

07;09

## Лазеры на основе квантовых яма-точек, излучающие в оптических диапазонах 980 и 1080 nm

© А.М. Надточий<sup>1-3</sup>, С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, Н.А. Калужный<sup>2</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>2</sup>, Г.О. Корнышов<sup>1,3</sup>, А.А. Серин<sup>2</sup>, А.С. Паюсов<sup>2</sup>, В.Н. Неведомский<sup>2</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>2</sup>, М.В. Максимов<sup>1-3</sup>, А.Е. Жуков<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступило в Редакцию 30 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 30 ноября 2018 г.

Принято к публикации 3 декабря 2018 г.

Проведено сравнение характеристик торцевых лазеров с активной областью на основе нового типа наноструктур — квантовых яма-точек с различной длиной волны излучения. Для структур, излучающих на длинах волн 980 и 1080 nm, продемонстрированы минимальные значения пороговой плотности тока 160 и 125 A/cm<sup>2</sup>, внутренние квантовые эффективности 74 и 85% и внутренние потери 1.1 и 0.9 cm<sup>-1</sup> соответственно.

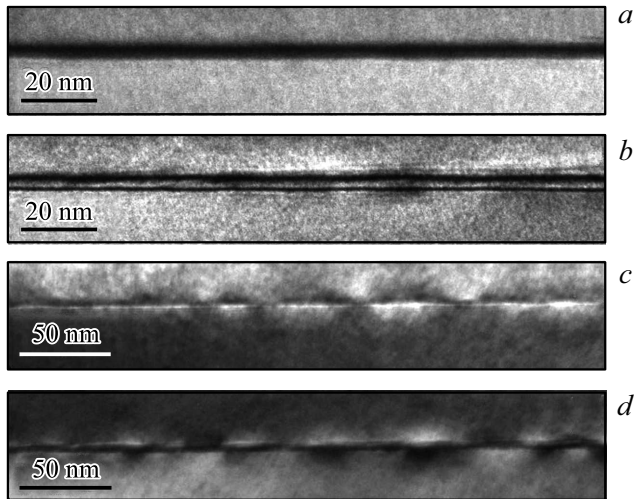
DOI: 10.21883/PJTF.2019.04.47337.17615

В последнее время внимание исследователей привлекают квантово-размерные гетероструктуры, занимающее промежуточное положение между квантовыми ямами и квантовыми точками — квантовые яма-точки (КЯТ). Было продемонстрировано, что КЯТ, представляющие собой модуляции толщины и состава квантовой ямы [1,2], а также сходные с ними по свойствам наноструктуры [3], могут образовываться в процессе осаждения твердых растворов In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с умеренным содержанием индия ( $x \sim 0.2-0.5$ ) методами газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений или молекулярно-пучковой эпитаксии [4]. В работе [5] было показано, что при увеличении состава и/или эффективной толщины осажденного InGaAs свойства КЯТ могут меняться от характерных для квантовых ям до характерных для традиционных квантовых точек. КЯТ позволяют реализовать высокий уровень оптического поглощения/усиления и частичное перераспределение напряжений двумерного слоя в массив упругонапряженных областей без образования дефектов с высокой концентрацией. Был продемонстрирован рекордно высокий прирост фототока GaAs-фотопреобразователя на основе КЯТ [6], а также сходных с ними наноструктур [3]. С точки зрения использования в лазерах КЯТ обладают меньшими длинами латеральной диффузии носителей заряда, что позволяет реализовать микродисковые лазеры малого размера [7]. Данное свойство КЯТ перспективно для уменьшения безызлучательной рекомбинации на зеркалах торцевых лазеров и соответственно для повышения максимальной выходной мощности и деградационной стойкости приборов. В работе [8] нами были продемонстрированы торцевые лазеры оптического диапазона около

1060–1110 nm на основе КЯТ. В то же время для ряда приложений, в том числе для накачки твердотельных лазеров и волоконных усилителей, необходимы мощные полупроводниковые лазеры с длиной волны излучения 970–980 nm. В настоящей работе исследуются КЯТ этого спектрального диапазона и торцевые лазеры на их основе, а также проводится сравнение их характеристик с лазерами на основе КЯТ более длинноволнового оптического диапазона — 1080 nm.

Лазерные структуры синтезировались на слабоориентированных подложках  $n^+$ -GaAs (100) и представляли собой последовательность слоев: буфер  $n^+$ -GaAs, эмиттер  $n$ -Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As толщиной 1.5 μm, нелегированный волновод GaAs толщиной 0.75 μm, эмиттер  $p$ -Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As толщиной 1.5 μm и контактный слой  $p^+$ -GaAs толщиной 0.35 μm. Активная область, состоящая из двух слоев КЯТ, разделенных барьером GaAs толщиной 40 nm, располагалась в центре волновода. В первой лазерной структуре, обозначенной нами QWD980, использовались КЯТ, излучающие в оптическом диапазоне 980 nm, которые формировались осаждением 4 монослоев (ML) In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As. Во второй лазерной структуре, обозначенной QWD1080, были использованы КЯТ, сформированные осаждением в 2 раза большего числа монослоев (8 ML) In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As и излучающие в более длинноволновом оптическом диапазоне 1080 nm.

Результаты исследований морфологии активной области методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) представлены на рис. 1. ПЭМ-измерения выполнены с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100F федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.



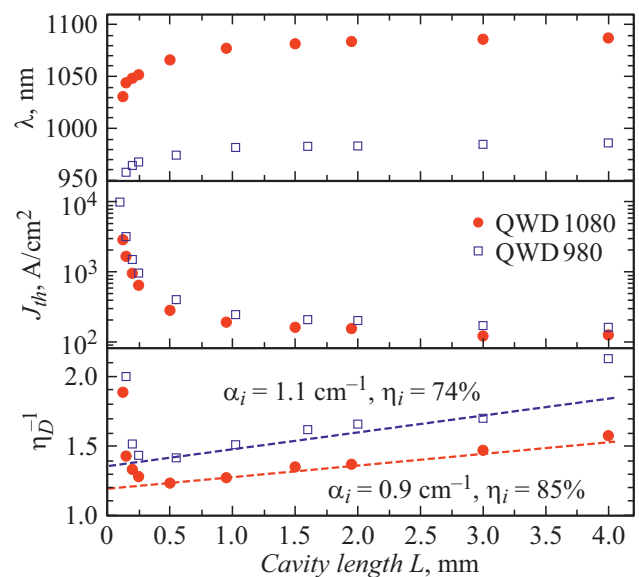
**Рис. 1.** Темнопольные ПЭМ-изображения активной области лазеров QWD980 (a, c) и QWD1080 (b, d), полученные в рефлексах (200) (a, b) и (400) (c, d).

Слои КЯТ в обоих образцах имеют планарную нижнюю границу и незначительный рельеф (изменение толщины  $\sim 10\text{--}20\%$ ) верхней границы. На рис. 1, a, b приведены темнопольные ПЭМ-изображения образцов, полученные в рефлексе (200), контраст в котором преимущественно определяется химическим составом изучаемых слоев. Для образца QWD1080 (рис. 1, b) область гетерограницы между GaAs и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  хорошо различима по темным полосам, соответствующим составу  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с  $x \approx 0.2$ . Это связано с эффектом инверсии контраста слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в рефлексе (200) [9], который имеет место из-за изменения знака структурного фактора рассеяния при увеличении  $x$  от 0 до 1. В структуре QWD1080 яркость  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  между двумя темными полосами сопоставима с яркостью от GaAs-матрицы, что позволяет судить о близости среднего состава КЯТ к  $x = 0.4$ , а средняя толщина  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  хорошо согласуется с толщиной, заданной при эпитаксиальном росте. Однако толщина  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в структуре QWD980 на ПЭМ-изображении значительно больше номинальной, а область InGaAs имеет более темный контраст. Это позволяет заключить, что при выращивании КЯТ, формируемых осаждением тонких слоев, необходимо учитывать перемешивание атомов индия и галлия. Таким образом, в структуре QWD980 выращенный слой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  имеет среднюю толщину около 8 ML и средний состав  $x \sim 0.2$ .

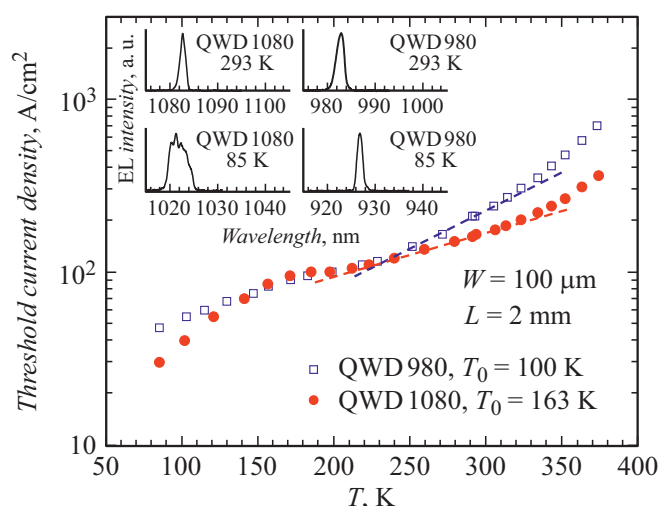
На изображениях ПЭМ обоих образцов, полученных в рефлексе (400) (рис. 1, c, d), присутствуют характерные для КЯТ латеральные модуляции упругих напряжений, обусловленные формированием областей с повышенной концентрацией индия. Эти области, которые формируются за счет латерального перераспределения атомов индия и галлия в процессе роста, служат центрами локализации носителей заряда. Расстояние между соседними островками в обоих структурах составляет около 30 nm.

На основе эпитаксиальных структур были изготовлены лазеры полосковой конструкции с шириной полоски  $W = 100 \mu\text{m}$ . Просветляющие и отражающие покрытия на лазерные грани не наносились. Измерения пороговой плотности тока, дифференциальной эффективности и спектров лазерной генерации проводились в импульсном режиме накачки при температуре  $20^\circ\text{C}$ , которая стабилизировалась при помощи элемента Пельтье. Длительность импульсов составляла  $0.3\text{--}0.5 \mu\text{s}$ , частота следования  $1\text{--}2 \text{kHz}$ . Также были исследованы температурные зависимости лазерных характеристик.

На рис. 2 представлены зависимости длины волны лазерной генерации, пороговой плотности тока и обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора для обеих структур. В лазерах с длиной резонатора 4 mm длина волны лазерной генерации отстоит примерно на 7 nm в длинноволновую сторону от максимума фотолюминесценции соответствующих тестовых структур и составляет 987 nm для QWD980 и 1087 nm для QWD1080, пороговая плотность тока в таких диодах составляет  $160$  и  $125 \text{A/cm}^2$  соответственно (рис. 2). Для обеих структур с уменьшением длины лазерного резонатора до 0.5 mm длина волны лазерной генерации плавно сдвигается в коротковолновую сторону (примерно на 15 nm), а пороговая плотность тока остается достаточно низкой (менее  $500 \text{A/cm}^2$ ). При дальнейшем уменьшении длины резонатора происходит резкий коротковолновый сдвиг длины волны генерации, сопровождающийся значительным увеличением пороговой плотности тока. Такое поведение указывает на приближение модального усиления к насыщению, величина которого обусловлена максимальным оптическим усилением активной области.



**Рис. 2.** Зависимость от длины резонатора  $L$  длины волны лазерной генерации  $\lambda$ , пороговой плотности тока  $J_{th}$  и обратной дифференциальной квантовой эффективности  $\eta_D^{-1}$  лазеров, изготовленных из структур QWD980 и QWD1080.



**Рис. 3.** Температурные зависимости пороговой плотности тока лазеров, изготовленных из структур QWD980 и QWD1080. На вставках показаны спектры генерации при 85 и 293 К.

Лазеры, изготовленные на основе структуры QWD1080, демонстрируют более высокую внешнюю дифференциальную эффективность по сравнению с QWD980: 68% против 59% для длины резонатора 3 мм, что обусловлено более высокой внутренней квантовой эффективностью ( $\eta_i = 85\%$ ) и меньшими внутренними оптическими потерями ( $\alpha_i = 0.9 \text{ cm}^{-1}$ ) по сравнению с лазерами, изготовленными из структуры QWD980 ( $\eta_i = 74\%$ ,  $\alpha_i = 1.1 \text{ cm}^{-1}$ ). Можно предположить, что этому способствует большая энергия локализации носителей в активной области длинноволновой структуры, достигаемая за счет большей средней толщины InGaAs и более сильной модуляции состава и полей упругих напряжений.

Температурные зависимости пороговой плотности тока лазера имеют качественно схожий вид (рис. 3). Увеличение пороговой плотности тока с температурой вблизи комнатной описывается характеристической температурой 100 К (QWD980) и 163 К (QWD1080), что может быть объяснено более эффективной локализацией носителей в последнем случае. В диапазоне 150–200 К наблюдается уменьшение наклона зависимости пороговой плотности тока от температуры. Такое поведение связано с выбросом носителей заряда из КЯТ и перезахватом в объекты малой плотности и большего размера, напоминающие по своим характеристикам квантовые точки, сформированные в режиме роста Странского–Крастанова [2]. При этом участок высокой температурной стабильности вблизи 200 К выражен в структуре QWD1080 сильнее. На наш взгляд, это также является следствием более глубокой локализации носителей в активной области лазера QWD1080, которая по своим характеристикам больше напоминает квантовые точки, чем активная область лазера QWD980.

Спектры генерации обоих лазеров при 85 и 293 К представлены на вставке к рис. 3. При 85 К ширина линии генерации по уровню интенсивности 0.5 в структуре QWD1080 составляет 4 нм, а в структуре QWD980 — всего 2 нм. Уширение линии генерации при низких температурах хорошо известно для лазеров на основе квантовых точек и обусловлено отсутствием латерального транспорта носителей вследствие их эффективной трехмерной локализации [10]. Большая ширина низкотемпературного спектра генерации в лазерной структуре QWD1080 по сравнению с QWD980 свидетельствует о большей неупорядоченности массива КЯТ в первом случае, что согласуется с температурными зависимостями порога лазерной генерации. При комнатной температуре обе лазерные структуры характеризуются близкими значениями ширины спектра лазерной генерации.

Таким образом, проведено сравнительное исследование характеристик лазерных диодов, изготовленных из гетероструктур на основе КЯТ InGaAs/GaAs, сформированных при осаждении 4 либо 8 ML  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ . Показано, что лазеры, изготовленные из второй структуры, демонстрируют лучшие приборные характеристики: меньшую пороговую плотность тока, более высокую дифференциальную квантовую эффективность и меньшие внутренние потери, что, по-видимому, связано с более сильной локализацией носителей заряда в КЯТ относительно состояний матрицы GaAs. Ожидается, что использование более широкозонного волноводного слоя AlGaAs даже при небольшом содержании алюминия позволит улучшить приборные характеристики лазеров на основе КЯТ диапазона 980 нм.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект 3.9787.2017/8.9).

## Список литературы

- [1] Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Lantrantov V.M., Maximov M.V., Nadtochiy A.M., Rouvimov S., Zhukov A.E. // *Nanotechnology*. 2015. V. 26. N 38. P. 385202. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/26/38/385202>
- [2] Надточий А.М., Минтаиров С.А., Калюжный Н.А., Рувимов С.С., Шерняков Ю.М., Паюсов А.С., Максимов М.В., Жуков А.Е. // *ФТП*. 2015. Т. 49. В. 8. С. 1115–1119.
- [3] Sugiyama M., Fujii H., Katoh T., Toprasertpong K., Sodabanlu H., Watanabe K., Alonso-Alvarez D., Ekins-Daukes N.J., Nakano Y. // *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 2016. V. 24. N 12. P. 1606–1614. DOI: 10.1002/pip.2769
- [4] Ledentsov N.N., Bimberg D., Shernyakov Yu.M., Kochnev V., Maximov M.V., Sakharov A.V., Krestnikov I.L., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Tsatsul'nikov A.F., Volovik B.V., Ustinov V.M., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Kosogov A.O., Werner P. // *Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 70. N 21. P. 2888–2890.
- [5] Nadtochiy A.M., Maximov M.V., Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Nevedomskiy V.N., Rouvimov S.S., Zhukov A.E. // *Phys. Status Solidi B*. 2018. V. 255. N 9. P. 1800123. DOI: 10.1002/pssb.201800123

- [6] *Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Maximov M.V., Nadtochiy A.M., Rouvimov S., Zhukov A.E.* // *Electron. Lett.* 2015. V. 51. N 20. P. 1602–1604.
- [7] *Moiseev E., Kryzhanovskaya N., Maximov M., Zubov F., Nadtochiy A., Kulagina M., Zadiranov Y., Kalyuzhnyy N., Mintairov S., Zhukov A.* // *Opt. Express.* 2018. V. 43. N 19. P. 4554–4557.  
DOI: 10.1364/OL.43.004554
- [8] *Maximov M.V., Nadtochiy A.M., Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Gordeev N.Y., Payusov A.S., Shernyakov Y.M., Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Kulagina M.M., Zhukov A.E.* Edge-emitting and microdisk lasers based on hybrid quantum-well-dot structures // *Int. Conf. Laser Optics (ICLO)*. St. Petersburg, 2018. P. 127.  
DOI: 10.1109/LO.2018.8435221
- [9] *Leifer K., Buffat P.A., Cagnon J., Kapon E., Rudra A., Stadelmann P.A.* // *J. Cryst. Growth.* 2002. V. 237–239. Pt 2. P. 1471–1475. DOI: 10.1016/S0022-0248(01)02297-7
- [10] *Савельев А.В., Новиков И.И., Максимов М.В., Шерняков Ю.М., Жуков А.Е.* // *ФТП.* 2009. Т. 43. В. 12. С. 1641–1645.