основе $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. Исследованы вплавной и невплавной типы нижней металлизации. Плотность порогового тока для полоскового лазера длиной 1 мм и шириной $27 \mu\text{m}$ составила $\sim 3.0 \text{ kA/cm}^2$ при температуре 87 К. Оценочное значение выходной оптической мощности составляет 20–35 мВт.

DOI: 10.21883/JTF.2018.10.46502.99-18

Введение

В настоящее время существует два подхода к формированию длинноволновых квантово-каскадных лазеров (ККЛ) спектрального диапазона 8–12 μm . Основной подход состоит в выращивании активной области на основе гетеропары $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ на подложке InP . Альтернативный подход — в формировании квантово-каскадных лазеров на основе гетеропары $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ на поверхности GaAs . Последние демонстрируют большие пороговые токи в сравнении с ККЛ, сформированными на поверхности InP , что ограничивает работу ККЛ, выращенных на подложках GaAs , в непрерывном режиме [1]. Использование напряженных гетеропар $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ при построении длинноволновых ККЛ, с одной стороны, позволяет увеличить разрыв зоны проводимости, с другой стороны, приводит к увеличению рассеяния электронов за счет непрямых переходов на энергетические уровни в X , L долинах при междолинном рассеянии носителей заряда [2,3].

К настоящему моменту ККЛ с длиной волны излучения $\sim 9 \mu\text{m}$, выращенные на подложках InP , используют конструкции активных областей на основе: трех квантовых ям [4], двух- [5–9] и трехфононного резонансного рассеяния электронов [10], переходов „связанное состояние–непрерывный спектр“ [2,11], набора кванто-

вых ям, а также набора барьеров с различным составом по индию [12,13], безинжекторной конструкции с двухфононным резонансным рассеянием электронов [14], с непрямой схемой накачки [15], с двумя верхними уровнями [16], на основе переходов „непрерывный спектр–связанное состояние“ [17], с нерезонансным выбросом носителей заряда [18,19], с выбросом электронов за счет однофононного опустошения нижнего уровня в континуум [20,21].

Эффективный рост указанных конструкций может осуществляться как методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), так и методом металлоорганической газовой эпитаксии (МОГФЭ). Однако наивысшую выходную оптическую мощность при работе в непрерывном режиме (2 W) и коэффициент полезного действия (КПД) порядка 10% на длине волны излучения $\sim 9 \mu\text{m}$ демонстрируют ККЛ, выращенные МПЭ [18]. При этом максимальная выходная оптическая мощность и КПД ККЛ, выращенных МОГФЭ, составляют 1.4 W и 6.8% соответственно [21,22].

В настоящей работе представлены результаты исследований оптических характеристик ККЛ, выращенных методом МПЭ с конструкцией активной области на основе трехфононного резонансного рассеяния электронов, излучающих в импульсном режиме накачки на длине волны $9.6 \mu\text{m}$.

Эксперимент

Гетероструктура ККЛ выращена в ООО „Коннектор Оптик“ на промышленной установке МПЭ Ribet 49, оснащенной твердотельным источником мышьяка крестерного типа и источниками марки ABI 1000 для создания потоков галлия и индия [23,24]. Подложка InP ориентацией (001) легирована серой до уровня $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Нижняя обкладка волновода сформирована на основе последовательно выращенных слоев $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с толщинами 50 и 2000 nm и уровнем легирования кремнием $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ соответственно. Активная область, включающая 40 квантовых каскадов, сформирована на основе ненапряженных квантовых ям состава $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с потенциальными барьерами $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. Для построения каскада использована конструкция активной области с трехфоновым резонансным рассеянием носителей заряда [10,25]. После выращивания каскадов формировался волноводный слой InGaAs толщиной 2000 nm и уровнем легирования $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Верхняя обкладка выращена на основе слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с переменным уровнем легирования $1 \cdot 10^{17}$ и $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ суммарной толщиной $4 \mu\text{m}$. Использование толстых обкладок позволило повысить фактор оптического ограничения световой волны и, как следствие, осуществить более равномерную прокачку 40 каскадов. Контактный слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной $0.2 \mu\text{m}$ легирован кремнием до уровня $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Описание дизайна гетероструктуры ККЛ представлено в [26].

Формирование полоска лазера начиналось с вытравливания глубокой мезы жидкостным химическим травлением через маску фоторезиста. В качестве травителя использовался раствор $\text{HBr} : \text{H}_2\text{O}$. Далее проводилась пассивация боковых стенок мезы методом взрывной литографии. На верхней части полоска для создания окна под металлизацию формировалась маска из фоторезиста, закрывающая основную часть контактного слоя. В качестве пассивации боковых стенок мезы для длинноволновых ККЛ используется нитрид кремния Si_3N_4 , в то время как на длинах волн менее $6 \mu\text{m}$ применяется оксид кремния SiO_2 . В свою очередь, диоксид титана TiO_2 демонстрирует наименьшее поглощение на длинах волн $8-11 \mu\text{m}$ в сравнении с оксидом и нитридом кремния [27,28]. Поэтому в настоящей работе методом магнетронного распыления последовательно наносились слои $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ с толщинами 40 и 140 nm соответственно. После удаления маски в диэлектрическом слое образуется окно для напыления верхнего омического контакта, в качестве которого использовалась неплавная система Cr/Au (суммарная толщина 470 nm). Перед напылением нижнего металлического контакта пластины утонялись до толщины $150-160 \mu\text{m}$. В качестве нижней металлизации применены две схемы: на основе неплавных контактов Ti/Au (суммарная толщина 230 nm), а также схема на основе впаивных контактов $\text{Au}-\text{Ge}/\text{Ni}/\text{Au}$ (суммарная толщина 300 nm, отжиг при температуре 370°C

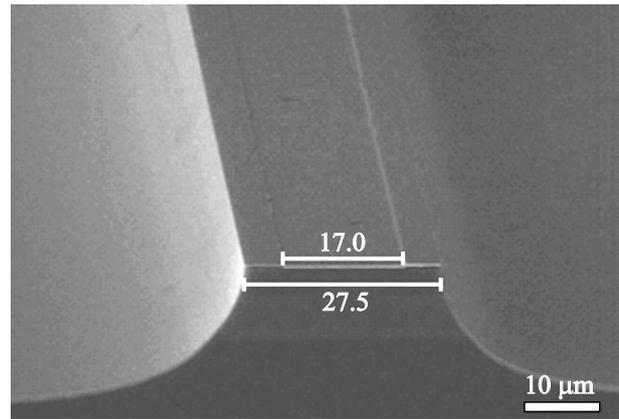


Рис. 1. Типичное изображение изготовленного полоскового ККЛ, полученное методом сканирующей электронной микроскопии.

в атмосфере водорода) и нанесением дополнительного усиления Cr/Au (суммарная толщина — 240 nm). Напыление сплошного лицевого контакта проводили на последней стадии изготовления прибора. Лазерные чипы формировались скальванием. Ширина полосков (вблизи поверхности гетероструктуры) составляла $27 \mu\text{m}$, длина резонатора соответствовала 1.0 mm.

На рис. 1 представлено типичное изображение ККЛ, полученное при помощи сканирующей электронной микроскопии. Отражающее и антиотражающее покрытия на сколотые грани лазера не наносились. Монтаж производился подложкой вниз на посеребренный медный теплоотвод. Смонтированные на теплоотвод экспериментальные образцы ККЛ загружались в криостат с выходным окном, изготовленным из ZnSe (с оптической прозрачностью 70% в исследуемом спектральном диапазоне), оснащенный системой контроля температуры в диапазоне $77-300 \text{ K}$, где производились исследования их электролюминесцентных свойств. Измерительная схема и детали эксперимента аналогичны представленным в [26]. Длительность импульсов токовой накачки составляла $0.1-2.0 \mu\text{s}$, частотный диапазон следования импульсов составлял $0.1-10 \text{ kHz}$. Ток, пропускаемый через исследуемый образец, контролировался по падению напряжения на последовательно включенном сопротивлении номиналом 1Ω . Форма импульсов подаваемого напряжения и тока на измеряемых образцах контролировалась с помощью цифрового осциллографа. В ходе эксперимента использован фурье-спектрометр Bruker Vertex 80v, работающий в режиме пошагового сканирования, совмещенный с охлаждаемым детектором HgCdTe . Образцы в криостате размещались в фокусе входного порта фурье-спектрометра. Сигнал с фотоприемника измерялся импульсным синхронным детектором SR250 (в случае измерения спектров спонтанного излучения) и напрямую с помощью АЦП спектрометра. Спектральное разрешение составило 16 и 0.4 cm^{-1} для случаев измерения спектров спонтанного и стимули-

рованного излучений соответственно. Быстродействие фотодетектора составляло порядка 100 ns . Выходная оптическая мощность оценивалась по измерению средней мощности с помощью калиброванного измерителя с учетом скважности и длительности прикладываемых импульсов напряжения.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов были исследованы два типа полосковых лазеров, отличающихся схемами нижней металлизации: на основе последовательно нанесенных вплавных Au-Ge/Ni/Au и Cr/Au слоев, а также на основе неплавных контактов Ti/Au . Вольт- и ватт-амперные характеристики, измеренные при 86 K , представлены на рис. 2. Пороговый ток исследуемых образцов находится в диапазоне $800\text{--}860 \text{ mA}$, что соответствует плотностям порогового тока в диапазоне $3.0\text{--}3.2 \text{ kA/cm}^2$. Представленные в литературе минимальные плотности порогового тока ККЛ на длине волны излучения $8.6 \mu\text{m}$ в конструкции активной области на основе схемы с трехфононным опустошением нижнем уровня находятся в диапазоне $1.2\text{--}1.5 \text{ kA/cm}^2$ [10]. Дополнительный разогрев гетероструктуры вследствие использования InGaAs в качестве нижней обкладки (теплопроводность InGaAs

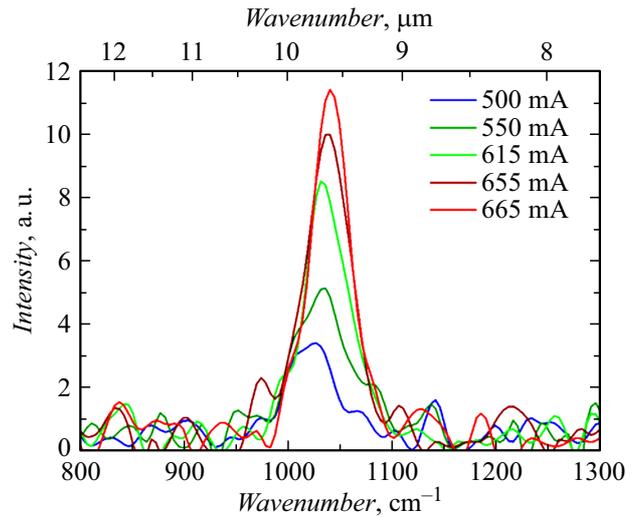


Рис. 3. Спектры спонтанного излучения, измеренные при температуре 87 K при различных токах накачки. Нижний спектр соответствует току накачки 500 mA . Верхний спектр соответствует току 665 mA . Виден рост интенсивности и коротковолновый сдвиг максимума электролюминесценции с увеличением тока накачки с 500 до 665 mA .

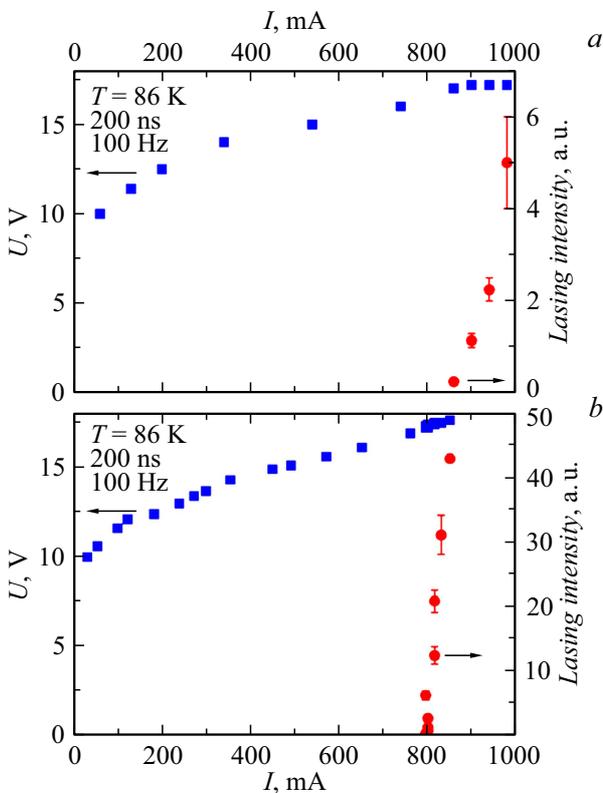


Рис. 2. Вольт- и ватт-амперные характеристики, измеренные для двух типов ККЛ с различными схемами нижней металлизации: *a* — на основе вплавных контактов Au-Ge/Ni/Au с последующим нанесением Cr/Au ; *b* — на основе неплавных контактов Ti/Au .

в $10\text{--}15$ раз ниже InP [29]) и использование сильнолегированной подложки (приводит к дополнительным потерям за счет рассеяния на свободных носителях заряда) приводят к большим значениям плотностей порогового тока в сравнении с результатами, представленными в [10,30–32]. Отметим, что исследованные образцы с нижней металлизацией Ti/Au демонстрируют более высокую крутизну ватт-амперной характеристики (дифференциальную эффективность). В силу наличия дополнительных потерь, связанных с использованием сильнолегированной подложки, исследованные гетероструктуры демонстрируют большую крутизну в сравнении со случаем гетероструктур, сформированных на низколегированной подложке. Данное поведение аналогично случаю, наблюдаемому в лазерах с просветляющим поглотителем.

Спектры спонтанного излучения (рис. 3) демонстрируют пик с полушириной на полувысоте порядка $5\text{--}8 \text{ meV}$. Данная величина с учетом небольшого среза длинноволновой части спектров резким падением чувствительности фотоприемника после $10 \mu\text{m}$ соотносится с литературными данными для гетероструктур ККЛ, выращенных методом МПЭ [18,28], а также МОГФЭ [21]. Рост тока с 500 до 665 mA приводит к последовательному увеличению интенсивности электролюминесценции и сдвигу максимума излучения в коротковолновую область (с 9.7 до $9.6 \mu\text{m}$).

Типичные спектры лазерной генерации, измеренные при различной температуре, представлены на рис. 4. При 87 K наблюдается генерация на длине волны излучения $\lambda = 9.46 \mu\text{m}$. Рост температуры до 140 K приводит к сдвигу длины волны до $9.58 \mu\text{m}$. Межмодовое

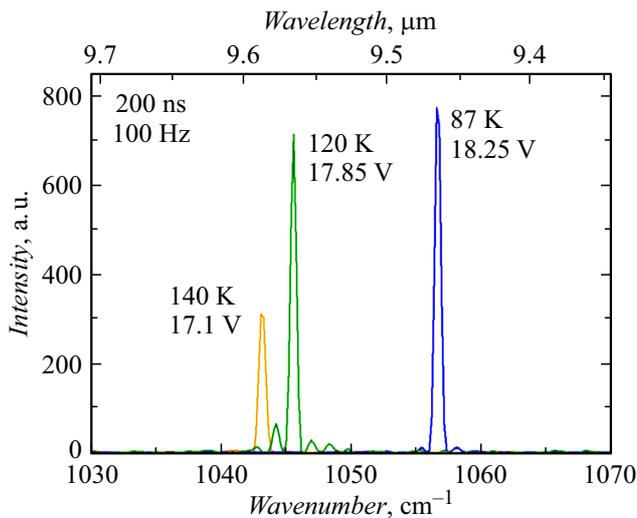


Рис. 4. Спектры стимулированного излучения ККЛ, измеренные при различных температурах.

расстояние между продольными модами $\Delta\lambda$ составляет $\sim 0.013 \mu\text{m}$. Эффективный показатель преломления для основной моды $n_{\text{eff}} = \lambda^2 / (2L\Delta\lambda) = 3.5$, где L — длина резонатора. Расчетное значение коэффициента отражения зеркал, $R_{\text{eff}} = (n_{\text{eff}} - 1)^2 / (n_{\text{eff}} + 1)^2$ составляет 0.31. Коэффициент потерь на зеркалах $\alpha_m = \ln(R_{\text{eff}}) / L$ составляет 11.7 cm^{-1} .

В исследуемых образках произведена оценка выходной оптической мощности. Измеряемая детектором мощность составляет порядка 0.1 от мощности на торце ККЛ (на основе учета диаметра чувствительной площадки измерителя мощности (11 mm), расстояния до торца ККЛ (30 mm), типичной расходимости пучка ($\sim 60^\circ$)). Как упоминалось выше, окно ZnSe имеет коэффициент пропускания равный 70%. Оценочное значение мощности на торце лазера составляет 20–35 mW.

Заключение

В ходе работы продемонстрирована генерация полосковых лазеров, изготовленных методом МПЭ. Активная область построена на основе 40 квантовых каскадов с трехфононным резонансным рассеянием электронов с использованием ненапряженной гетеропары твердых растворов $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As} / \text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$. Применены два типа нижнего контакта (вплавной и невплавной). ККЛ с невплавными контактами Ti/Au демонстрируют более высокую дифференциальную эффективность в сравнении со случаем вплавной металлизации. Достигнутая высокая крутизна ватт-амперной характеристики обусловлена, в том числе, геометрией волновода, обеспечивающей равномерную прокачку всех каскадов ККЛ. Продемонстрирована лазерная генерация в импульсном режиме при температуре 140 K на длине волны излучения $9.6 \mu\text{m}$. Оценочное значение выходной оптической

мощности составляет 20–35 mW. Необходима дальнейшая оптимизация гетероструктуры ККЛ для повышения лазерных характеристик.

Настоящая работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.“, шифр 2017-14-588-0004, уникальный идентификатор RFMEFI61617X0074.

Список литературы

- [1] Sirtori C., Teissier R. In: Quantum Cascade Lasers: Overview of Basic Principles of Operation and State of the Art / Ed. by R. Paiella. NY: McGraw-Hill, 2006 p. 1.
- [2] Troccoli M., Wang X., Fan J. // Opt. Eng. 2010. Vol. 49. N 11. P. 111106. DOI: 10.1117/1.3498778
- [3] Masselink W.T., Semtsiv M.P., Elagin M., Flores Y.V., Monastyrskiy G., Kurlov S., Kischkat J. // Proc. SPIE. Vol. 8898. P. 889805. DOI: 10.1117/12.2028225
- [4] Gmachl C., Capasso F., Faist J., Hutchinson A.L., Tredicucci A., Sivco D.L., Baillargeon J.N., Chu S.N.G., Cho A.Y. // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72. N 12. P. 1430. DOI: 10.1063/1.120585
- [5] Hofstetter D., Beck M., Aellen T., Faist J., Oesterle U., Ilegems M., Gini E., Melchior H. // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78. N 14. P. 1964. DOI: 10.1063/1.1360225
- [6] Beck M., Hofstetter D., Aellen T., Faist J., Oesterle U., Ilegems M., Gini E., Melchior H. // Science. 2002. Vol. 295. N 5553. P. 301. DOI: 10.1126/science.1066408
- [7] Pflügl C., Diehl L., Tsekoun A., Go R., Patel C.K.N., Wang X., Fan J., Tanbun-Ek T., Capasso F. // Electron. Lett. 2007. Vol. 43. N 19. P. 1026. DOI: 10.1049/el:20072162
- [8] de Naurois G.M., Carras M., Simozrag B., Patard O., Alexandre F., Marcadet X. // AIP Adv. 2011. Vol. 1. N 3. P. 032165. DOI: 10.1063/1.3643690
- [9] Liu Z., Wasserman D., Howard S.S., Hoffman A.J., Gmachl C.F., Wang X., Tanbun-Ek T., Cheng L., Choa F.-S. // IEEE Photonics Technol. Lett. 2006. Vol. 18. N 12. P. 1347. DOI: 10.1109/lpt.2006.877006
- [10] Wang Q.J., Pflügl C., Diehl L., Capasso F., Edamura T., Furuta S., Yamanishi M., Kan H. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. N 1. P. 011103. DOI: 10.1063/1.3062981
- [11] Faist J., Hofstetter D., Beck M., Aellen T., Rochat M., Blaser S. // IEEE J. Quantum Electron. 2002. Vol. 38. N 6. P. 533. DOI: 10.1109/jqe.2002.1005404
- [12] Kirch J.D., Chang C.-C., Boyle C., Mawst L.J., Lindberg D., Earles T., Botez D. // Opt. Express. 2016. Vol. 24. N 21. P. 24483. DOI: 10.1364/oe.24.024483
- [13] Kirch J.D., Chang C.-C., Boyle C., Mawst L.J., Lindberg D., Earles T., Botez D. // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. N 15. P. 151106. DOI: 10.1063/1.4917499
- [14] Katz S., Vizbaras A., Boehm G., Amann M.-C. // Semicond. Sci. Technol. 2010. Vol. 26. N 1. P. 014018. DOI: 10.1088/0268-1242/26/1/014018
- [15] Yamanishi M., Fujita K., Edamura T., Kan H. // Opt. Express. 2008. Vol. 16. N 25. P. 20748. DOI: 10.1364/oe.16.020748
- [16] Fujita K., Yamanishi M., Furuta S., Dougakiuchi T., Sugiyama A., Edamura T. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. N 18. P. 181111. DOI: 10.1063/1.4765073

- [17] Yao Y., Charles W.O., Tsai T., Chen J., Wysocki G., Gmachl C.F. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96. N 21. P. 211106. DOI: 10.1063/1.3431577
- [18] Lyakh A., Maulini R., Tsekoun A., Go R., Patel C.K.N. // *Opt. Express*. 2012. Vol. 20. N 22. P. 24272. DOI: 10.1364/oe.20.024272
- [19] Troccoli M., Lyakh A., Fan J., Wang X., Maulini R., Tsekoun A.G., Go R., Patel C.K.N. // *Opt. Mater. Express*. Vol. 3. N 9. P. 1546. DOI: 10.1364/ome.3.001546
- [20] Fujita K., Furuta S., Sugiyama A., Ochiai T., Edamura T., Akikusa N., Yamanishi M., Kan H. // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* 2010. Vol. 46. N 5. P. 683. DOI: 10.1109/jqe.2010.2048015
- [21] Wang C.A., Schwarz B., Siriani D.F., Missaggia L.J., Connors M.K., Mansuripur T.S., Calawa D.R., McNulty D., Nickerson M., Donnelly J.P., Creedon K., Capasso F. // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* 2017. Vol. 23. N 16. DOI: 10.1109/jstqe.2017.2677899
- [22] Troccoli M. // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* 2015. Vol. 21. N 6. P. 61. DOI: 10.1109/jstqe.2015.2413954
- [23] Babichev A.V., Gladyshev A.G., Filimonov A.V., Nevedomskii V.N., Kurochkin A.S., Kolodeznyi E.S., Bugrov V.E., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Bousseksou A., Egorov A.Yu. // *Tech. Phys. Lett.* 2017. Vol. 43. N 7. P. 666–669. DOI: 10.1134/s1063785017070173
- [24] Babichev A.V., Gladyshev A.G., Kurochkin A.S., Kolodeznyi E.S., Sokolovskii G.S., Bougrov V.E., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Bousseksou A.G., Egorov A.Yu. // *Semiconductors*. 2018. Vol. 52. N 8. P. 1082–1085. DOI: 10.1134/S1063782618080031.
- [25] Babichev A.V., Kurochkin A.S., Kolodeznyi E.C., Filimonov A.V., Usikova A.A., Nevedomsky V.N., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Egorov A.Yu. // *Semiconductors*. 2018. Vol. 52. N 6. P. 745–749. DOI: 10.1134/S1063782618060039
- [26] Kurochkin A.S., Novikov I.I., Karachinsky L.Y., Denisov D.V., Gladyshev A.G., Gusev G.A., Sofronov A.N., Usikova A.A., Zadiranov Y.M., Sokolovskii G.S., Ustinov V.M., Egorov A.Y. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. Vol. 917. P. 052016. DOI: 10.1088/1742-6596/917/5/052016
- [27] Ferré S., Peinado A., Garcia-Caurel E., Trinité V., Carras M., Ferreira R. // *Opt. Express*. 2016. Vol. 24. N 21. P. 24032. DOI: 10.1364/oe.24.024032
- [28] Kang J., Yang H.-D., Joo B.S., Park J.-S., Lee S., Jeong S., Kyhm J., Han M., Song J.D., Han I.K. // *Opt. Express*. 2017. Vol. 25. N 16. P. 19561. DOI: 10.1364/oe.25.019561
- [29] Evans A., Nguyen J., Slivken S., Yu J.S., Darvish S.R., Razeghi M. // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. N 5. P. 051105. DOI: 10.1063/1.2171476
- [30] Kim Y.M., Rodwell M.J.W., Gossard A.C. // *J. Electron. Mater.* 2002. Vol. 31. N 3. P. 196–199. DOI: 10.1007/s11664-002-0206-4
- [31] Missaggia L., Wang C., Connors M., Saar B., Sanchez-Rubio A., Creedon K., Turner G., Herzog W. // *Proc. SPIE*. 2016. Vol. 9730. P. 973008. DOI: 10.1117/12.2208923
- [32] Schwarz B., Wang C.A., Missaggia L., Mansuripur T.S., Chevalier P., Connors M.K., McNulty D., Cederberg J., Strasser G., Capasso F. // *ACS Photonics*. 2017. Vol. 4. N 5. P. 1225–1231. DOI: 10.1021/acsp Photonics.7b00133