

# Мощные лазеры на квантовых точках InAs–InGaAs спектрального диапазона 1.5 мкм, выращенные на подложках GaAs

© М.В. Максимов<sup>¶</sup>, 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

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

(Получена 26 ноября 2003 г. Принята к печати 27 ноября 2003 г.)

Исследованы ватт-амперные, температурные и спектральные характеристики длинноволновых (1.46–1.5 мкм) лазеров, выращенных на подложках GaAs, с активной областью на основе квантовых точек InAs–InGaAs. Для достижения требуемой длины волны квантовые точки формировались на метаморфном буферном слое InGaAs с содержанием индия около 20%. Максимальная выходная мощность лазеров составила 7 Вт в импульсном режиме при комнатной температуре. Дифференциальная эффективность прибора с длиной резонатора 1.5 мм составила 50%. Температурная зависимость пороговой плотности тока в диапазоне 10–73 °С описывается характеристической температурой 61 К.

## 1. Введение

Лазеры, излучающие в диапазоне 1.55 мкм, являются основными компонентами систем дальней оптоволоконной связи. Традиционно используемые для данного спектрального диапазона гетероструктуры GaInAsP или AlGaInAs на подложках InP обладают недостаточно высокой температурной стабильностью длины волны генерации и порогового тока. Вследствие малой разницы показателей преломления между GaInAs и AlInAs для достижения требуемого для вертикального лазера коэффициента отражения распределенного брэгговского зеркала ( $> 0.99$ ) необходимо не менее 50 пар слоев. Таким образом, создание монолитных поверхностно излучающих лазеров на основе вертикального микрорезонатора в данной системе материалов представляется чрезвычайно затруднительным. В связи с этим значительные усилия были направлены на получение структур на подложках GaAs, излучающих в диапазоне 1.45–1.55 мкм. Ожидается, что более сильная локализация носителей в активной области таких структур позволит улучшить температурную стабильность длинноволновых лазеров. В вертикальных лазерах, выращенных на подложках GaAs, возможно использование хорошо отработанных GaAs–AlGaAs брэгговских зеркал, оксидированных GaAs–AlO<sub>2</sub> зеркал, а также оксидированных апертур.

Для достижения длин волн излучения 1.45–1.55 мкм в структурах на подложках GaAs был предложен ряд технологических подходов: вертикально связанные квантовые точки [1], рост квантовых точек при низких температурах подложки [2], использование квантовых ям GaInAsN/GaAsN [3] или GaInNAsSb/GaNAsSb [4,5]. В лазере с активной областью на основе квантовой ямы GaInAsN/GaAsN была продемонстрирована лазерная генерация на длине волны 1.49 мкм с пороговой плотностью тока 7 кА/см<sup>2</sup> [3]. Внешняя эффективность

и максимальная выходная мощность в импульсном режиме составили соответственно 0.14 Вт/А и 130 мВт в полоске шириной 4 мкм и длиной 1200 мкм с двумя сколотыми гранями. В лазере с активной областью на основе пятерного соединения GaInNAsSb была достигнута лазерная генерация на длине волны 1.463 мкм при достаточно высокой дифференциальной эффективности (45%) и сравнительно низкой пороговой плотности тока 2.8 кА/см<sup>2</sup> [4]. Максимальная выходная мощность составила около 70 мВт (ширина полоска 5 мкм, длина — 1200 мкм). В работе [5] для лазера с аналогичной активной областью GaInNAsSb была продемонстрирована генерация при больших по сравнению с работой [4] длинах волн (1.5 мкм). В то же время пороговая плотность тока была несколько выше (3.5 кА/см<sup>2</sup>), а дифференциальная эффективность существенно меньше (12%), чем в работе [4].

Особенно перспективным представляется использование квантовых точек (КТ), полученных методом самоорганизации, в качестве активной области длинноволновых светоизлучающих приборов в подложках GaAs. Данная концепция позволила реализовать лазеры оптического диапазона  $\sim 1.3$  мкм [6,7], обладающие низкой пороговой плотностью тока (100 А/см<sup>2</sup> на 10 слоев КТ), высокой дифференциальной эффективностью (88%) и высокой температурной стабильностью (характерная температура  $T_0 = 150$  К). Недавно нами была продемонстрирована лазерная генерация на длине волны 1.488 мкм в структурах с активной областью на основе многослойных массивов самоорганизующихся квантовых точек, выращенных на подложках GaAs [8]. Для достижения данного спектрального диапазона структуры выращивались на толстом метаморфном буферном слое In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As. В полоске длиной  $L = 1200$  мкм пороговая плотность тока составила 1.5 кА/см<sup>2</sup> при комнатной температуре. Максимальная квантовая эффективность равнялась 50% ( $L = 2000$  мкм) [8].

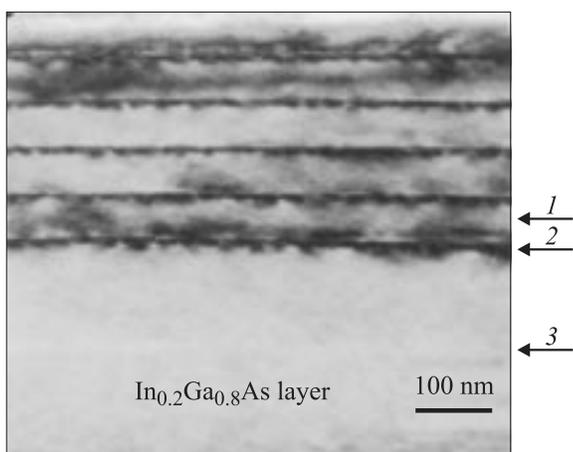
<sup>¶</sup> E-mail: Maximov@beam.ioffe.ru

В данной работе мы исследуем мощностные, температурные и спектральные характеристики лазеров с активной областью на основе КТ, осажденных на метаморфном буферном слое  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , и показываем, что использование подобных структур позволяет реализовать выходные мощности, рекордно высокие для лазеров спектрального диапазона  $\sim 1.5$  мкм на подложках GaAs.

## 2. Эксперимент

Исследуемые лазерные структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках  $n^+$ -GaAs(100). Специальные режимы выращивания метаморфного буферного слоя InGaAs позволяют в существенной степени снизить плотность дислокаций, прорастающих в верхние (активные) слои. В качестве лазерного волновода использовался слой  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , а в качестве эмиттеров слои  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ . В середину волноводного слоя помещены 10 рядов самоорганизующихся квантовых точек InAs/ $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ , разделенных спейсерами толщиной 45 нм. Специальные режимы выращивания позволяют предотвратить формирование большого количества дислокаций в активной области (рис. 1). Более подробное описание лазерной структуры и режимов эпитаксиального роста приведено в работе [8].

Лазерные диоды изготавливались в геометрии с четырьмя сколотыми гранями, а также в полосковой геометрии (ширина полоска составляла 100 мкм). Образцы напайвались на медные теплоотводы  $p$ -слоями вниз при помощи индиевого припоя. Лазерные характеристики исследовались при накачке импульсным током (длительность импульса 300 нс, частота повторения 1 кГц).



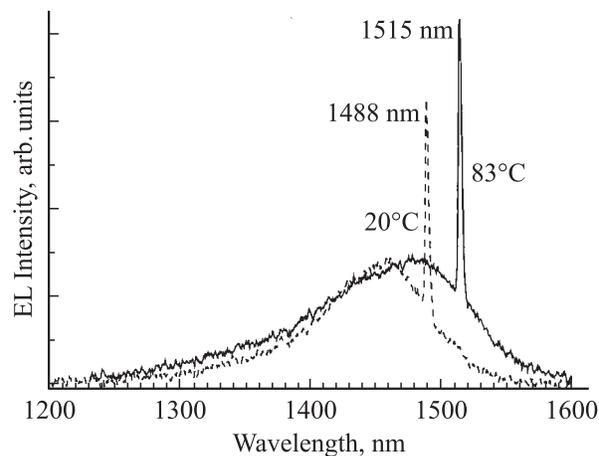
**Рис. 1.** Изображение квантовых точек InAs-InGaAs, выращенных на метаморфном переходном слое InGaAs, полученное методом электронной микроскопии (поперечное сечение): 1 — спейсер  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , 2 — слой КТ, 3 — сверхрешетка  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{AlGaAs}$ .

Пороговая плотность тока длинноволновых лазеров на подложках GaAs в зависимости от длины волны генерации

Номер эпитаксиальной структуры	Длина волны генерации, нм	Пороговая плотность тока, А/см <sup>2</sup>
5-450	1445	880
5-451	1466	860
5-478	1480	800
5-449	1488	800

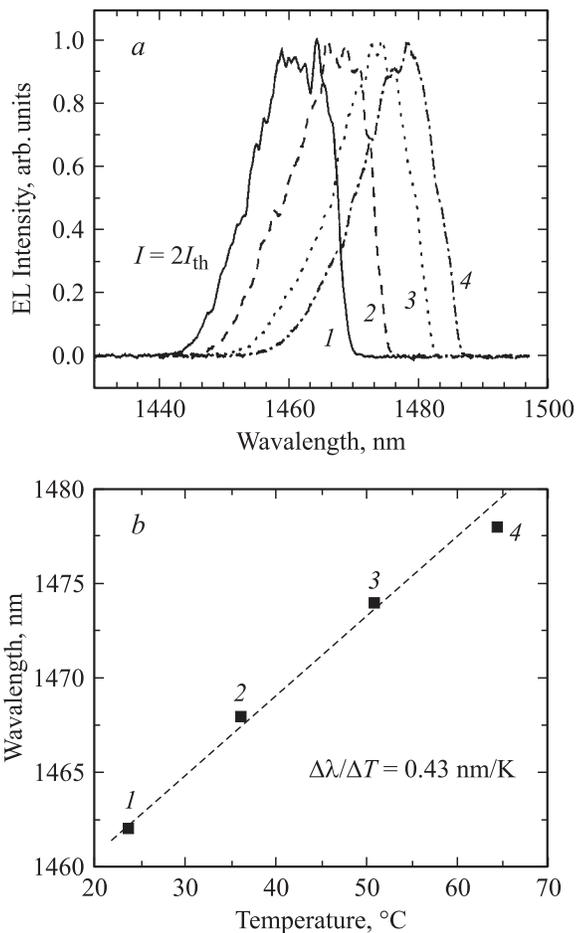
## 3. Результаты и обсуждение

Для определения максимально возможной длины волны лазерной генерации и минимальной пороговой плотности тока в исследуемых структурах нами использовались образцы с четырьмя сколотыми гранями. В такой геометрии внешние потери пренебрежимо малы. Чем меньше потери на выход, тем при больших длинах волн и меньших плотностях тока начинается лазерная генерация [9]. Выращивание структур на метаморфном переходном слое InGaAs, предназначенном для релаксации напряжений, позволяет достичь длины волны лазерной генерации 1488 нм при комнатной температуре (рис. 2). Важно отметить, что при увеличении длины волны пороговая плотность не увеличивается (таблица). При температуре 83°C длина волны генерации составляет 1515 нм.



**Рис. 2.** Спектры лазерной генерации для образца с четырьмя сколотыми гранями при 20 и 83°C. Размер образца  $350 \times 350$  мкм.

В полосковом лазере при комнатной температуре длина волны максимума спектра генерации составляет 1460 нм (рис. 3, *a*). Коротковолновый сдвиг обусловлен увеличением потерь на выход [9]. Температурную зависимость длины волны в максимуме спектра генерации можно аппроксимировать линейной зависимостью с коэффициентом 0.43 нм/К (рис. 3, *b*). Отсутствие скачкообразного уменьшения длины волны генерации с



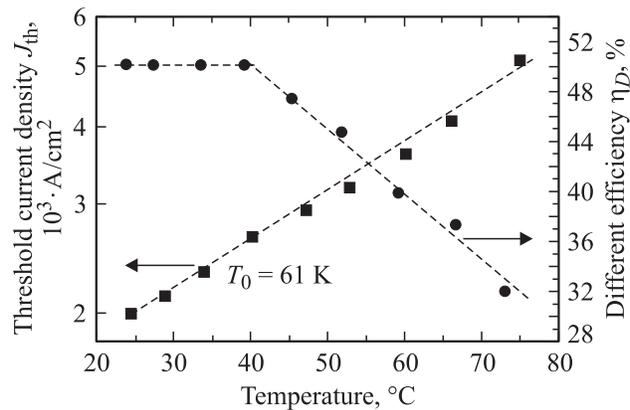
**Рис. 3.** Спектры лазерной генерации при различных температурах (a) и температурная зависимость длины волны генерации (b) для полоскового лазера. Ширина полоска 100 мкм, длина 1500 мкм. Температура, °C: 1 — 23, 2 — 36, 3 — 51, 4 — 65.

ростом температуры означает, что при всех температурах генерация осуществляется через основное состояние квантовых точек.

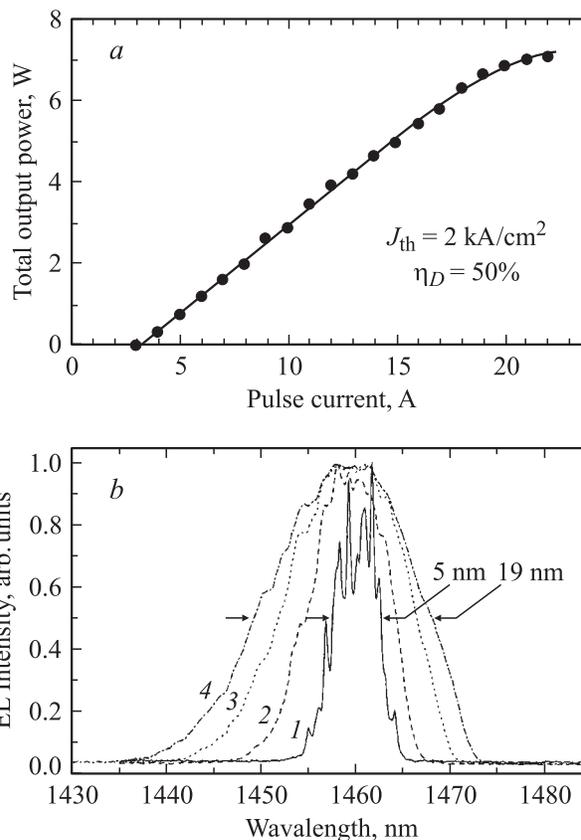
Температурная зависимость дифференциальной эффективности и пороговой плотности тока показаны на рис. 4. На участке 25–72 °C увеличение пороговой плотности тока описывается характеристической температурой  $T_0 = 61$  K. Дифференциальная эффективность составляет 50% при 25 °C и практически не меняется до 40 °C, а затем уменьшается до 32% при 72 °C. В лазере с активной областью на основе GaInNAsSb  $T_0$  составляет 83 K в диапазоне 10–35 °C [5], но при более высоких температурах наблюдалось резкое увеличение пороговой плотности тока.

На рис. 5 представлена ватт-амперная характеристика лазера длиной 1.5 мм в импульсном режиме. Отражающие покрытия на грани лазера не наносились. Пороговая плотность  $J_{th}$  составляет 2.0 кА/см<sup>2</sup>. Ватт-амперная характеристика лазера близка к линейной вплоть до токов 17 А, что свидетельствует об отсутствии перегре-

ва активной области. Дифференциальная эффективность  $\eta_D$  составляет 50%. Спектры лазерной генерации при различных токах показаны на вставке к рис. 5. При 3 А полуширина спектра составляет 5 нм. При увеличении тока до 16 А спектр уширяется до 19 нм, положение максимума при этом не изменяется. Таким образом, вплоть до максимальных значений выходной мощности генерация происходит через основное состояние квантовых точек.



**Рис. 4.** Температурная зависимость дифференциальной эффективности и пороговой плотности тока.



**Рис. 5.** Зависимость выходной мощности на 2 сколотые грани от тока инжекции в импульсном режиме (a) и спектры лазерной генерации при различных токах накачки, А: 1 — 3.3, 2 — 6, 3 — 10, 4 — 16 (b).

#### 4. Заключение

Получены лазеры с квантовыми точками InAs–InGaAs спектрального диапазона 1.4–1.5 мкм, выращенные на подложках GaAs. Пороговая плотность тока и дифференциальная эффективность лазеров с длиной резонатора 1.5 мкм составили соответственно 2 кА/см<sup>2</sup> и 50%. Достигнута высокая выходная мощность 7 Вт при комнатной температуре в импульсном режиме. Данные результаты показывают перспективность подхода, основанного на концепции метаморфного роста, для создания длинноволновых излучателей на GaAs.

Работа выполнена при поддержке совместного проекта ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и NSC-Nanosemiconductor-GmbH (Германия), Volkswagen Foundation, INTAS.

#### Список литературы

- [1] Б.В. Воловик, Д.С. Сизов, А.Ф. Цацульников, Ю.Г. Мусихин, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Егоров, В.Н. Петров, Н.К. Поляков, Г.Э. Цырлин. ФТП, **34**, 1368 (2000).
- [2] А.Е. Жуков, Б.В. Воловик, С.С. Михрин, Н.А. Малеев, А.Ф. Цацульников, Е.В. Никитина, И.Н. Каяндер, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов. ПЖТФ, **27**, 51 (2001).
- [3] D. Gollub, M. Fisher, A. Forchel. Electron. Lett., **38**, 1183 (2002).
- [4] W. Ha, V. Gambin, S. Bank, M. Wistley, H. Yuen, L. Goddard, S. Kim. J. Harris. *Abstracts Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy* (San-Francisco, USA, 2002) p. 61.
- [5] L.H. Li, V. Sallet, G. Patriarche, L. Largeau, S. Bouchoule, K. Merhem, L. Travers, J.C. Harmand. Electron. Lett., **39**, 519 (2003).
- [6] С.С. Михрин, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, В.М. Устинов, М.М. Кулагина, Е.В. Никитина, И.П. Сошников, Ю.М. Шерняков, Д.А. Лившиц, Н.В. Крыжановская, Д.С. Сизов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, D. Bimberg, Ж.И. Алфёров. ФТП, **36**, 1400 (2002).
- [7] A.R. Kovsh, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, S.S. Mikhlin, A.R. 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).
- [8] А.Е. Жуков, А.П. Васильев, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, А.Ю. Егоров, В.А. Одноблюдов, Н.А. Малеев, Е.В. Никитина, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **38**, (2004).
- [9] L.V. Asryan, M. Grundmann, N.N. Ledentsov, O. Stier, R.A. Suris, D. Bimberg. IEEE J. Quant. Electron., **37**, 418 (2001).

Редактор Л.В. Беляков

#### High-power InAs–InGaAs quantum dot lasers for 1.5 μm spectral region grown on GaAs substrates

M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov,  
N.V. Kryzhanovskaya, A.G. Gladyshev, Yu.G. Musikhin,  
N.N. Ledentsov, A.E. Zhukov, A.P. Vasil'ev, A.R. Kovsh,  
S.S. Mikhlin, E.S. Semenova, N.A. Maleev,  
E.V. Nikitina, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov

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

**Abstract** Light-current, spectral and temperature characteristics of longwavelength (1.46–1.5 μm) lasers grown on GaAs substrates with active area based on InAs–InGaAs quantum dots are studied. To achieve required lasing wavelength the quantum dots were grown at the top of a metamorphic InGaAs buffer with In content about 20%. Maximum pulsed output power is 7 W at room temperature. Differential efficiency of a 1.5 mm long device is 50%. Temperature dependence of threshold current is described by characteristic temperature 61 K in the temperature region 10–73°C.