

Непрерывный режим генерации одномодовых метаморфных лазеров на квантовых точках спектрального диапазона 1.5 мкм

© Л.Я. Карачинский^{*,†,¶}, Т. Kettler⁺, Н.Ю. Гордеев^{*}, И.И. Новиков^{*}, М.В. Максимов^{*}, Ю.М. Шерняков^{*}, Н.В. Крыжановская^{*}, А.Е. Жуков^{*}, Е.С. Семенова^{*}, А.П. Васильев^{*}, В.М. Устинов^{*}, Н.Н. Леденцов^{*,†,¶}, А.Р. Ковш^{*,¶}, В.А. Щукин^{*,†,¶}, С.С. Михрин^{*,¶}, A. Lochmann⁺, O. Schulz⁺, L. Reissmann⁺, D. Bimberg⁺

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Deutschland

[¶] NL-Nanosemiconductor GmbH, 44227 Dortmund, Deutschland

(Получена 28 марта 2005 г. Принята к печати 12 апреля 2005 г.)

Лазеры с квантовыми точками InAs/InGaAs на метаморфных слоях (In,Ga,Al)As, осажденных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs, продемонстрировали длину волны генерации вблизи 1.5 мкм и дифференциальную квантовую эффективность порядка 50%. Показано, что лазеры с узким полоском работают в одномодовом режиме и выдерживают плотности непрерывного тока свыше $20 \text{ кА} \cdot \text{см}^{-2}$ без заметной деградации. Продемонстрирован непрерывный режим генерации с максимальной оптической мощностью 220 мВт. Также показано, что вплоть до самых высоких уровней возбуждения отсутствует эффект шнурования тока и излучения.

1. Введение

В последние годы наблюдается большой прогресс в создании полупроводниковых инжекционных лазеров с квантовыми точками (КТ) [1]. Лазеры на КТ показали ранее предсказанные сверхнизкую пороговую плотность тока [2], высокую температурную стабильность [3] и дифференциальную эффективность [4], небольшой α -параметр и, как следствие, подавленное шнурование поля [5], а также уменьшенный сдвиг волны излучения при изменении тока накачки. Особое внимание уделяется длинноволновым лазерам с КТ, выращенным на подложках GaAs [6], которые могут быть использованы в оптических системах связи. Были созданы высококачественные лазеры полосковой конструкции, а также поверхностно излучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSELs), излучающие на длине волны 1.3 мкм [1,7]. Эти достижения дополнительно стимулировали интерес к лазерам на КТ, выращенным на подложках GaAs и излучающим в более длинноволновом спектральном диапазоне, вплоть до 1.5 мкм.

До недавнего времени только система материалов InP–InGaAsP использовалась для создания полупроводниковых лазеров, излучающих в диапазоне длин волн 1.3–1.55 мкм. Однако существуют фундаментальные проблемы, ограничивающие возможности таких приборов. Недостаточное электронное ограничение в активной области [8,9] приводит к слабой температурной стабильности порогового тока и длины волны излучения. Еще одной серьезной проблемой, ограничивающей области применения лазеров с квантовыми ямами (КЯ) на основе InP, является малая разница показателей преломления между GaInAs и AlInAs. Это приводит к тому, что

для достижения требуемого для вертикального лазера коэффициента отражения распределенного брэгговского зеркала (> 0.99) необходимо не менее 50 пар слоев. Таким образом, реализация монолитных лазеров с вертикальным резонатором на основе этой системы материалов крайне затруднена.

В настоящее время применяются два различных подхода для создания полупроводниковых лазеров, излучающих на длине волны около 1.5 мкм. Согласно первому подходу, в качестве активной области используются GaInAsN–GaAsN КЯ [10] или GaInNAsSb–GaNAsSb КЯ [11]. В работе [10] была продемонстрирована генерация на длине волны 1.42 мкм, причем полная выходная оптическая мощность при непрерывном режиме накачки (P_{CW}) составила 17 мВт (длина резонатора $L = 600$ мкм, ширина полоска $W = 4$ мкм). Для системы материалов GaInNAsSb–GaNAsSb была получена длина волны излучения 1.498 мкм, при этом $P_{CW} = 140$ мВт (длина резонатора $L = 2500$ мкм, ширина полоска $W = 20$ мкм) [11].

Нами был недавно предложен подход, основанный на принципе метаморфного роста буферных слоев InGaAlAs на подложках GaAs [12,13]. Метаморфный рост ранее использовался для получения лазеров на кремниевых подложках на основе квантовых ям [14,15] и квантовых точек [16]. При этом, однако, выходные мощности таких лазеров в непрерывном режиме были малы, и лазеры были подвержены быстрой деградации.

В нашем случае для локализации дислокаций несоответствия в нижнем буферном слое и создания низкой плотности дислокаций в вышележащих слоях была использована специальная методика уменьшения концентрации дефектов (defect reduction technique — DRT) [17]. Инжекционные лазеры с широким полоском, содержащие в качестве активной области 10 слоев InAs–InGaAs

[¶] E-mail: Karach@switch.ioffe.ru

КТ, продемонстрировали лазерную генерацию в диапазоне длин волн 1.48–1.52 мкм, пороговую плотность тока порядка $1\text{--}1.5 \text{ кА} \cdot \text{см}^{-2}$ и внешнюю дифференциальную квантовую эффективность (ДКЭ) 52%. Полная оптическая мощность излучения при импульсном режиме накачки превышала 7 Вт со 100-микронного полоска [17,18]. Тем не менее до настоящего времени не была продемонстрирована и исследована работа таких лазеров при непрерывном режиме накачки.

Цель данной работы заключалась в создании лазеров на подложках GaAs, излучающих в районе 1.5 мкм и работающих при непрерывном режиме накачки в однододовом режиме. В работе представлено детальное исследование температурных, мощностных, пространственных и спектральных характеристик метаморфных лазеров с InAs КТ.

2. Эксперимент

Метаморфные лазерные гетероструктуры 1 и 2 были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках n^+ -GaAs (100). Десять слоев InAs КТ, полученных по методу Странского–Кристанова, были помещены в центр волновода $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \approx 21\%$) толщиной 0.8 мкм. Каждый слой КТ зарращивался тонким слоем $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y \approx 41\%$). Эмиттеры представляли собой слои InAlGaAs (In $\approx 21\%$). В данной работе были использованы две модификации метаморфного буфера. В структуре 1 он состоял из InGaAs-слоя толщиной 1 мкм, за которым следовал n -эмиттер InAlGaAs (Al $\approx 30\%$) толщиной 1.5 мкм. В структуре 2 сверхрешетка InGaAs–InAlGaAs со средним составом по Al $\approx 15\%$, толщиной 1.5 мкм, представляла собой метаморфный буфер и одновременно n -эмиттер.

Из выращенных гетероструктур были изготовлены лазеры полосковой конструкции с ширинами полоска 6, 7 и 8 мкм. Контакты Ni/AuGe/Au и Ti/Pt/Au были нанесены на n - и p -легированные стороны соответственно. Были изготовлены лазеры с различной длиной резонатора. Образцы напайвались на медный теплоотвод p -стороной вниз для улучшения отвода тепла. Покрытия на зеркала резонатора не наносились. Лазеры исследовались в широком диапазоне температур при импульсной накачке (длительность импульса $\tau = 200$ нс, частота повторения $f = 1$ кГц) и непрерывной накачке.

При исследовании ближнего поля излучения торцевого лазерного диода проецировался на ПЗС-камеру с помощью микрообъектива. При проведении спектральных и мощностных измерений, а также при исследовании дальнего поля излучения в качестве детектирующего элемента использовался Ge-фотодиод.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Вначале лазеры исследовались в импульсном режиме. Для образцов с длиной резонатора 1.4 мм пороговый ток (I_{th}) лежал в диапазоне 380–420 мА при температуре

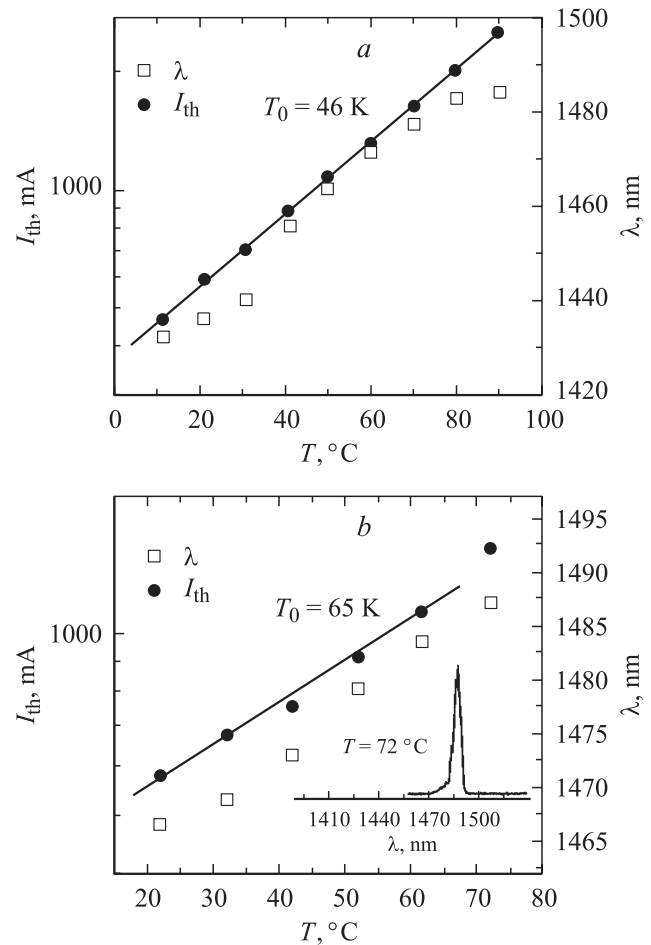


Рис. 1. Зависимости порогового тока и длины волны лазерной генерации от температуры для образцов структур 1 (а) и 2 (б), полученные при импульсном возбуждении. Вставка на рис. 1, б показывает спектр электролюминесценции структуры 2 при 72°С и токе накачки $I = 1.1I_{\text{th}}$. $L = 2$ мм; W , мкм: а — 6, б — 7.

20°С для всех трех ширин полоска: $W = 6, 7$ и 8 мкм. Зависимости порогового тока и длины волны лазерной генерации от температуры для структур 1 и 2 показаны на рис. 1, а и 1, б соответственно. Характеристическая температура T_0 составила 46 К для структуры 1 и 65 К для структуры 2. Наибольшая длина волны лазерной генерации наблюдалась в структуре 2 при температуре 72°С (см. вставку на рис. 1, б). На рис. 2, а и 2, б представлены ватт-амперные характеристики структур 1 и 2 соответственно. Гетероструктура 1 показала максимальную полную выходную оптическую мощность 800 мВт, а гетероструктура 2 — 440 мВт. Наибольшие значения ДКЭ для образцов исследованных гетероструктур с длиной резонатора 1.4–2 мм составили 35 и 50% для гетероструктур 1 и 2.

Распределение интенсивности излучения на торцевой грани образца гетероструктуры 2 с шириной полоска 6 мкм при различных токах накачки представлено на рис. 3. Лазер был установлен на микропозиционере, что позволило вычислить масштаб изображения при помощи сдвига лазера относительно микрообъектива и камеры. Из рис. 3 видно, что профиль ближнего поля излучения

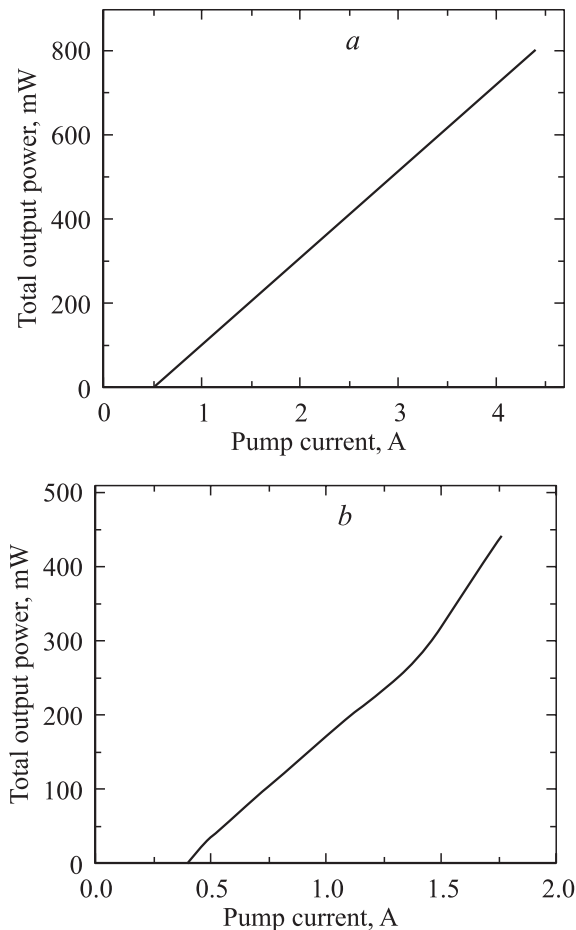


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики структур 1 (a) и 2 (b), полученные при импульсном возбуждении при $T = 20^\circ\text{C}$. a — $W = 6\ \mu\text{м}$, $L = 2\ \text{мм}$, $I_{\text{th}} = 500\ \text{мА}$; b — $W = 7\ \mu\text{м}$, $L = 1.4\ \text{мм}$, $I_{\text{th}} = 390\ \text{мА}$.

практически не меняется при увеличении тока накачки. Это позволяет говорить о том, что рост тока накачки не приводит к возникновению новых оптических мод и филаментации. Образцы с шириной полоска 7 и 8 мкм продемонстрировали схожее поведение. Полученные результаты подтверждают ранее опубликованные данные о существенном подавлении филаментации в полупроводниковых лазерах на квантовых точках [5].

На вставке к рис. 3 показано дальнейшее поле излучения в горизонтальном и вертикальном направлении для образца гетероструктуры 2 с шириной полоска 6 мкм при токе накачки, равном $2.4I_{\text{th}}$. Ширина на полувысоте (full width at half maximum (FWHM)) латерального поля лежала в диапазоне $5.6\text{--}7.1^\circ$ при токах накачки $I = (1.25\text{--}2.4)I_{\text{th}}$. Профиль распределения дальнего поля соответствовал профилю Гаусса, что было обнаружено также для лазеров с шириной полоска 7 и 8 мкм. В вертикальном направлении распределение дальнего поля не менялось при изменении тока накачки, расходимость пучка составила 43° , что находится в хорошем согласии с результатами расчетов, исходя из геометрии волновода. Таким образом, можно констатировать, что

исследованные длинноволновые лазеры на КТ излучают в фундаментальной оптической моде. Аналогичные результаты были получены и при исследовании гетероструктуры 1. При этом в горизонтальном направлении ширина дальнего поля излучения составила порядка $6\text{--}8^\circ$, а в вертикальном — $40\text{--}42^\circ$.

На рис. 4 представлены спектры излучения гетероструктуры 2 при комнатной температуре, полученные при импульсном возбуждении, в зависимости от тока накачки. Из рисунка видно, что на пороге лазерной генерации длина волны излучения составляет 1448.6 нм. При последующем росте тока накачки в длинноволновой области также возникает излучение с основным максимумом в районе 1460.5 нм. Аналогичное поведение спектров излучения в зависимости от тока накачки было

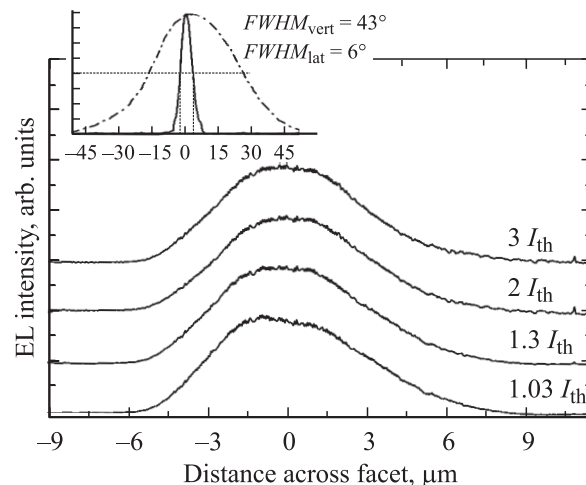


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения на торцевой грани образца структуры 2 с шириной полоска 6 мкм при различных токах накачки и $T = 20^\circ\text{C}$. На вставке — дальнее поле излучения в горизонтальном и вертикальном направлении при токе накачки, равном $2.4I_{\text{th}}$. $L = 1.4\ \text{мм}$.

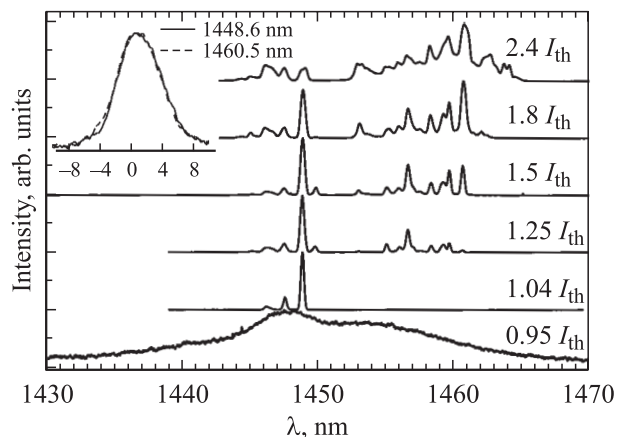


Рис. 4. Спектры излучения структуры 2, полученные при импульсном возбуждении и $T = 20^\circ\text{C}$, в зависимости от тока накачки. На вставке — дальнее поле излучения в горизонтальном направлении, полученное со спектральным разрешением при токе накачки $1.8I_{\text{th}}$. $W = 8\ \mu\text{м}$, $L = 1.4\ \text{мм}$.

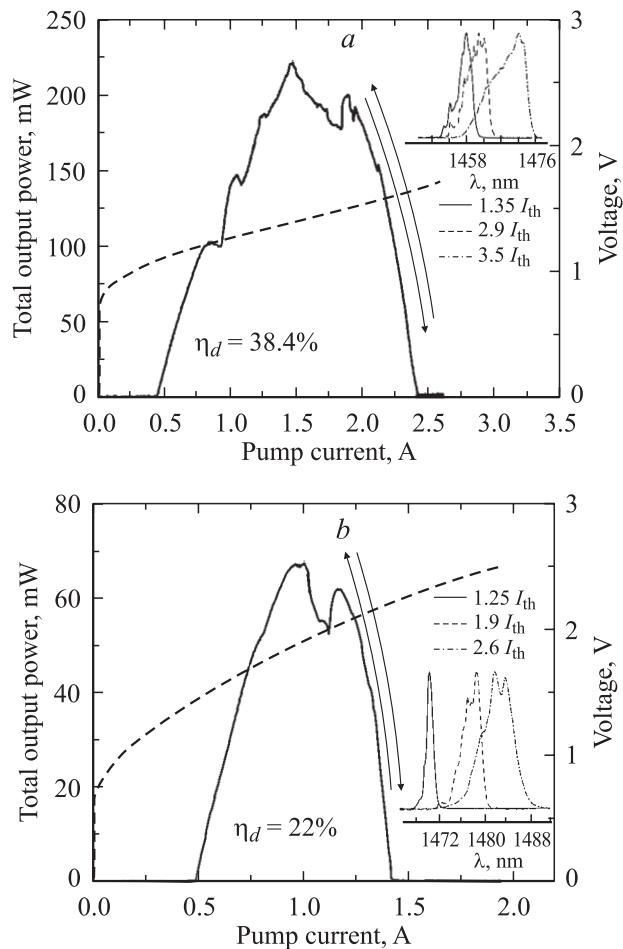


Рис. 5. Ватт-амперные (сплошные линии) и вольт-амперные (штриховые линии) характеристики излучения лазеров структуры 1 (*a*) и структуры 2 (*b*), полученные при непрерывной накачке при $T = 10^\circ$. На вставках — спектры излучения структур, полученные при непрерывной накачке. *a* — $W = 6$ мкм, $L = 2$ мм, $I_{th} = 430$ мА; *b* — $W = 7$ мкм, $L = 2$ мм, $I_{th} = 480$ мА.

обнаружено и для гетероструктуры 1. Для определения того, соответствуют ли два максимума в спектре одной и той же поперечной моде излучения или же они принадлежат различным модам, было исследовано со спектральным разрешением дальнейшее поле излучения образца структуры 2 в горизонтальном направлении при токе накачки $1.8I_{th}$. При этом монохроматор настраивался на разные максимумы ($\lambda_1 = 1448.6$ нм и $\lambda_2 = 1460.5$ нм) спектра излучения. Методика данного исследования была предложена в работе [19]. Измерения показали, что оба максимума в спектре имеют одинаковый профиль распределения (см. вставку на рис. 4) и соответствуют одной и той же поперечной моде. По всей видимости, переключение длины волны генерации с коротковолновой на более длинноволновую при токах накачки порядка $(1.25-1.5)I_{th}$ связано с разогревом активной области, что подтверждается спектральными исследованиями при непрерывной накачке, представленными далее. В дальней-

шем этот вопрос будет рассмотрен более детально после проведения дополнительных исследований.

На рис. 5, *a* и 5, *b* представлены ватт-амперные и вольт-амперные характеристики излучения лазеров гетероструктуры 1 ($W = 6$ мкм, $L = 2$ мм) и гетероструктуры 2 ($W = 7$ мкм, $L = 2$ мм) соответственно, полученные при непрерывной накачке при 10°C . Как видно из рис. 5, *a* и 5, *b*, с ростом тока накачки наблюдается увеличение выходной оптической мощности для обеих гетероструктур, причем кривые имеют особенности (так называемые кинки). При превышении некоторого значения тока накачки (1.5 А для гетероструктуры 1 и 1 А для гетероструктуры 2) происходит обратимое уменьшение выходной оптической мощности, связанное с разогревом активной области. Максимальная полная выходная оптическая мощность составила 220 мВт для гетероструктуры 1 и 70 мВт для гетероструктуры 2. ДКЭ составила 38.4% для гетероструктуры 1 и 22% для гетероструктуры 2. Как видно из рис. 5, *a*, исследованные метаморфные лазеры выдерживают работу при непрерывном режиме накачки без какой-либо заметной деградации вплоть до токов накачки порядка 2.6 А (~ 22 кА · см $^{-2}$).

Соответствующие спектры излучения гетероструктур 1 и 2, полученные при непрерывной накачке, представлены на вставках к рис. 5, *a* и 5, *b*. Кинки, наблюдаемые в ватт-амперных характеристиках, могут быть связаны с переключениями между различными группами продольных мод, наблюдаемыми в спектрах [20]. Смещение в длинноволновую область длины волны лазерной генерации с ростом тока накачки связано с разогревом активной области. Этот разогрев может быть оценен при помощи результатов, представленных на рис. 1, *a* и 1, *b*. Для этого положение максимума спектра излучения при непрерывной накачке необходимо сравнить с положением длины волны лазерной генерации в импульсном режиме при определенной температуре. Оценки показали, что для обеих структур максимальный разогрев составляет величину порядка 60°C .

4. Заключение

Исследованы метаморфные лазеры с квантовыми точками InAs-InGaAs, выращенные с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs, излучающие вблизи 1.5 мкм. Показано, что лазеры работают в одномодовом режиме при ширинах полоска $6-8$ мкм с высокой дифференциальной квантовой эффективностью (до 50%). Максимальная выходная оптическая мощность составила 220 мВт при непрерывной накачке и 800 мВт при импульсной накачке. Непрерывный и пространственно-одномодовый режимы работы продемонстрированы для лазеров подобного типа впервые. Достигнутая выходная мощность в непрерывном режиме на порядок превосходит значения, ранее опубликованные для лазеров этого спектрального диапазона на основе азотсодержащих квантовых ям. Отсутствие филаментации было продемонстрировано для исследованных

лазеров вплоть до высоких уровней возбуждения. Полученные результаты позволяют с уверенностью утверждать, что полупроводниковые гетероструктуры с метаморфными InAs–InGaAs КТ являются перспективными для создания высококачественных лазеров полосковой конструкции и лазеров с вертикальным резонатором с длиной волны излучения 1.3–1.5 мкм на подложках GaAs или на других подложках, рассогласованных по параметру решетки и (или) коэффициенту теплового расширения.

Авторы статьи выражают благодарность S. Rodt за профессиональную техническую помощь, а также Н.Д. Ильинской и И.Н. Каянтеру за плодотворные дискуссии.

Данная работа была поддержана в разных частях совместным Исследовательским проектом между ФТИ РАН (Санкт-Петербург, Россия) и NL-Nanosemiconductor-GmbH (Дортмунд, Германия), проектами Европейского сообщества „SANDIE“ (номер контракта NMP4-CT-2004-500101) и DOTCOM, РФФИ, DLR, INTAS и NATO linkage grant (PST.CLG.979646). А.Е. Жуков выражает благодарность финансовой поддержке в рамках гранта президента Российской Федерации по поддержке молодых ученых (MD-4277.2004.2). Н.В. Крыжановская благодарит за финансовую поддержку INTAS (Young Scientist Fellowship No 03-55-882). Л.Я. Карачинский благодарит за финансовую поддержку DFG (Германия).

Список литературы

- [1] N.N. Ledentsov. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **8**, 1015 (2002).
- [2] G. Park, O.B. Shchekin, D.L. Huffaker, D.G. Deppe. IEEE Phot. Technol. Lett., **12**, 230 (2000).
- [3] O.B. Shchekin, J. Ahn, D.G. Deppe. Electron. Lett., **38**, 712 (2002).
- [4] A.R. Kovsh, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, S.S. Mikhrin, A.P. Vasil'ev, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, D.A. Livshits, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Electron. Lett., **38**, 1104 (2002).
- [5] Ch. Ribbat, R.L. Sellin, I. Kaiander, F. Hopfer, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **82**, 952 (2003).
- [6] D.G. Deppe, D.L. Huffaker, S. Csutak, Z. Zou, G. Park, O.B. Shchekin. IEEE J. Quant. Electron., **35**, 1238 (1999).
- [7] D. Bimberg, N.N. Ledentsov, J.A. Lott. MRS Bulletin, **27**, 531 (2002).
- [8] M. Yano, H. Imai, M. Tukasagawa. J. Appl. Phys., **52**, 3172 (1981).
- [9] H. Ishikawa, I. Suemune. IEEE Phot. Technol. Lett., **6**, 344 (1994).
- [10] D. Gollub, S. Moses, M. Fischer, A. Forchel. Electron Lett., **39**, 777 (2003).
- [11] S.R. Bank, M.A. Wistey, L.L. Goddard, H.B. Yuen, V. Lordi, J.S. Harris, Jr. IEEE J. Quant. Electron., **40**, 656 (2004).
- [12] А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, Е.В. Никитина, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.М. Шерняков, Ю.Г. Мусихин, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **37**, 1143 (2003).

- [13] N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, S.S. Mikhrin, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, N.V. Kryzhanovskaya, V.M. Ustinov, D. Bimberg. Electron. Lett., **39**, 1126 (2003).
- [14] J.P. van der Ziel, N. Chand. J. Appl. Phys., **68**, 2731 (1990).
- [15] M.E. Groenert, Ch.W. Leitz, A.J. Pitera, V. Yang, H. Lee, R.J. Ram, E.A. Fitzgerald. J. Appl. Phys., **93**, 362 (2003).
- [16] K.K. Linder, J. Phillips, O. Qasaimeh, X.F. Liu, S. Krishna, P. Bhattacharya. Appl. Phys. Lett., **74**, 1355 (1999).
- [17] N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, V.A. Shchukin, S.S. Mikhrin, I.L. Krestnikov, A.V. Kozhukhov, L.Ya. Karachinsky, M.V. Maximov, I.I. Novikov, Yu.M. Shernyakov, I.P. Soshnikov, A.E. Zhukov, E.L. Portnoi, V.M. Ustinov, D. Gerthsen, P. Bhattacharya, N.F. Zakharov, P. Werner, F. Hopfer, M. Kuntz, D. Bimberg. Proc. SPIE, **5624**, 335 (2005).
- [18] М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.Г. Мусихин, Н.Н. Леденцов, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, Н.А. Малеев, Е.В. Никитина, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **38**, 763 (2004).
- [19] N.Yu. Gordeev, A.M. Georgievski, V.I. Kopchatov, S.V. Zaitsev, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Proc. Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology (St. Petersburg, Russia, 1997) p. 183.
- [20] D. Ouyang, R. Heitz, N.N. Ledentsov, S. Bognár, R.L. Sellin, Ch. Ribbat, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **81**, 1546 (2002).

Редактор Л.В. Беляков

CW 1.5 μm-range lasing of single mode metamorphic quantum dot lasers

L.Ya. Karachinsky^{*,+}, T. Kettler⁺, N.Yu Gordeev^{*}, I.I. Novikov^{*}, M.V. Maximov^{*}, Yu.M. Shernyakov^{*}, V.N. Kryzhanovskaya^{*}, A.E. Zhukov^{*}, E.S. Semenova^{*}, A.P. Vasil'ev^{*}, V.M. Ustinov^{*}, N.N. Ledentsov^{*,+}, A.R. Kovsh^{*,+}, V.A. Shchukin^{*,+}, S.S. Mikhrin^{*,+}, A. Lochmann⁺, O. Schultz⁺, L. Reissmann⁺, D. Bimberg⁺

^{*} Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia
⁺ Institut für Festkörperphysics, Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Deutschland
[≠] NL-Nanosemiconductor GmbH, 44227 Dortmund, Deutschland

Abstract Lasers based on InAs–InGaAs quantum dots grown on metamorphic (In,Ga,Al)As layers deposited on GaAs substrates using molecular beam epitaxy demonstrated the emission wavelength near 1.5 μ and differential efficiency of about 50%. It is shown that the narrow stripe lasers operate continuous wave (CW) in a single transverse mode and withstand current densities above 20 kA · cm⁻² without significant degradation. CW output power in excess of 220 mW is demonstrated. It has been shown that the lasers demonstrate no beam filamentation up to the highest current densities studied.