

Квантовый каскадный лазер на основе гетеропары GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55}As, полученный методом МОС-гидридной эпитаксии

И.И.Засавицкий, А.Н.Зубов, А.Ю.Андреев, Т.А.Багаев, П.В.Горлачук, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.В.Лобинцов, С.М.Сапожников, А.А.Мармалюк

На основе гетеропары GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55}As создан квантовый каскадный лазер, излучающий в области длин волн 9.5 – 9.7 мкм в импульсном режиме при 77.4 К. Лазерная гетероструктура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии. Пороговая плотность тока составила 1.8 кА/см². Максимальная мощность излучения лазера с размерами 30 мкм × 3 мм и сколотыми зеркалами превысила 200 мВт.

Ключевые слова: квантовый каскадный лазер, МОС-гидридная эпитаксия, гетеропара GaAs/AlGaAs, средняя ИК область спектра.

1. Введение

Квантовый каскадный лазер (ККЛ) является униполярным прибором, основанным на межподзонных переходах в квантовых ямах. ККЛ для средней ИК области спектра (4–24 мкм) разрабатываются главным образом на согласованных по постоянной решетки или напряженных гетероструктурах типа GaInAs/AlInAs/InP. Однако имеется и другая, технологически отработанная, ставшая уже классической гетеропара GaAs/Al_xGa_{1-x}As. С точки зрения разработки ККЛ эта гетеропара обладает двумя недостатками. Во-первых, она отличается относительно малой глубиной квантовой ямы, которая составляет лишь 0.39 эВ при доле Al $x = 0.45$. В гетеропарах такого состава происходит вырождение экстремумов в зоне проводимости и становится возможным перетекание электронов в боковые X- и L-долины. Таким образом, максимальная энергия оптических переходов в квантовой яме не превышает 0.15 эВ, что позволяет получать излучение с длинами волн от 8 мкм и более. Вторым недостатком обсуждаемой гетеропары является относительно большая эффективная масса в квантовых ямах, что снижает оптическое усиление примерно в два раза по сравнению с парой GaInAs/AlInAs.

Однако отметим и достоинства гетеропары GaAs/Al_xGa_{1-x}As. Это прежде всего хорошее согласование по постоянной решетки при изменении состава твердого раствора в широких пределах. Кроме того, для создания

многих квантовых ям (в ККЛ число гетеропереходов составляет более 500) во время выращивания активной области лазера можно переключать только один прекурсор (источник элемента), а именно Al, что обеспечивает стабильность состава гетеропары, особенно важную для ККЛ. Данные преимущества в какой-то степени компенсируют перечисленные недостатки и позволяют надеяться, что на основе гетеропары GaAs/Al_xGa_{1-x}As возможно создание ККЛ для практически важной области спектра 8–12 мкм с помощью промышленного способа МОС-гидридной эпитаксии. Заметим также, что подложки из GaAs заметно дешевле подложек из InP.

ККЛ для средней ИК области спектра на основе GaAs/AlGaAs, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, впервые были продемонстрированы в работе [1]. В дальнейшем этим же методом были получены лазеры с заметно улучшенными характеристиками [2–4]. В настоящее время уже имеются приборы, работающие в импульсном режиме при 300 К [2] и генерирующие мощность излучения до 1.1 Вт при 77 К [5]. Лазеры работают и в непрерывном режиме, при этом максимальная рабочая температура достигает 150 К [6].

Лазерные гетероструктуры на основе этой же гетеропары были выращены также методом МОС-гидридной эпитаксии [7], при этом для улучшения оптического ограничения в ККЛ в качестве обкладочных слоев использовался твердый раствор In_{0.49}Ga_{0.51}P [8].

В настоящей работе сообщается о квантовом каскадном лазере на основе гетеропары GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55}As, полученном методом МОС-гидридной эпитаксии и излучающем на длине волны 9.5 – 9.7 мкм.

2. Конструкция лазерной гетероструктуры

В качестве рабочей схемы была выбрана активная область из трех квантовых ям, в которой доминирует диагональный оптический переход [3]. На рис.1 приведена рассчитанная энергетическая диаграмма ККЛ на основе гетеропары GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55}As. Расчет проведен для следующей структуры активной области: 4.6/1.9/1.1/5.4/1.1/4.8/2.8/3.4/1.7/3.0/1.8/2.8/2.0/3.0/2.6/3.0 [3], где толщины эпи-

И.И.Засавицкий, А.Н.Зубов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: zasavit@sci.lebedev.ru

А.Ю.Андреев, Т.А.Багаев, П.В.Горлачук, М.А.Ладугин, А.А.Падалица, А.В.Лобинцов, С.М.Сапожников. ОАО «НИИ “Полус” им. М.Ф.Степеля», Россия, 115409 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1

А.А.Мармалюк. ОАО «НИИ “Полус” им. М.Ф.Степеля», Россия, 115409 Москва, ул. Введенского, д. 3, корп.1; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 20 февраля 2016 г.

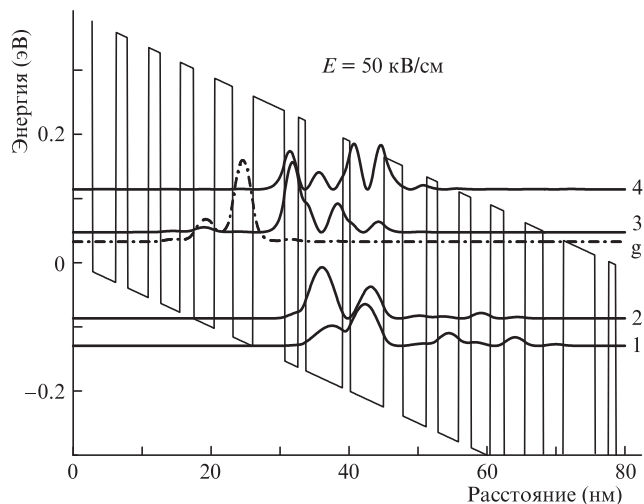


Рис.1. Рассчитанная энергетическая диаграмма ККЛ на основе гетеропары GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55}As. Приложенное электрическое поле составляет 50 кВ/см.

таксимальных слоев, начиная с инжекционного барьера, даны в нанометрах. Здесь жирным шрифтом выделены толщины барьеров, обычным – толщины квантовых ям; легированные слои указаны с нижним подчеркиванием. Расчет предполагал получение длины волны излучения в области спектра около 10 мкм. На рисунке линии 3 и 2 относятся к рабочим уровням, между которыми происходит оптический переход с энергией 135 мэВ. Уровень 1 отстоит от уровня 2 на 43 мэВ и служит для опустошения нижнего лазерного уровня путем рассеяния на продольном оптическом фоне. Ближайшим к верхнему лазерному уровню является уровень 4, он отстоит на 68 мэВ, т.е. расположен достаточно высоко для обеспечения работы лазера даже при комнатной температуре. Основной уровень инжектора g расположен ниже верхнего лазерного уровня на 15 мэВ, что обеспечивает достаточный динамический диапазон накачки лазера.

В обсуждаемой схеме активной области лазера волновые функции состояний $n = 3$ и $n = 4$ при некоторых значениях ширины барьера и внешнего электрического поля испытывают антикроссинг и дают дублет с энергетическим расщеплением ~ 50 мэВ, что допускает возможность диагонального перехода из первой квантовой ямы во вторую. Наличие диагональной схемы позволяет снизить пространственное перекрытие между состояниями $n = 3$ и $n = 2$, что уменьшает матричный элемент электрон-фононного рассеяния и увеличивает время жизни состояния $n = 3$ (до 1.4 пс [3]) по сравнению с таковым для структуры с чисто вертикальным переходом. Антикроссинг также делокализует волновую функцию уровня $n = 3$ в правую соседнюю яму, увеличивая ее перекрытие с волновой функцией нижнего лазерного уровня ($n = 2$) и предотвращая тем самым сильное уменьшение дипольного матричного элемента z_{32} (1.7 нм [3]). Недостатком диагональной схемы является увеличение числа интерфейсов из-за дополнительной ямы в активной области, что приводит к уширению спектра люминесценции и, следовательно, снижает усиление.

Для оптического ограничения активная область заключалась между двумя слоями GaAs с заданным профилем легирования, приводящим к нужному изменению показателя преломления. При таком подходе нет необходимости использовать трехкомпонентный твердый раствор

AlGaAs, что позволяет получить низкие потери в волноводе, их слабую зависимость от температуры и оптимальное рассеяние тепла [9]. Нами на данном этапе с целью надежности работы волновода добавлялись также тонкие (0.5 мкм) сильно легированные обкладочные слои Al_{0.2}Ga_{0.8}As:Si. При этом мольная доля AlAs не превышала $x = 0.22$ ($x \sim 0.3$), при котором в твердом растворе, легируемом Si, формируются глубокие уровни (DX-центры).

3. Получение и изучение лазерной гетероструктуры

Лазерные гетероструктуры были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии, который хорошо зарекомендовал себя при формировании гетероструктур с толщинами нанометрового диапазона [10–12]. Выращивание проводилось на подложках GaAs(100), легированного Si в пределах $(2–3) \times 10^{18}$ см⁻³ из моносилана. Рост осуществлялся при температурах 700–720 °С и давлении 50–100 мбар.

Для создания волновода активная область с обеих сторон окружалась слоями GaAs толщиной 2.5 мкм и с уровнем легирования 4×10^{16} см⁻³, которые, в свою очередь, окружались двумя слоями Al_{0.2}Ga_{0.8}As (0.5 мкм) и GaAs (100–200 нм) с концентрацией электронов в них 6×10^{18} см⁻³. Уровень δ -легирования в области инжектора был равен $(2–3) \times 10^{17}$ см⁻³. Активная область состояла из 36 каскадов.

Дифракционная кривая качания для отдельно выращенной активной области ККЛ (рис.2) снята для отражения (004) в рентгеновском излучении Cu(K $_{\alpha 1}$). Видно, что она высокого качества. По расстоянию между пиками дифракционной кривой вычислен период слоев гетероструктуры (45 нм), который совпадает с планируемым значением.

Измеренная на сканирующем электронном микроскопе толщина активной области составила 1.63 мкм. Таким образом, вычисленная толщина одного из 36 каскадов активной области равна 45.3 нм, что согласуется с результатом, полученным из анализа дифракционной кривой качания.

На рис.3 приведен полученный с помощью просвечивающей электронной микроскопии снимок центральной части активной области выращенной гетероструктуры. Видно, что гетерограницы являются достаточно резкими.

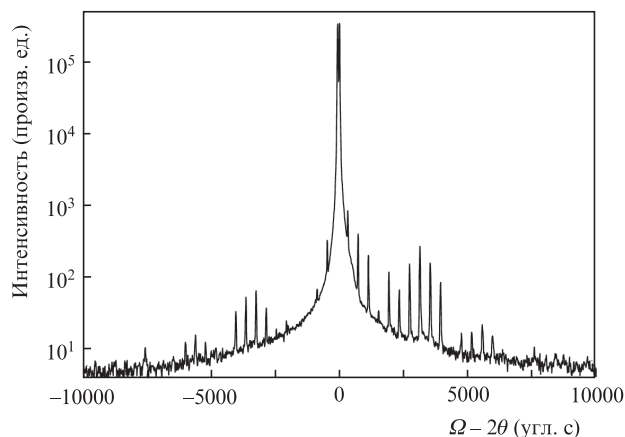


Рис.2. Дифракционная кривая качания для отдельно выращенной активной области ККЛ, снятая для отражения (004) в рентгеновском излучении Cu(K $_{\alpha 1}$).

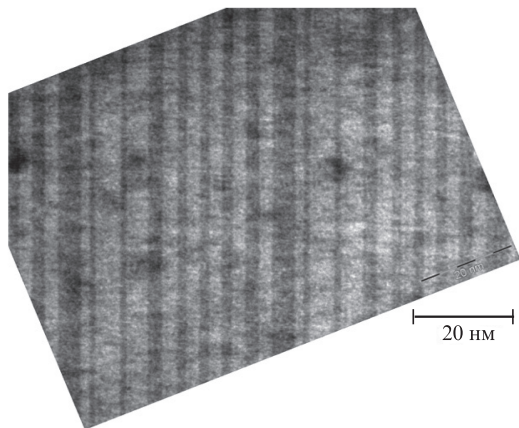


Рис.3. Изображение центральной части активной области гетероструктуры, полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа в светлом поле (GaAs – светлые полосы, AlGaAs – темные).

Толщины эпитаксиальных слоев согласуются со значениями, указанными на рис.1.

Активный элемент представлял собой мезаполосковую конструкцию с шириной мезы ~30 мкм и глубиной травления ~10 мкм. Длина резонатора составила 3 мм. Электрическая изоляция создавалась путем низкотемпературного плазмохимического осаждения пленок Si₃N₄. Для работы при низких температурах пайка осуществлялась через термокомпенсатор типа Cu–W. Кристалл располагался на медном уголковом держателе мезаполосковой «вверх» [12].

4. Результаты измерений и их обсуждение

Измерения порогового тока проводились в оптическом криостате при температуре 77.4 К. Холодным окном криостата служила просветленная пластинка из германия. Лазеры работали в импульсном режиме (1 мкс, 170 Гц). В качестве приемников интегрального излучения лазера использовались фотосопротивление на основе германия, легированного золотом, и фотодиод на основе HgCdTe. Пороговое значение тока определялось по кривой зависимости интегрального излучения от тока инжекции: вблизи порога наблюдалось, как правило, резкое (на 2–3 порядка) увеличение интенсивности излучения.

Ватт-амперная характеристика ККЛ (рис.4) показывает, что пороговый ток составляет менее 2 А, а мощность излучения в многомодовом режиме – 0.2 Вт. Для измерения средней интегральной мощности излучения использовался калориметр VEGA (OPHIR), частота следования импульсов при этом увеличивалась до 1 кГц. Для охвата области малых, недоступных для калориметра, мощностей сигналы фотоприемника и калориметра «сшивались» при импульсной мощности излучения около 10 мВт. Из рисунка видно, что в обычно используемой геометрии лазера область спонтанного излучения (ожидаемый нижний загиб на кривой) трудно достижима.

Измерения спектров излучения проводились при температуре 80 К фурье-спектрометром Vertex-70 (Bruker). В качестве окон в криостате и спектрометре использовались пластины из KBr. Фурье-спектрометр работал в режиме пошагового сканирования, приемником излучения в спектрометре служил фотодиод на основе HgCdTe.

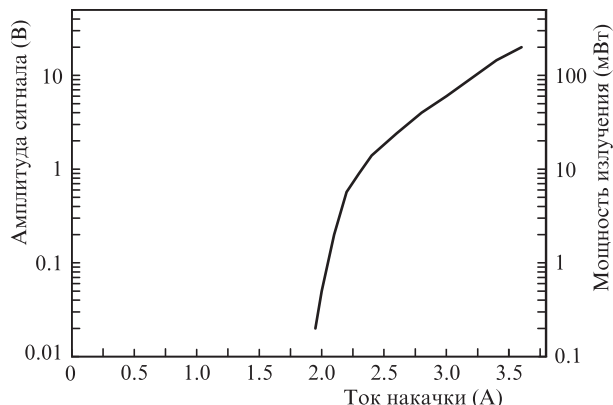


Рис.4. Ватт-амперная характеристика ККЛ, работающего в импульсном режиме (1 мкс, 170 Гц) при 77.4 К.

При токе 3 А наблюдалось появление линии вынужденного излучения, интенсивность которой резко нарастает с ростом тока. Линия соответствует генерации на одной (доминирующей) продольной моде. Как правило, такой одномодовый режим сохраняется при превышении тока над пороговым значением примерно на 10%.

Спектры многомодовой генерации при различных токах накачки показаны на рис.5. Отметим, что в соответствии с теорией при большом (7 А) токе контур усиления симметризуется, и наблюдается более 20 эквидистантных продольных мод генерации, расстояние между которыми $\Delta k = 0.49 \text{ см}^{-1}$. Отсюда оценим эффективный показатель преломления активной среды лазера: $N_{\text{eff}} = 1/(2\Delta kL) = 3.29$, где $L = 3.1 \text{ мм}$ – длина резонатора.

Значения порогового тока зависели от условий выращивания и постростовой обработки гетероструктуры и варьировались от 2 до 6 А, что соответствовало пороговой плотности тока 2 – 6 кА/см².

Оценим пороговую плотность тока ККЛ в низкотемпературном приближении [13]:

$$I_{\text{th}} = \frac{\epsilon_0 \lambda N_{\text{eff}} L_p \Delta E}{4\pi e z_{32}^2} \frac{\alpha_w + \alpha_m}{\Gamma \tau_3 (1 - \tau_2/\tau_{32})}$$

Здесь длина волны излучения $\lambda = 9.6 \text{ мкм}$, матричный элемент дипольного момента $z_{32} = 1.7 \text{ нм}$ [3], длина периода (каскада) в активной области $L_p = 45 \text{ нм}$, длина резонатора $L = 3.1 \text{ мм}$, $N_{\text{eff}} = 3.29$, потери на зеркалах $\alpha_m = 4.2 \text{ см}^{-1}$, измеренные для двух длин резонаторов волноводные потери $\alpha_w = 19 \text{ см}^{-1}$, коэффициент оптического ограничения $\Gamma = 0.28$, измеренная ширина линии спонтанного излучения при азотной температуре $\Delta E = 13 \text{ мэВ}$. Множитель $\tau_3(1 - \tau_2/\tau_{32})$ составляет около 1 пс [1, 3]. При указанных значениях параметров получаем $I_{\text{th}} = 1.4 \text{ кА/см}^2$ при 77.4 К, что несколько ниже, чем измеренные значения (1.8–1.9 кА/см²) для лучших образцов. Прежде всего это указывает на хорошее качество лазерной гетероструктуры, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии.

Однако при увеличении температуры (от 77 до 205 К) пороговая плотность тока резко возрастала, что соответствует достаточно низкому значению характеристической температуры T_0 (135 К). Для лазеров того же состава ($x = 0.45$), полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии [3], характеристическая температура по нашей оценке несколько выше и составляет 160 К. Более сильная зависимость пороговой плотности тока от температуры на наших образцах не может быть объяснена выбросом

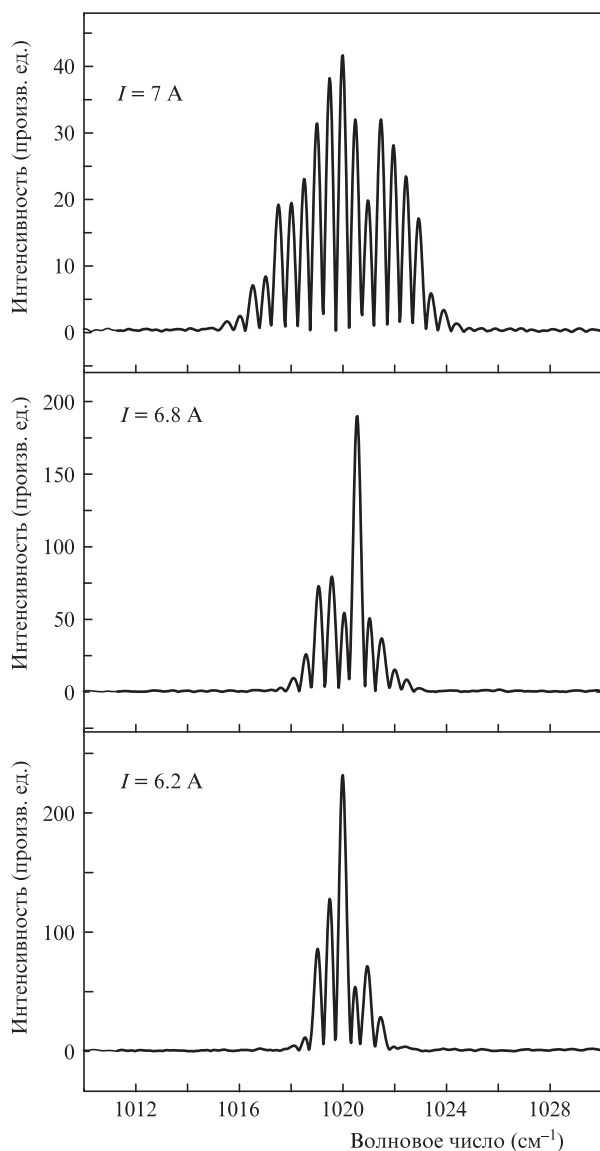


Рис.5. Зависимость спектров излучения ККЛ №250 от тока накачки I при $T = 80$ К, $\tau = 1$ мкс.

электронов с верхнего лазерного уровня $n = 3$ в высоколежащее состояние $n = 4$ или обратным забросом электронов с основного уровня (уровня Ферми) инжектора на нижний лазерный уровень $n = 2$. Действительно, согласно рассчитанной энергетической диаграмме энергетическое расстояние $E_4 - E_3$ составляет 60 мэВ, а расстояние $E_2 - E_g - 75$ мэВ, что достаточно для работы лазера даже при комнатной температуре. Одной из причин резкой зависимости порогового тока от температуры для наших лазеров является низкий КПД лазера, который при 77 К не превышает 0.5%, что приводит к сильному разогреву активной области. Об этом свидетельствует также тот факт, что при изменении длительности импульса от 0.5 до 3 мкс

пороговый ток сильно возрастает. Требуется дальнейшая оптимизация конструкции лазера.

Длина волны излучения лазеров в зависимости от условий выращивания варьировалась в пределах 9.5 – 9.7 мкм и была всегда больше теоретического значения (9.2 мкм). Одной из причин этого может быть небольшое размытие гетерограниц в гетероструктуре, хотя в первом приближении параметры гетероструктуры, полученные из измерений с помощью просвечивающей электронной микроскопии, находятся в хорошем согласии с расчетными значениями.

Таким образом, на основе гетеропары GaAs/AlGaAs методом МОС-гидридной эпитаксии выращены многопериодные квантово-размерные лазерные гетероструктуры и созданы квантовые каскадные лазеры для области спектра около 10 мкм. Аналогичным методом ККЛ были получены только в [8, 14]. Лазеры работали в импульсном режиме (1 мкс, 170 Гц) при температуре жидкого азота. Типичные значения пороговой плотности тока составили 2–4 кА/см², достигнутая мощность излучения – более 0.2 Вт, максимальная рабочая температура лазеров – 205 К. Улучшение качества границы раздела в активной области гетероструктуры позволит дополнительно снизить пороговый ток и повысить рабочую температуру ККЛ.

Авторы благодарны С.С. Зарубину за измерения на просвечивающем электронном микроскопе. Для З.И.И. и З.А.Н. работа поддержана Программами РАН № I.П25 и IV.2.6.

1. Sirtori C., Kruck P., Barbieri S., Collot P., Nagle J., Beck M., Faist J., Oesterle U. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3486 (1998).
2. Strasser G., Gianordoli S., Hvozdar L., Schrenk W., Unterrainer K., Gornik E. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1345 (1999).
3. Page H., Becker C., Robertson A., Glastre G., Ortiz V., Sirtori C. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3529 (2001).
4. Liu J-Q., Liu F-Q., Lu X-Z., Guo Y., Wang Z-G. *Solid-State Electron.*, **49**, 1961 (2005).
5. Page H., Kruck P., Barbieri S., Sirtori C., Stellmacher M., Nagle J. *Electron. Lett.*, **35**, 1848 (1999).
6. Page H., Dhillon S., Calligaro M., Becker C., Ortiz V., Sirtori C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 665 (2004).
7. Roberts J.S., Green R.P., Wilson L.R., Zibik E.A., Revin D.G., Cockburn J.W., Airey R.J. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 4221 (2003).
8. Krysa A.B., Revin D.G., Commin J.P., Atkins C.N., Kennedy K., Qiu Y., Walther T., Cockburn J.W. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23**, 774 (2011).
9. Sirtori C., Kruck P., Barbieri S., Page H., Nagle J., Beck M., Faist J., Oesterle U. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3911 (1999).
10. Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Андреев А.Ю., Телегин К.Ю., Яроцкая И.В., Мешков А.С., Коняев В.П., Сапожников С.М., Лебедева Е.И., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **43**, 895 (2013).
11. Мармалюк А.А., Падалица А.А., Ладугин М.А. и др. *Российские нанотехнологии* (в печати).
12. Засавицкий И.И., Пашкеев Д.А., Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Микаелян Г.Т. *Квантовая электроника*, **40**, 95 (2010).
13. Gmachl C., Capasso F., Sivco D.L., Cho A.Y. *Rep. Prog. Phys.*, **64**, 1533 (2001).
14. Atkins C.N., Krysa A.B., Revin D.G., Kennedy K., Commin J.P., Cockburn J.W. *Electron. Lett.*, **47**, 1193 (2011).