

Полупроводниковые лазеры спектрального диапазона 1.3 мкм на квантовых точках с высокой температурной стабильностью длины волны лазерной генерации (0.2 нм/К)

© Л.Я. Карачинский^{+*#¶}, И.И. Новиков⁺, Ю.М. Шерняков^{+#}, Н.Ю. Гордеев^{+#},
А.С. Паюсов^{*}, М.В. Максимов^{+*•}, С.С. Михрин[‡], М.Б. Лифшиц^{+*},
В.А. Щукин^{+*1}, П.С. Копьев⁺, Н.Н. Леденцов^{+*1}, Д. Бимберг^{*}

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

^{*}Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, PW 5-2, Hardenbergstr, 36,
D-10623 Berlin, Germany

[#] Санкт-Петербургский физико-технологический научно-образовательный центр Российской академии наук,
195220 Санкт-Петербург, Россия

[•] Академический физико-технологический университет Российской академии наук,
195220 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Innolume GmbH, Konrad-Adenauer-Allee 11,
44263 Dortmund, Germany

¹ Present address: VI Systems GmbH, Hardenbergstr. 7,
10623 Berlin, Germany

(Получена 1 октября 2008 г. Принята к печати 7 октября 2008 г.)

Созданы и исследованы лазеры спектрального диапазона 1.3 мкм на структурах, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs, с активной областью на основе квантовых точек InAs. В схеме резонатора использован многослойный интерференционный отражатель, приводящий к тому, что высокий фактор оптического ограничения и низкие потери на утеkanie реализуются только для света, распространяющегося под определенным углом и, следовательно, имеющего строго определенную длину волны. Показано, что за счет использования такой конструкции волновода температурный сдвиг длины волны лазерной генерации составляет 0.2 нм/К, что в 2.5 раза меньше, чем в лазерах на квантовых точках со стандартной конструкцией волновода. Лазеры с шириной полоскового контакта $W = 10$ мкм показали пространственно-одномодовое излучение, что подтверждает преимущества предложенной оригинальной конструкции оптического волновода.

PACS: 42.55.Px

1. Введение

Полупроводниковые лазеры, обладающие высокой температурной стабильностью параметров лазерной генерации, необходимы для широкого набора применений. Здесь можно отметить накачку оптических волокон, легированных Er и Yb (длина волны ~ 975 нм), накачку твердотельных лазеров (808 нм), преобразование частоты (1060 и 920 нм) и область телекоммуникаций для создания систем передачи данных со спектральным уплотнением (wavelength division multiplexing — WDM) [1]. В торцевых полупроводниковых лазерах стандартной конструкции спектр лазерной генерации достаточно широк и температурный сдвиг длины волны лазерной генерации в основном определяется температурным сдвигом ширины запрещенной зоны полупроводника [2].

Для обеспечения температурно-стабильной работы полупроводникового лазера по длине волны излучения генерации предлагались различные подходы. Реализацией наиболее распространенного подхода является так называемый лазер с распределенной обратной связью (РОС-лазер) [3]. В лазерах этого типа специальная

конструкция оптического волновода позволяет получать температурный сдвиг длины волны лазерной генерации на уровне 0.08–0.1 нм/К. Однако эти лазеры достаточно дороги в производстве, что обусловлено необходимостью использования специальных методик при изготовлении оптического волновода. Также такие лазеры зачастую не обеспечивают высокой оптической мощности излучения. Реализацией другого подхода являются вертикально излучающие лазеры (VCSELs), которые также обеспечивают уменьшенный температурный сдвиг длины волны лазерной генерации. Для лазеров спектрального диапазона 980 нм на основе квантовых ям (КЯ) GaInAs/GaAs температурный сдвиг обычно составляет 0.06–0.08 нм/К [4]. Главным недостатком лазеров этого типа для упомянутых выше применений является их малая выходная оптическая мощность излучения. В работе [5] показано, что в торцевых лазерах с активной областью на основе квантовых точек InGaAs за счет сдвига спектра усиления квантовых точек в коротковолновую область с ростом температуры может быть частично скомпенсирован длинноволновый сдвиг длины волны лазерной генерации. Для этого были использованы специальные режимы эпитаксиального ро-

[¶] E-mail: Karach@switch.ioffe.ru

ста, обеспечивающие контроль за спектром усиления квантовых точек. Для длины резонатора 2 мм авторами был получен температурный сдвиг длины волны лазерной генерации 0.11 нм/К.

Недавно нами был предложен [6] и реализован [7] новый подход к созданию температурно-стабильных полупроводниковых лазеров полностью эпитаксиальной конструкции. Данный прибор совмещает в себе достоинства торцевых и вертикально-излучающих лазеров, а именно высокую мощность излучения и высокую температурную стабильность характеристик. В лазерах этого типа за счет использования многослойных интерференционных отражателей можно добиться того, что только оптическая мода, распространяющаяся под определенным углом в резонаторе, имеет высокий фактор оптического ограничения и низкие потери на утеkanie. Важно отметить, что свет в таком лазере излучается с торцов резонатора, как и в стандартном лазере Фабри–Перо.

Такие лазеры с широким полосковым контактом, с активной областью на основе КЯ (длина волны излучения ~ 975 нм) показали температурный сдвиг длины волны лазерной генерации на уровне 0.13 нм/К, низкую плотность порогового тока (300 А/см^2), высокую максимальную мощность излучения (> 7 Вт при накачке импульсами тока) и низкую вертикальную расходимость излучения (20°) [8,9]. Лазеры с узким полосковым контактом позволили получить спектрально-одномодовое излучение с величиной фактора подавления боковых мод 41.3 дБ при оптической мощности излучения 93 мВт (26 дБ при 142 мВт) [9,10]. Данный результат соответствует характеристикам коммерческих РОС-лазеров этого спектрального диапазона [11], в то время как изготовление лазеров, представленных в работах [9,10], существенно проще и дешевле. Недавно было теоретически показано, что использование концепции лазера с многослойными интерференционными отражателями, излучающего в наклонной оптической моде, может обеспечить полное подавление температурного сдвига длины волны лазерной генерации [9,12].

Целью данной работы являлось создание лазеров на подложке GaAs с активной областью на основе квантовых точек InAs, излучающих в диапазоне длин волн 1.3 мкм, обладающих высокой температурной стабильностью длины волны лазерной генерации. В работе представлено детальное исследование температурных, пространственных и спектральных характеристик таких лазеров.

2. Эксперимент

Лазерная гетероструктура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложке n^+ -GaAs. На подложке был выращен буферный слой GaAs толщиной 500 нм. Затем на нем выращивался многослойный интерференционный отража-

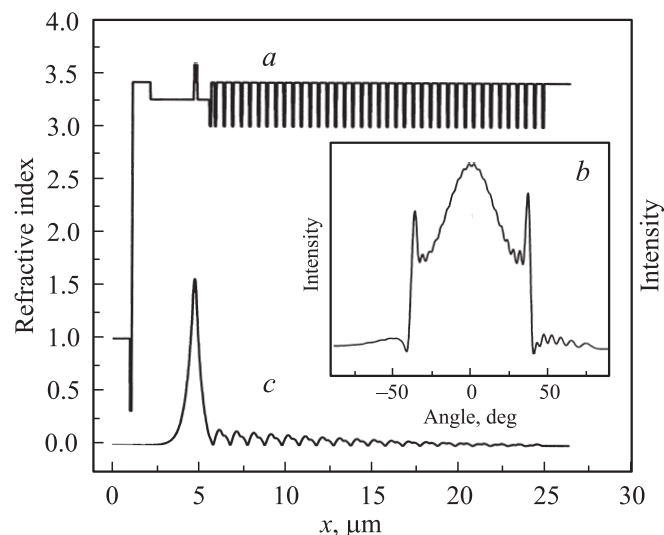


Рис. 1. Профиль показателя преломления в гетероструктуре (a), распределение дальнего поля излучения лазера (b) и распределение ближнего поля (c). x — координата вдоль направления роста.

тель GaAs $\text{Ga}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$ (120 нм)/GaAs (380 нм), имеющий 39 периодов повторения. Слой $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ толщиной 700 нм, представлял собой n -эмиттер. В центре оптического волновода общей толщиной 175 нм располагалось 5 слоев КТ InAs, полученных по методу Странского–Крастанова. Каждый из слоев КТ заравнивался КЯ InGaAs, при этом ширина так называемого спейсерного слоя GaAs составляла 35 нм. Слой $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ толщиной 2.5 мкм представлял собой p -эмиттер. Контактный слой GaAs имел толщину 1 мкм. Общая толщина структуры составляла более 24 мкм. На рис. 1, a схематически представлен профиль показателя преломления в гетероструктуре.

Из выращенных гетероструктур были изготовлены лазеры полосковой конструкции с ширинами полоска 100 и 10 мкм, а также образцы с замкнутой кольцевой модой. Контакты AuGe/Ni/Au и AuZn/Ni/Au были нанесены на n - и p -стороны соответственно. Были изготовлены лазеры с различной длиной резонатора. Образцы напайвались на медный теплоотвод p -стороной для улучшения отвода тепла. Лазеры исследовались в широком диапазоне температур при импульсной накачке (длительность импульса $\tau = 200$ нс, частота повторения $f = 1$ кГц).

3. Принцип работы и численное моделирование

Как уже отмечалось выше, конструкция инжекционно-го лазера с температурной стабилизацией длины волны лазерной генерации основывается на идее использования в схеме оптического волновода инжекционного лазера многослойного интерференционного отражателя, приводящего к тому, что высокий фактор оптического

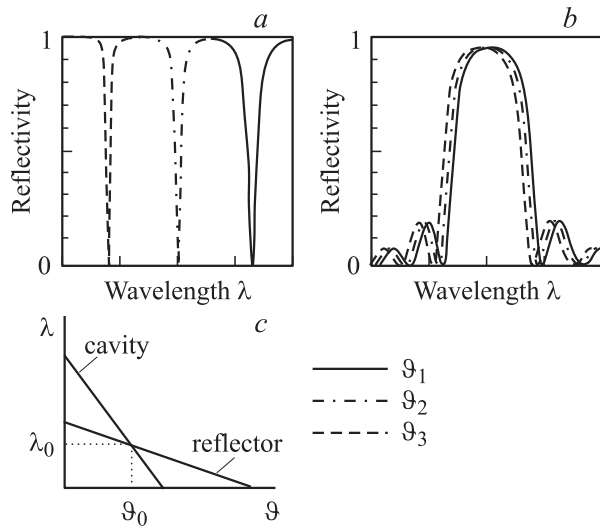


Рис. 2. Спектр отражения резонатора при наклонном падении света (*a*), спектр отражения многослойного интерференционного отражателя при наклонном падении света (*b*), дисперсионные кривые резонатора и многослойного интерференционного отражателя (*c*). $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ — разные углы падения.

ограничения и низкие потери на утечку реализуются только для света, распространяющегося под определенным углом и, следовательно, имеющего строго определенную длину волны. Спектр отражения обычного резонатора при наклонном падении света имеет резкий минимум (так называемый dip) при определенной длине волны (рис. 2, *a*). Зависимость этой длины волны от угла падения света (ϑ) представляет собой первую дисперсионную кривую. Спектр отражения многослойного интерференционного отражателя при наклонном падении света содержит полосы высокого отражения (stop bands) (рис. 2, *b*). Зависимость спектрального положения максимума отражения от угла падения света дает вторую дисперсионную кривую. Две дисперсионные кривые пересекаются при определенном угле падения света (ϑ_0) и определенной длине волны (λ_0) и расходятся, как только угол или длина волны отклоняются от этих оптимальных значений (рис. 2, *c*).

Оптическая мода, обладающая оптимальной длиной волны и распространяющаяся в волноводе, имеет максимальное отражение от многослойного интерференционного отражателя и вследствие этого крайне низкие потери на утечку в подложку и (или) контактные слои. Оптическая мода, обладающая неоптимальной длиной волны, напротив, слабо отражается многослойным интерференционным отражателем и имеет высокие потери на утечку в подложку и (или) контактные слои. Такой волновод обладает характерной (оптимальной) длиной волны, обуславливающей характеристики оптических приборов. Например, при использовании данной конструкции волновода в полупроводниковом лазере можно добиться того, чтобы лазерная генерация происходила только на оптимальной длине волны. Такая селектив-

ность приводит к высокой температурной стабильности длины волны излучения. Температурный сдвиг длины волны лазерной генерации определяется относительно небольшими температурными изменениями показателей преломления эпитаксиальных слоев по сравнению с быстрой температурной зависимостью ширины запрещенной зоны в полупроводниках и оказывается существенно меньше, чем в обычных полосковых лазерах.

На рис. 1, *c* представлены результаты расчета распределения ближнего поля лазера, описание которого представлено в разд. 2. Расчеты проводились путем численных решений дифференциального уравнения для поля в волноводе [12]. Видно, что существенная часть интенсивности электромагнитного поля сосредоточена в активной области, что обеспечивает высокий фактор оптического ограничения (Γ -фактор): характерная ширина поля (effective spot size) равна 540 нм. На рис. 1, *b* показано распределение дальнего поля лазера в направлении, перпендикулярном p - n -переходу. Два характерных узких боковых пика связаны с наличием в структуре волн, утекающих в подложку (правый пик) и отражающихся от нее (левый пик). Разность их интенсивностей определяет итоговую утечку; в случае рабочей моды на оптимальной длине волны суммарная утечка невелика.

4. Экспериментальные результаты и обсуждение

Вначале были исследованы лазеры с замкнутой кольцевой модой. Лазеры показали длину волны лазерной генерации 1270 нм (вставка к рис. 3), а также низкую пороговую плотность тока $J_{th} = 120 \text{ A/cm}^2$. На рис. 3 показана температурная зависимость длины волны лазерной генерации исследуемой гетероструктуры. Видно, что в диапазоне от 20 до 100°C температурный сдвиг составляет величину 0.2 нм/К. Для сравнения на рисунке показана зависимость для гетероструктуры с аналогичной активной областью, но со стандартной конструкцией волновода. Видно, что использование многослойного интерференционного отражателя позволяет уменьшить температурный сдвиг длины волны лазерной генерации в 2.5 раза.

На рис. 4 приведены зависимости пороговой плотности тока (J_{th}) и длины волны лазерной генерации (λ) от длины резонатора (L) для лазеров с шириной полоскового контакта $W = 100 \text{ мкм}$. В данной работе для дальнейших исследований была выбрана $L = 5 \text{ мм}$, при этом в случае лазеров с широким полосковым контактом на одно зеркало лазерного диода наносилось покрытие с высоким коэффициентом отражения (HR).

На рис. 5 приведена ватт-амперная характеристика для лазера с $L = 5 \text{ мм}$ и $W = 100 \text{ мкм}$, полученная при накачке импульсами тока при температуре $T = 20^\circ\text{C}$. Видно, что максимальная оптическая мощность излучения составляет 1.5 Вт. На вставке показано эксперимен-

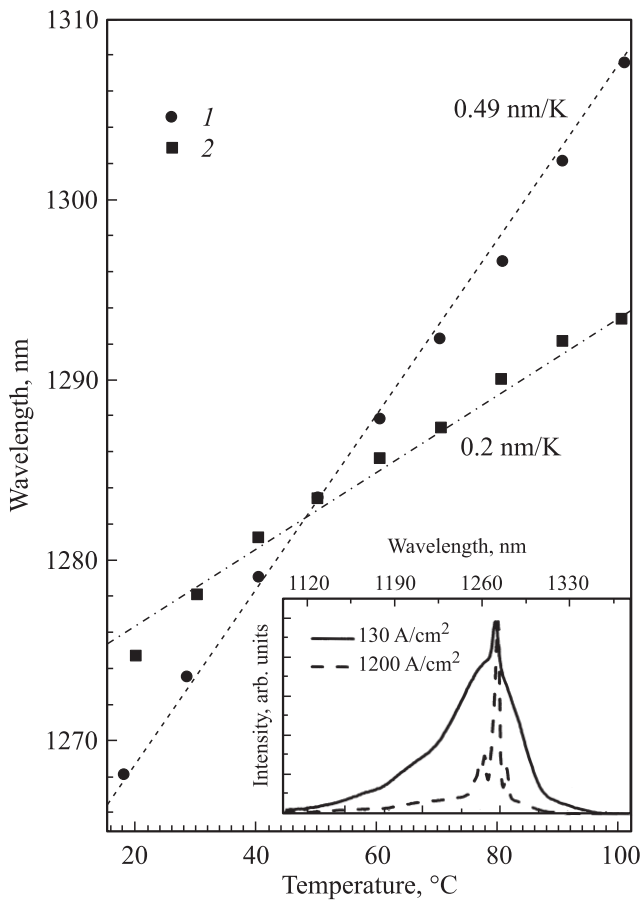


Рис. 3. Зависимость длины волны лазерной генерации от температуры для образцов с замкнутой кольцевой модой структуры с КТ со стандартной конструкцией волновода (1) и структуры, содержащей многослойный интерференционный отражатель (2). На вставке — спектр лазерной генерации гетероструктуры при плотности тока накачки, близкой к пороговой J_{th} (130 A/cm^2), и $10J_{th}$ (1200 A/cm^2).

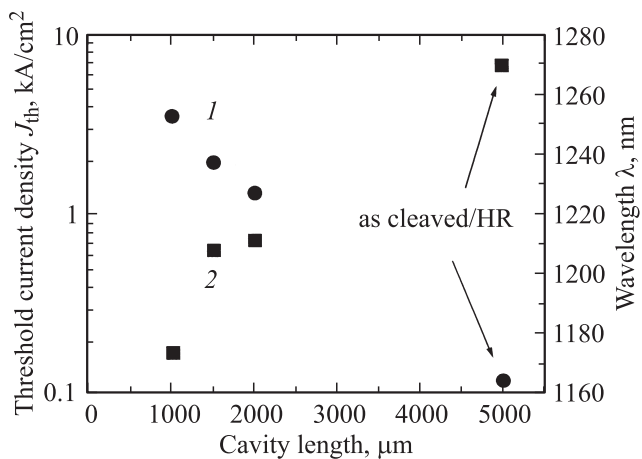


Рис. 4. Зависимости пороговой плотности тока J_{th} (1) и длины волны лазерной генерации λ (2) от длины резонатора L для лазеров с шириной полоскового контакта $W = 100 \text{ мкм}$. Лазеры с $L = 1, 1.5$ и 2 нм не имеют покрытий на зеркалах, лазер с $L = 5 \text{ мм}$ имеет на одном зеркале покрытие с высоким коэффициентом отражения (HR).

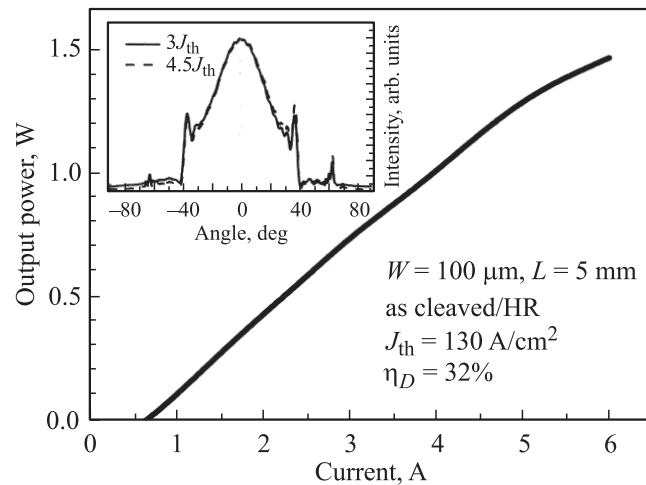


Рис. 5. Ватт-амперная характеристика излучения лазера с $L = 5 \text{ мм}$ и $W = 100 \text{ мкм}$ (одно зеркало имеет покрытие с высоким коэффициентом отражения — HR), полученная при импульсной накачке и $T = 20^\circ\text{C}$. На вставке — экспериментальное распределение излучения лазера в дальнем поле в направлении, перпендикулярном $p-n$ -переходу, при плотностях тока накачки $3J_{th}$ и $4.5J_{th}$. Пороговая плотность тока накачки $J_{th} = 130 \text{ A/cm}^2$, дифференциальная квантовая эффективность $\eta_D = 32\%$.

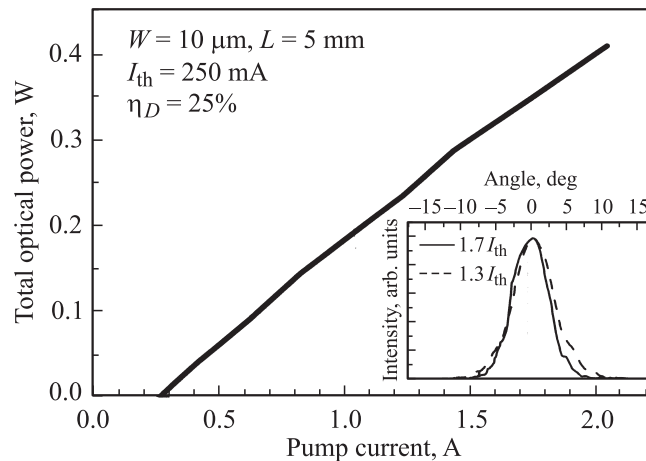


Рис. 6. Ватт-амперная характеристика излучения лазера с $L = 5 \text{ мм}$ и $W = 10 \text{ мкм}$, полученная при импульсной накачке и $T = 20^\circ\text{C}$. На вставке — экспериментальное распределение излучения лазера в дальнем поле в направлении, параллельном $p-n$ -переходу, при токах накачки $1.3I_{th}$ и $1.7I_{th}$. Пороговый ток $I_{th} = 250 \text{ мА}$, дифференциальная квантовая эффективность $\eta_D = 25\%$.

тально измеренное распределение дальнего поля излучения лазера в направлении, перпендикулярном $p-n$ -переходу. Видно хорошее совпадение экспериментальных и модельных результатов (см. вставку к рис. 1).

На рис. 6 представлена ватт-амперная характеристика лазера с узким полоском, $W = 10 \text{ мкм}$ и $L = 5 \text{ мм}$, полученная при накачке импульсами тока при тем-

пературе $T = 20^\circ\text{C}$. Пороговый ток $I_{\text{th}} = 250\text{ мА}$, максимальная оптическая мощность излучения при импульсном возбуждении составила более 400 мВт. Важно отметить, что излучение лазеров с $W = 10\text{ мкм}$ оказалось пространственно-одномодовым (вставка к рис. 6), что подчеркивает преимущества предложенной концепции для получения высокой в одномодовом режиме мощности. В случае лазеров стандартной конструкции для получения пространственно-одномодового излучения обычно используется ширина полоска не более 5 мкм [13].

5. Заключение

Созданы и исследованы лазеры спектрального диапазона 1.3 мкм, изготовленные на структурах, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs, с активной областью на основе квантовых точек InAs. В конструкции оптического волновода полупроводникового лазера использован многослойный интерференционный отражатель, приводящий к тому, что высокий фактор оптического ограничения и низкие потери на утеkanie реализуются только для света, распространяющегося под определенным углом и, следовательно, имеющего строго определенную длину волны. Показано, что температурный сдвиг длины волны лазерной генерации в данных лазерах составляет 0.2 нм/К, что в 2.5 раза меньше, чем в лазерах с аналогичной активной областью, но со стандартной конструкцией волновода. Лазеры с шириной полоскового контакта $W = 10\text{ мкм}$ показали пространственно-одномодовое излучение с максимальной выходной мощностью 400 мВт в импульсном режиме. Полученные результаты позволяют с уверенностью говорить о том, что созданные лазеры полностью эпитаксиальной конструкции являются перспективными для создания температурно-стабильных полупроводниковых лазеров спектрального диапазона 1.3 мкм.

Данная работа была поддержана в разных частях проектом CoE NanOp (Германия), финансируемым BMBF; DFG в рамках проекта SFB 787, EU Project SANDiE (контракт № NMP4-CT-2004-500101), СПбНЦ РАН, Программой фундаментальных исследований президиума РАН „Квантовые наноструктуры“ и РФФИ. Л.Я. Карачинский выражает благодарность за финансовую поддержку в рамках гранта Президента Российской Федерации по поддержке молодых ученых (МК-4232.2007.2), субсидии правительства Санкт-Петербурга для молодых кандидатов наук (проект 30-04/149) и фонду Александра фон Гумбольдта. И.И. Новиков выражает благодарность за финансовую поддержку в рамках гранта президента Российской Федерации по поддержке молодых ученых (МК-5162.2008.2), субсидии правительства Санкт-Петербурга для молодых кандидатов наук (проект 30-04/150).

Список литературы

- [1] S.V. Kartalopoulos. *Introduction to DWDM Technology. Data in a Rainbow* (Wiley-Interscience, N.Y., 2000).
- [2] X. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981) т. А.
- [3] H. Kogelnik, C.V. Shank. *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 152 (1971); Р.Ф. Казаринов, Р.А. Суриц. *ФТП*, **6**, 1184 (1973).
- [4] G.P. Agrawal. *Semiconductor lasers: past, present and future* (American Institute of Physics, Woodbury, N.Y., 1994).
- [5] R. Debusmann, T.W. Schlereth, S. Gerhard, W. Kaiser, S. Höfling, A. Forchel. *IEEE J. Quant. Electron.*, **44**, 175 (2008).
- [6] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin. *Opt. Eng.*, **41**, 3193 (2002).
- [7] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, S.S. Mikhlin, I.L. Krestnikov, A.V. Kozhukhov, A.R. Kovsh, L.Ya. Karachinsky, M.V. Maximov, I.I. Novikov, Yu.M. Shernyakov. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, 1183 (2004).
- [8] V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, Yu.M. Shernyakov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maxomov, M.B. Lifshits, A.V. Savelyev, A.R. Kovsh, I.L. Krestnikov, S.S. Mikhlin, D. Bimberg, *Semicond. Sci. Technol.*, **22**, 1061 (2007).
- [9] L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, G. Fiol, M. Kuntz, Yu.M. Shernyakov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, M.B. Lifshits, T. Kettler, K. Posilovic, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, S.S. Mikhlin, D. Bimberg. *Proc. 16th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology* (Vladivostok, 2008) paper LOED.06o, p. 28.
- [10] L.Ya. Karachinsky, M. Kuntz, G. Fiol, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, I.I. Novikov, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 241 112 (2007).
- [11] H. Wenzel, J. Fricke, A. Klehr, A. Knauer, G. Erbert. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **18**, 737 (2006).
- [12] M.B. Lifshits, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Semicond. Sci. Technol.*, **22**, 380 (2007).
- [13] А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, Е.Г. Голикова, Ю.А. Рябоштан, И.С. Тарасов. *ФТП*, **36**, 1393 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

Quantum dot semiconductor lasers of the 1.3 μm wavelength range with the high temperature stability of the lasing wavelength (0.2 nm/K)

L.Ya. Karachinsky^{+#}, I.I. Novikov⁺,
Yu.M. Shernyakov^{+#}, N.Yu. Gordeev^{+#}, A.S. Payusov[•],
M.V. Maximov^{+#•}, S.S. Mikhrin[‡], M.B. Lifshits^{+*},
V.A. Shchukin^{+*}, P.S. Kop'ev⁺, N.N. Ledentsov^{+*},
D. Bimberg^{*}*

⁺ Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

^{*} Institut für Festkörperphysik,
Technische Universität Berlin, PW 5-2,
Hardenbergstr. 36,
D-10623 Berlin, Germany

[#] St. Petersburg Physical Technological Center
for Research and Education,
Russian Academy of Sciences,
195220 St. Petersburg, Russia
[•] Academic Physics and Technology University,
Russian Academy of Sciences,
195220 St. Petersburg, Russia
[‡] Innolume GmbH, Konrad-Adenauer-Allee 11,
44263 Dortmund, Germany

Abstract Lasers with the InAs quantum dots (QDs) as an active region emitting in 1.3 μm wavelength range have been grown by molecular beam epitaxy on GaAs substrate and investigated. Multilayer interference reflector was used in the resonator scheme. As a results, high optical confinement factor and low leakage losses are realized only for the light propagating at certain angle and, therefore, having some defined wavelength. It was shown that the temperature shift of the lasing wavelength in such lasers is 0.2 nm/K, which is 2.5 times smaller, than in the quantum dot lasers with the conventional waveguide construction. Lasers with the stripe width of 10 μm showed single-mode emission, which confirms the advantages of proposed original optical waveguide construction.