

## Связь длины волны и усиления в лазерах на квантовых ямах, точках и яма-точках

© Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, Н.Ю. Гордеев<sup>2</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>2</sup>, А.А. Бекман<sup>2</sup>, А.С. Паюсов<sup>2</sup>,  
С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, Н.А. Калюжный<sup>2</sup>, М.В. Максимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский  
Академический университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: supergrigoir@gmail.com

Поступила в Редакцию 2 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 7 декабря 2022 г.

Принята к публикации 7 декабря 2022 г.

Представлено систематическое исследование серии InGaAs/GaAs-лазеров оптического диапазона 1–1.3 мкм на квантовых ямах (2D), точках (0D) и яма-точках (0D/2D), которые являются наноструктурами переходной размерности. В широком диапазоне токов накачки измерена и проанализирована зависимость длины волны лазерной генерации от постоянной усиления слоя, параметра, позволяющего сравнивать лазеры с различным типом активной области и различным дизайном волновода. Показано, что максимальное оптическое усиление квантовых яма-точек существенно выше, а диапазон значений длин волн генерации, достижимых в торцевых лазерах без использования внешнего резонатора, шире, чем в лазерах на квантовых ямах и квантовых точках.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, квантовая яма, квантовые точки, квантовые яма-точки, оптическое усиление.

DOI: 10.21883/FTP.2022.12.54514.4408

### 1. Введение

В современных InGaAs/GaAs-полупроводниковых приборах, в частности лазерах, усилителях, фотодиодах, солнечных элементах, преобладают активные области на основе квантовых ям (КЯ) и квантовых точек (КТ). КЯ широко используются благодаря высокому оптическому усилению, которое может достигать  $48 \text{ см}^{-1}$  для одного слоя КЯ [1]. С другой стороны, упругие напряжения в квантовых ямах налагают технологические ограничения на их толщину и количество. Это приводит к значительному усложнению технологий эпитаксиального роста и уменьшению оптического усиления приборов с длиной волны  $> 1 \text{ мкм}$ . Квантовые точки лишены таких проблем, поскольку упругие напряжения в слоях активной области отсутствуют, но из-за низкой плотности и дисперсии точек по размерам характерная величина оптического усиления составляет  $\leq 5\text{--}8 \text{ см}^{-1}$  [2]. Лазеры на КТ работают в широком диапазоне длин волн, но с повышением тока накачки из-за насыщения усиления на основном состоянии могут переключаться на генерацию через возбужденное состояние.

Многие научные группы работают над созданием гибридных гетероструктур, которые бы совмещали преимущества КЯ и КТ. Нами был предложен и экспериментально апробирован новый тип наноструктур InGaAs/GaAs, которые характеризуются переходной размерностью (0D/2D), названный квантовыми яма-точками (КЯТ) [3,4]. КЯТ представляет собой сверхплотный

однородный массив областей с высокой концентрацией In внутри квантовой ямы с низким содержанием In. Было показано, что аналогично квантовым точкам за счет уменьшения упругих напряжений в активной области можно выращивать вплоть до 20 слоев КЯТ [5] без образования дислокаций. Снижение напряжений позволяет также расширить волновод, что дает возможность обеспечить необходимое модальное усиление в лазерах высокой мощности [6]. Для одного слоя КЯТ экспериментально продемонстрировано оптическое усиление  $33 \text{ см}^{-1}$  [7], что значительно превосходит значения для КТ и сопоставимо с КЯ. КЯТ показали свою эффективность при использовании в высокомошных торцевых лазерах [8], солнечных элементах и микродисковых лазерах [9].

При создании диодных лазеров с необходимыми характеристиками важно знать спектральные особенности излучения активной области. Длина волны генерации, важный параметр полупроводникового лазера, определяется оптическими параметрами волновода и резонатора, а также зависимостью спектра усиления от величины тока накачки. Для зависимости оптического усиления квантовых ям от тока накачки получено аналитическое выражение [10], для квантовых точек и яма-точек предложены эмпирические выражения, представленные в [2] и [11] соответственно. Количество слоев в активной области и усиление одного слоя влияют на модальное усиление и тем самым на длину волны излучения. В данной работе мы систематически исследовали зави-

симось длины волны лазерной генерации от величины оптического усиления для серий InGaAs/GaAs-лазерных структур с различным дизайном волновода на основе КЯ, КТ и КЯТ оптического диапазона 1–1.3 мкм.

## 2. Метод сравнения разнотипных лазерных структур

Сравнение усиления лазерных структур, имеющих разный тип активной области и различную геометрию оптического волновода, является нетривиальной задачей. Модальное усиление зависит как от количества активных слоев, так и от толщины волновода и положения в нем активной области. Материальное усиление также нельзя считать универсальным параметром, поскольку его, например, крайне затруднительно определить для квантовых точек и яма-точек. Для этих объектов материальное усиление, по сути, не имеет физического смысла.

Для решения такого рода задач недавно нами было предложено использовать постоянную усиления слоя (layer gain constant)  $\gamma$ , которая равна произведению толщины активного слоя  $d$  и его материального усиления  $G$  [12]:

$$\gamma = d \cdot G. \quad (1)$$

Физический смысл параметра состоит в следующем: величина  $\exp(\gamma)$  равна коэффициенту усиления света, прошедшего без отражений по нормали через слой толщиной  $d$ , имеющий материальное усиление  $G$ . Поскольку толщина слоя константа, то постоянная усиления слоя будет также зависеть от тока, как и материальное усиление. В общем случае значения  $d$  и  $G$  неизвестны, но их произведение достаточно легко определить, поскольку материальное усиление связано с модальным усилением  $g$  выражением

$$G = g / \Gamma, \quad (2)$$

где  $\Gamma$  — фактор оптического ограничения для активного слоя. Из (1) и (2) получаем

$$\gamma = g \cdot d / \Gamma. \quad (3)$$

Величина  $d/\Gamma$  известна как эквивалентный размер оптической моды. Поскольку в пределах квантово-размерного активного слоя интенсивность оптической моды почти не меняется, без потери точности эквивалентный размер может быть рассчитан не для фактической толщины активного слоя  $d$ , которая часто неизвестна, а для некоторого виртуального слоя толщиной  $d'$ , расположенного там же, где и активный слой. Таким образом,

$$d/\Gamma = d'/\Gamma', \quad (4)$$

где  $\Gamma'$  — фактор оптического ограничения виртуального слоя. С учетом этого получаем

$$\gamma = g \cdot d' / \Gamma'. \quad (5)$$

В выражении (5) модальное усиление — измеряемый параметр [11], а эквивалентный размер оптической моды — расчетный. Заметим, что удобно использовать модальное усиление, нормированное на количество активных слоев.

## 3. Эксперимент

Лазерные структуры для исследований были выращены на  $n^+$  GaAs-подложке, структуры на квантовых точках — с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии, структуры на квантовых ямах и яма-точках — с использованием металлоорганической газофазной эпитаксии. Отличительной особенностью структур на яма-точках было то, что активная область структур одного спектрального диапазона одинакова по составу и толщине активного слоя и по технологическому режиму роста. По конструкции лазеры представляли собой двойные гетероструктуры раздельного ограничения с InGaAs активной областью в GaAs-волноводе с  $p$ - и  $n$ - AlGaAs-эмиттерами. Было исследовано 37 структур, отличающихся между собой размерностью и количеством слоев наноструктур в активной области, ее положением внутри волновода, толщиной волновода, содержанием Al в эмиттерах, длиной волны излучения (см. таблицу). Для каждой структуры был рассчитан эквивалентный размер оптической моды  $d'/\Gamma'$ .

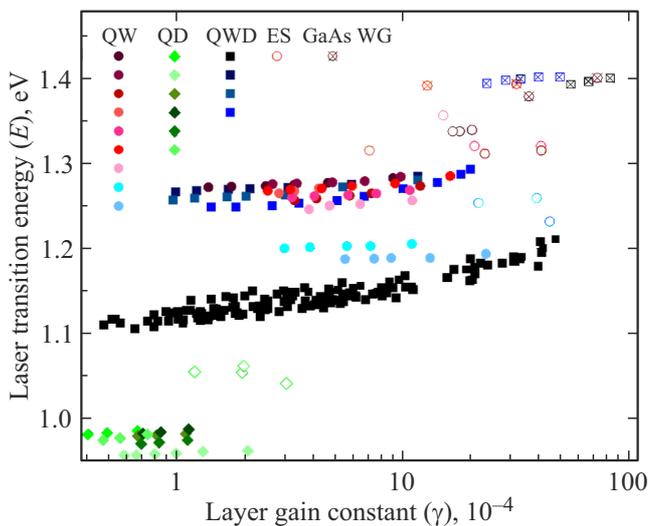
Из структур были изготовлены полосковые лазеры с шириной полоска 100 мкм с использованием стандартной технологии фотолитографии. Диэлектрические зеркала на сколотые грани лазеров не напылялись. Лазеры длиной от 250 до 4000 мкм были смонтированы на медные теплоотводы  $p$ -стороной вниз, и для них при импульсной накачке были измерены значения плотности порогового тока, длины волны излучения и дифференциальной квантовой эффективности. Из этих данных для каждой структуры из зависимости обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины лазерного резонатора были определены значения внутренних оптических потерь  $\alpha_{in}$  и внутреннего квантового выхода вынужденного излучения [10]. Модальное усиление  $g$  определяется как сумма внутренних ( $\alpha_{in}$ ) и внешних ( $\alpha_{out}$ ) оптических потерь  $g = \alpha_{in} + \alpha_{out}$  для каждого лазера из выборки. Перемножая  $g$ , нормированное на количество активных слоев, и вычисленное  $d'/\Gamma'$  получаем значение  $\gamma$  на один слой активной области. Поскольку материальное усиление измеряется в обратных сантиметрах, полученная постоянная усиления будет безразмерной величиной.

## 4. Результаты и обсуждение

Максимальные измеренные значения  $\gamma$  близки по значению экспериментальным данным, полученным из исследований волноводного поглощения [12]. Для всех измеренных лазерных структур построена зависимость

Типы исследованных лазерных структур

Тип активной области	Количество слоев активной области	Длина волны излучения длинного чипа, мкм	Максимальная постоянная усиления слоя, $\times 10^{-4}$	Ссылка на дизайн структуры
КЯТ	1	1.08	47	[13]
	2	1.09	40.8	[14]
	2	0.98	19.8	[6]
	4	1.1	9.3	[15]
	5	1.1	19.8	[14]
	6	1.1	6.8	[15]
	8	1.1	4.3	[4]
КЯ	1	0.98	10.9	[13]
	2	0.98	16.1	[16]
	2	1.04	23.1	[17]
КТ	5	1.28	2.1	[13]
	10	1.28	1.2	[18]



Зависимость энергии лазерного перехода от постоянного усиления слоя  $\gamma$  для лазерных структур на КЯ (QW), КТ (QD) и КЯТ (QWD). Генерация через возбужденное состояние (ES) показана незакрашенными точками, генерация в GaAs волноводе (GaAs WG) показана незакрашенными перевернутыми точками.

энергии оптического фотона от постоянной усиления  $\gamma$  (см. рисунок). Лазеры на КЯ достигают постоянного усиления, близкого к  $20\text{--}30 \cdot 10^{-4}$ , после чего переключаются на лазерную генерацию через возбужденное состояние. У структур с КТ резкое переключение длины волны генерации с основного на возбужденное состояние сразу на  $50\text{ мЭВ}$  ( $100\text{ нм}$ ) происходит при заметно меньших значениях постоянной усиления  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ . Наибольшее значение постоянной усиления слоя получено для структуры с одним слоем КЯТ и составляет  $47 \cdot 10^{-4}$ . Как видно из графика, КЯТ принципиально отличаются от КЯ и КТ отсутствием генерации на

возбужденном состоянии, а при максимальных значениях постоянной усиления возникает генерация через состояние GaAs-волновода при  $1.4\text{ эВ}$  (на длине волны  $880\text{--}890\text{ нм}$ ), как и у всех остальных гетероструктур. Одинаковое поведение наблюдается как для КЯТ, излучающих на длине волны  $980\text{ нм}$ , так и на  $1060\text{ нм}$ .

Энергия фотонов ( $E$ ) с увеличением постоянного усиления быстрее всего изменяется в структурах с КТ, где  $dE/d\gamma \sim 120\text{ эВ}/\gamma$ . В то же время для КЯ изменение составляет  $17\text{ эВ}/\gamma$ . Однако диапазон изменения постоянного усиления в КТ на порядок меньше, чем в остальных структурах, поэтому полный диапазон сдвига длины волны лазерной генерации крайне мал. Скорость изменения энергии фотонов у КЯТ структур падает с увеличением постоянного усиления от  $45$  до  $20\text{ эВ}/\gamma$ .

Наиболее примечательной особенностью активной области на квантовых яма-точках является то, что постоянное усиление может изменяться на 2 порядка в диапазоне  $0.45\text{--}47 \cdot 10^{-4}$ , а полная ширина диапазона изменения энергии лазерного фотона составляет  $110\text{ мЭВ}$  ( $> 90\text{ нм}$ ). Эти данные хорошо согласуются с шириной спектра усиления для лазера с одним слоем КЯТ, полученным методом Хакки–Паоли [7]. Это создает интересную возможность, используя одну и ту же технологию роста активной области, получать лазеры, существенно отличающиеся по своим излучательным характеристикам (длине волны излучения, пороговому току и т.д.). Например, в простейшем случае, лазер с большим числом активных слоев КЯТ за счет большего  $\gamma$ -фактора будет иметь меньшую постоянную усиления и, соответственно, меньшую энергию лазерного фотона (большую длину волны лазерного излучения).

## 5. Заключение

Для сравнения различных активных областей, встроенных в волноводы разного типа, мы использовали

недавно предложенный измеряемый параметр, называемый постоянной усиления слоя. Мы показали, что в лазерах на InGaAs квантовых яма-точках генерация наблюдается в широком диапазоне значений постоянной усиления слоя, при этом энергия лазерного фотона изменяется на 110 мэВ, что значительно выше аналогичных величин для InGaAs активных сред с квантовыми ямами и квантовыми точками. Таким образом, любая необходимая длина волны генерации в данном широком оптическом диапазоне может быть достигнута в торцевых лазерах на КЯТ без использования внешнего оптического резонатора. Эти особенности яма-точек в сочетании с широкими спектрами усиления делают их перспективной активной средой для широкого класса приборов оптоэлектроники, в частности торцевых лазеров, усилителей и суперлюминесцентных диодов.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00557), <https://rscf.ru/project/22-22-00557/>

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A.P. Ongstad, G.C. Dente, M.L. Tilton, J. Stohs, D.J. Gallant. *Appl Phys Lett.*, **72**, 836 (1998).
- [2] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, A.Y. Egorov, N.N. Ledentsov, A.F. Tsatsul'nikov, M.V. Maximov, Y.M. Shernyakov, V.I. Kopchatov, A.V. Lunev, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, Z.I. Alferov. *Semicond. Sci. Technol.*, **14**, 118 (1999).
- [3] S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S. Rouvimov, A.E. Zhukov. *Nanotechnology*, **26**, 385202 (2015).
- [4] A.M. Надточий, С.А. Минтаиров, Н.А. Калужный, Ю.М. Шерняков, Г.О. Корнышов, А.А. Серин, А.С. Паюсов, В.Н. Неведомский, Н.Ю. Гордеев, М.В. Максимов, А.Е. Жуков. *Письма ЖТФ*, **45**, 42 (2019).
- [5] S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S. Rouvimov, A.E. Zhukov. *Electron Lett.*, **51**, 1602 (2015).
- [6] G.O. Kornyshev, A.S. Payusov, N.Y. Gordeev, A.A. Serin, Y.M. Shernyakov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, A.M. Nadtochiy, M.V. Maximov, A.E. Zhukov. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1400**, 6 (2019).
- [7] G.O. Kornyshev, N.Y. Gordeev, A.S. Payusov, A.A. Serin, Y.M. Shernyakov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Maximov, A.E. Zhukov. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1697**, 1 (2020).
- [8] M.V. Maximov, N.Yu. Gordeev, Yu.M. Shernyakov, A.S. Payusov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, G.O. Kornyshev, A.A. Serin, A.A. Usikova, I.M. Gadzhiev, M.M. Kulagina, A.M. Nadtochiy, A.E. Zhukov. *Proc. SPIE*, **11356**, 113560A (2020).
- [9] E.I. Moiseev, N.V. Kryzhanovskaya, M.V. Maximov, F.I. Zubov, A.M. Nadtochiy, M.M. Kulagina, Yu.M. Zadiranov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, A.E. Zhukov. *Optics Lett.*, **43**, 4554 (2018).
- [10] L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mashanovitch. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* ( N.Y., USA, Wiley, 2012).
- [11] N.Y. Gordeev, M.V. Maximov, A.S. Payusov, A.A. Serin, Y.M. Shernyakov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, A.M. Nadtochiy, A.E. Zhukov. *Semicond. Sci. Technol.*, **36**, 015008 (2021).
- [12] A.M. Nadtochiy, N.Y. Gordeev, A.A. Kharchenko, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, Y.S. Berdnikov, Y.M. Shernyakov, M.V. Maximov, A.E. Zhukov. *J. Lightwave Technology*, **39**, 7479 (2021).
- [13] A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Maximov, D.A. Sannikov, T.F. Yagafarov, A.E. Zhukov. *Semiconductors*, **53**, 1489 (2019).
- [14] A.S. Payusov, Y.M. Shernyakov, A.A. Serin, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.M. Kulagina, A.E. Zhukov, N.Y. Gordeev, M.V. Maximov. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1135**, 1 (2018).
- [15] А.С. Паюсов, М.И. Митрофанов, Г.О. Корнышов, А.А. Серин, Г.В. Вознюк, М.М. Кулагина, В.П. Евтихийев, Н.Ю. Гордеев, М.В. Максимов, S. Breuer. *Письма ЖТФ*, **47**, 51 (2021).
- [16] A.A. Serin, A.S. Payusov, Y.M. Shernyakov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, N.Y. Gordeev, F.I. Zubov, M.V. Maximov, A.E. Zhukov. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1124**, 4 (2018).
- [17] N.Yu. Gordeev, A.S. Payusov, Y.M. Shernyakov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.M. Kulagina, M.V. Maximov. *Optics Lett.*, **40**, 2150 (2015).
- [18] A.S. Payusov, A.A. Serin, G.O. Kornyshev, M.M. Kulagina, M.I. Mitrofanov, G.V. Voznyuk, V.P. Evtikhiev, M.V. Maximov, N.Y. Gordeev. *Semiconductors*, **54**, 1811 (2020).

Редактор Г.А. Оганесян

### Relationship between wavelength and gain in lasers based on quantum wells, dots, and well-dots

G.O. Kornyshev<sup>1</sup>, N.Yu. Gordeev<sup>2</sup>, Yu.M. Shernyakov<sup>2</sup>, A.A. Beckman<sup>2</sup>, A.S. Payusov<sup>2</sup>, S.A. Mintairov<sup>2</sup>, N.A. Kalyuzhnyy<sup>2</sup>, M.V. Maximov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Alferov University,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** A systematic study of a series of InGaAs/GaAs lasers in the 1–1.3 μm optical range based on quantum wells (2D), quantum dots (0D), and quantum well-dots of transitional(0D/2D) dimensionality is presented. In a wide range of pump currents, the dependences of the lasing wavelength on the layer gain constant, a parameter which allows comparing lasers with different types of active region and various waveguide designs, are measured and analyzed. It is shown that the maximum optical gain of the quantum well-dots is significantly higher, and the range of lasing wavelengths achievable in edge-emitting lasers without external resonators is wider than in lasers based on quantum wells and quantum dots.