

# Двухполосная генерация в квантово-размерной активной области полупроводникового лазера при высоких уровнях накачки

© Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Т.А. Налет, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщёв\*, И.Н. Арсентьев, А.Д. Бондарев, М.К. Трукан, И.С. Тарасов<sup>†</sup>

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

\* Воронежский государственный университет,  
394006 Воронеж, Россия

(Получена 12 февраля 2007 г. Принята к печати 28 февраля 2007 г.)

Экспериментально исследованы спектральные и мощностные характеристики полупроводниковых лазеров на основе квантово-размерных асимметричных гетероструктур раздельного ограничения в системе твердых растворов InGaAs/GaAs/AlGaAs, при высоких уровнях накачки в импульсном режиме генерации (200 А, 100 нс и 10 кГц.) Показано, что в лазерах с квантово-размерной активной областью, содержащей один или два электронных уровня размерного квантования, спектр состоит из одной или двух полос генерации. Установлено, что условие инверсной заселенности второго электронного уровня и двухполосная генерация достигается за счет насыщения скорости стимулированной рекомбинации с первого электронного уровня и высокой плотности состояний для второго уровня. Продемонстрировано, что в лазерах с двухполосным спектром генерации интегральная мощность излучения существенно превышает мощность излучения лазера с одним электронным уровнем и одной спектральной полосой.

PACS: 42.55.Px, 85.30.De, 85.35.Be

## 1. Введение

В последнее время большой прогресс достигнут в создании мощных полупроводниковых импульсных лазеров. Основные успехи получены при накачке лазеров импульсами тока с длительностью менее 100 нс, что практически исключает разогрев активной области полупроводникового лазера. В наших работах [1–3] были исследованы спектральные и мощностные характеристики полупроводниковых лазеров в импульсном режиме при высоких уровнях возбуждения ( $\sim 100$  кА/см<sup>2</sup>) и плотностях оптических потоков  $\sim 100$  МВт/см<sup>2</sup>, что позволило выявить новые аспекты стимулированной излучательной рекомбинации. Обнаруженные особенности открывают возможность создания в полупроводниковом лазере условий для генерации двух спектральных полос в квантово-размерной активной области с двумя уровнями размерного квантования для электронов.

Целью данной работы является исследование спектральных и мощностных характеристик полупроводниковых лазеров раздельного ограничения при высоких уровнях импульсного возбуждения и создание условий инверсной заселенности для двухполосной генерации в квантово-размерной активной области с двумя электронными уровнями.

В работах [1–3] было показано, что в полупроводниковых лазерах раздельного ограничения при увеличении импульсного тока накачки до высоких уровней возбуждения максимальная интенсивность стимулированного излучения насыщается, и концентрация носителей заряда в активной области растет. Это происходит,

когда время жизни носителей заряда, участвующих в стимулированной излучательной рекомбинации, сравнивается со временем „доставки“ на энергетические уровни электронов, инжектированных в активную область. С увеличением тока накачки возрастает концентрация носителей заряда в высокоэнергетических состояниях. При некотором токе для этих состояний выполняются пороговые условия, и спектр генерации расширяется. С дальнейшим увеличением тока накачки также начинает расти концентрация электронов в волноводных слоях. В волноводе электроны локализируются вблизи активной области в кулоновской яме, образующейся за счет притяжения к дыркам, сильно локализованным в активной области [4]. В результате концентрация электронов с ростом тока накачки растет как в активной области, так и в волноводной кулоновской яме. При достижении пороговых условий наступает генерация излучения в волноводном слое, генерация излучения в активной области также сохраняется [2]. Следует ожидать, что если в активной области существует два электронных уровня, то есть вероятность достижения двухполосной генерации в одном полупроводниковом лазере.

## 2. Экспериментальные образцы

В качестве объекта исследования использовались полупроводниковые лазеры раздельного ограничения, изготовленные методом МОС-гидридной эпитаксии в системе твердых растворов InGaAs/GaAs/AlGaAs, выращенные на подложке GaAs [1]. Эмиттеры лазерной гетероструктуры изготавливались из твердого раствора Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As, волноводные слои из GaAs, а квантово-размерная активная область из твердого раствора

<sup>†</sup> E-mail: tarasov@hpld.ioffe.ru

Материал	Период решетки, Å	Модули упругости, $10^{11}$ дин/см <sup>2</sup>		Потенциал гидростатической деформации, эВ		Потенциал сдвиговой деформа- ции $b$ , эВ	Эффективные массы	
				зона про- водимости $a_c$	валентная зона $a_v$		элект- ронов $m_e/m_0$	тяжелых дырок $m_{hh}/m_0$
	$a$	$C_{11}$	$C_{12}$					
GaAs	5.6533	11.88	5.38	-7.17	-1.16	-1.7	0.067	0.45
InAs	6.0583	8.329	4.526	-5.08	-1.0	-1.8	0.023	0.41
In <sub>0.27</sub> Ga <sub>0.73</sub> As	5.7626	10.92	5.146	-6.61	-1.12	-1.73	0.044	0.438

InGaAs. Конструктивные особенности полупроводниковых лазеров раздельного ограничения были выбраны согласно концепции мощных лазеров на основе асимметричных гетероструктур [5,6]. В качестве активной области был выбран твердый раствор In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>As, используемый для создания лазерных приборов на длину волны генерации 1.04–1.08 мкм. Толщина квантовой ямы в активной области лазерных структур варьировалась для получения одного или двух электронных уровней в потенциальной яме. Энергетическое положение уровней размерного квантования определялось из уравнения Шредингера для потенциальной ямы конечной глубины. Учитывалось отличие эффективных масс электронов и тяжелых дырок в квантовой яме и окружающем ее волноводе. Энергия уровня определялась из выражения

$$E = C \frac{x^2}{m_{QW} a^2}. \quad (1)$$

Для четных ( $N = 0, 2, 4, \dots$ ) уровней величина  $x$  находилась из уравнения

$$x \operatorname{tg} x = L \sqrt{U - x^2/L}, \quad (2)$$

а для нечетных ( $N = 1, 3, 5, \dots$ ) уровней — из уравнения

$$L \sqrt{U - x^2/L} \operatorname{tg} x = -x. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) были использованы следующие соотношения:

$$x = \frac{qa}{2}, \quad L = \frac{m_{QW}}{m_W}, \quad U = \frac{m_W a^2 \Delta E}{2\hbar^2}, \quad (4)$$

где  $a$  — толщина квантовой ямы,  $q$  — поперечный волновой вектор частицы в квантовой яме,  $m_{QW}$ ,  $m_W$  — эффективные массы частиц в квантовой яме и в волноводе,  $\Delta E$  — глубина квантовой ямы,  $C$  — константа, зависящая от единиц измерения величин, входящих в формулы (1)–(3).

Значения используемых в расчетах параметров твердого раствора In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>As, полученные линейной аппроксимацией параметров GaAs и InAs [7,8], приведены в таблице.

Значение разрыва зоны проводимости было взято равным  $\Delta E_c = 0.65\Delta E_g$  [8], где  $\Delta E_g$  — разница в ширине запрещенных зон ненапряженных материалов GaAs

и In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>As. В расчете учитывались напряжения в активной области, возникающие в результате упругих деформаций из-за несоответствия параметров решетки подложки и активной области [7,8]. Слой In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>As испытывает напряжение сжатия, потому что постоянная его кристаллической решетки на 1.9% больше, чем у GaAs. При этом подзона легких дырок отщепляется от подзоны тяжелых дырок на 127 мэВ. Глубина квантовой ямы для электронов составляет 112 мэВ, а для тяжелых дырок 173 мэВ.

Проведенный расчет показал, что для данной системы в структуре с толщиной активной области меньше 89 Å квантовая яма содержит один электронный энергетический уровень, а с толщиной активной области больше 89 Å — два электронных энергетических уровня.

При разработке конструкции тестовых лазерных диодов учитывалась необходимость выращивания активной области с толщиной, не превышающей критическую. Оценка критической толщины проводилась путем расчета по формуле, приведенной в работе [9]. Для активной области с составом In<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>As критическая толщина при температуре эпитаксии составляет 105 Å. Поэтому в наших экспериментах использовались структуры, изготовленные методом МОС-гидридной эпитаксии, с толщинами активных областей 70 и 100 Å. На рис. 1 схематично изображено энергетическое расположение

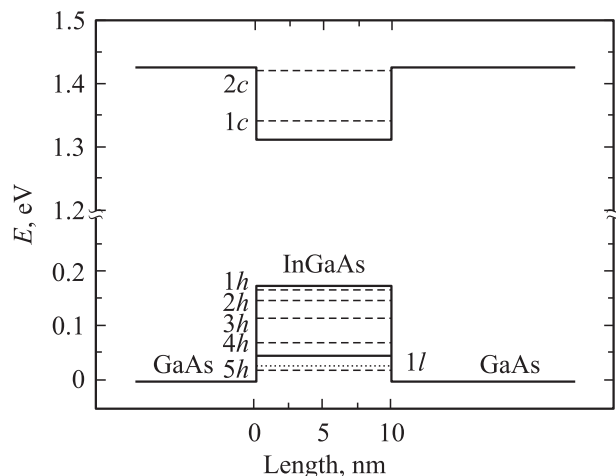


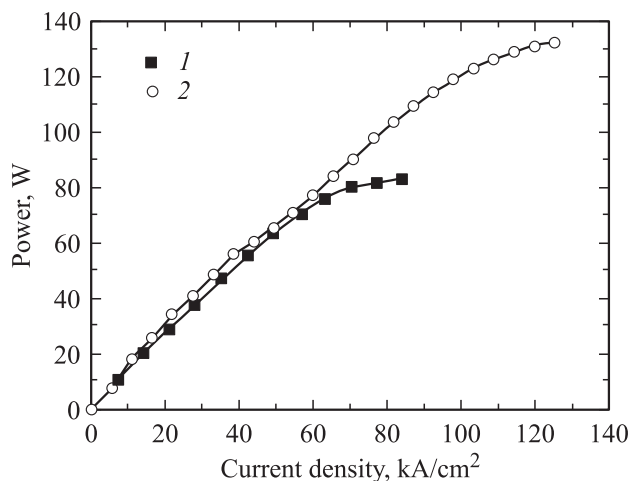
Рис. 1. Схематичное изображение уровней размерного квантования в квантовой яме активной области толщиной 100 Å.

уровней размерного квантования в структуре с толщиной активной области 100 Å.

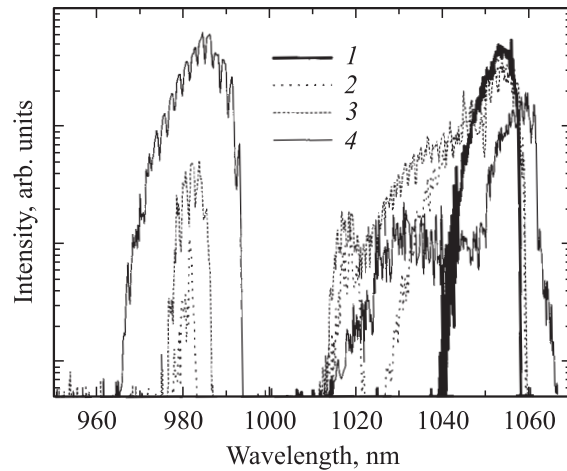
Из лазерных гетероструктур изготавливались с помощью стандартных технологий многоподовые полупроводниковые лазеры мезаполосковой конструкции с резонатором Фабри–Перо длиной 1.5 мм и апертурой 100 мкм. Затем они монтировались на медный теплоотвод и подготавливались для дальнейших экспериментов.

### 3. Ватт-амперные характеристики

Исследования ватт-амперных характеристик проводились при импульсном режиме накачки, с длительностью импульса 100 нс и частотой повторения 10 кГц. На рис. 2 приведены характерные ватт-амперные характеристики для лазеров с одним и двумя электронными уровнями квантования в активной области. Ватт-амперная характеристика полупроводникового лазера с толщиной активной области 70 Å и одним электронным уровнем представляет собой характерную насыщающуюся зависимость [3]. В ватт-амперной характеристике лазера с толщиной активной области 100 Å и двумя электронными уровнями наблюдается излом при плотности тока накачки около 35 кА/см<sup>2</sup>, что соответствует началу генерации со второго уровня размерного квантования. Необходимо отметить, что дифференциальная эффективность лазера после излома несколько уменьшается. Это связано с большими внутренними оптическими потерями для коротковолновой линии генерации и с тем, что энергия выброса электронов со второго уровня квантования значительно меньше, а, следовательно, температурный выброс носителей заряда более эффективен. Интегральная мощность оптического излучения из лазера с двумя электронными уровнями значительно выше, чем для лазера с одним электронным уровнем. В то время как стимулированная рекомбинация с первого электронного



**Рис. 2.** Ватт-амперные характеристики лазерных диодов с длиной резонатора 1.5 мм с толщинами квантовой ямы, Å: 1 — 70, 2 — 100 в импульсном режиме генерации.



**Рис. 3.** Спектры двухполосной генерации лазерного диода с толщиной квантовой ямы 100 Å, длиной резонатора 1.5 мм, шириной полоска 100 мкм в импульсном режиме генерации при различных плотностях тока накачки, кА/см<sup>2</sup>: 1 — 13, 2 — 35, 3 — 48, 4 — 105.

уровня насыщается, интенсивность стимулированного излучения со второго уровня растет. При дальнейшем увеличении тока накачки наблюдается генерация из волновода, связанная с достижением пороговой концентрации носителей заряда в волноводе. Это означает, что открывается эффективный канал токовых утечек и ватт-амперная зависимость насыщается.

### 4. Спектральные характеристики

На рис. 3 представлены спектральные зависимости полупроводникового лазера с толщиной активной области 100 Å и двумя электронными уровнями размерного квантования при различных токах накачки. При высоких уровнях токовой накачки спектр излучения состоит из двух полос генерации.

При плотностях тока накачки до 35 кА/см<sup>2</sup> в спектре наблюдается полоса генерации, соответствующая длине волны излучения между первыми уровнями размерного квантования для электронов и дырок ( $1c \rightarrow 1h$ ) и, согласно расчетам, включает в себя также разрешенные в квантовой яме излучательные переходы  $1c \rightarrow 2h$  и  $1c \rightarrow 3h$  [10].

При плотностях тока накачки 35 кА/см<sup>2</sup> появляется длинноволновая полоса генерации, соответствующая стимулированным переходам со второго уровня размерного квантования электронов:  $2c \rightarrow 2h$  и  $2c \rightarrow 1h$ . Следует подчеркнуть, что эта полоса не перекрывается по частоте с первой полосой. Благодаря большей плотности состояний пороговая концентрация на втором энергетическом уровне достигается быстрее, чем для высокоэнергетических состояний первого уровня размерного квантования.

Поведение спектральных характеристик с ростом тока накачки для полупроводниковых лазеров с двумя

электронным уровнями в активной области аналогично поведению спектров для лазерных диодов с одним уровнем в квантово-размерной области [1–3]. Наблюдается насыщение интенсивности стимулированного излучения с увеличением тока накачки для обеих полос излучения, но насыщение максимума первой полосы наступает при меньших токах накачки. Спектры обеих полос генерации расширяются в коротковолновую область с ростом тока накачки. Наблюдается расширение спектра и в длинноволновую область, связанное с некоторым перегревом активной области в импульсном режиме генерации.

## 5. Заключение

В результате исследований показано, что в полупроводниковых лазерах раздельного ограничения с квантово-размерной активной областью, содержащей два электронных уровня размерного квантования, достигается двухполосная генерация при высоких уровнях импульсной токовой накачки. Создание условий инверсной заселенности второго электронного уровня достигается, во-первых, за счет снижения стимулированных времен жизни на первом электронном уровне до величин, сравнимых с временами релаксации по энергии электронов в активной области, т.е. с временем доставки электронов на нижний электронный уровень. Во-вторых, за счет более высокой плотности состояний для второго электронного уровня, чем для первого.

Практическая ценность наблюдаемого эффекта заключается в достижении двухполосной генерации в одном полупроводниковом лазере, необходимой для исследований нелинейных эффектов и разработки источников терагерцового диапазона длин волн. Непосредственный эффект наблюдается в увеличении интегральной мощности излучения при импульсном возбуждении полупроводникового лазера с двумя электронными уровнями в квантово-размерной яме активной области.

В заключение авторы выражают благодарность Т.Н. Дрокиной, В.В. Васильевой и Л.С. Вавиловой за помощь в изготовлении образцов.

Работа выполнена при поддержке программ президиума Академии наук „Квантовые наноструктуры“, Отделения физических наук „Когерентное излучение в полупроводниках“ и РФФИ (грант № 06-02-08095-офи). Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку по гранту президента РФ по поддержке молодых ученых (МК-7502.2006.9) и „Фонд содействия отечественной науке“.

## Список литературы

- [1] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, А.В. Рожков, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщев, И.С. Тарасов. Письма ЖТФ, **32** (16), 47 (2006).

- [2] С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, К.С. Борщев, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов. ФТП, **40**, 1017 (2006).
- [3] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщев, И.Н. Арсентьев, И.С. Тарасов. ФТП, **41** (8), 1003 (2007).
- [4] L.V. Asryan, N.A. Gun'ko, A.S. Polkovnikov, G.G. Zegrya, R.A. Suris, P.-K. Lau, T. Makino. *Semicond. Sci. Technol.*, **15**, 1131 (2000).
- [5] С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **38**, 1477 (2004).
- [6] N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. *Electron. Lett.*, **40**, 1413 (2004).
- [7] L.A. Coldren, S.W. Corzine. *Diode lasers and photonic integrated circuits* (John Wiley & Sons, Inc., 1995).
- [8] S. Adachi. *Physical properties of III-V Semiconductor Compounds* (John Wiley & Sons, Inc., 1992).
- [9] *Quantum Well Lasers*, ed. by P.S. Zory, jr. (Academic Press, 1993).
- [10] З.Н. Соколова, В.Б. Халфин. ФТП, **23**, 1806 (1989).

Редактор Т.А. Полянская

## Double-band generation in quantum well semiconductor laser at high injection levels

D.A. Vinokurov, S.A. Zorina, V.A. Kapitonov, A.Yu. Leshko, A.V. Lyutetskii, T.A. Nalyot, D.N. Nikolaev, N.A. Pikhtin, N.A. Rudova, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, N.V. Fetisova, M.A. Khomylev, V.V. Shamakhov, K.S. Borshev\*, I.N. Arsent'ev, A.D. Bondarev, M.K. Trukan, I.S. Tarasov

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia  
\* Voronezh State University,  
394006 Voronezh, Russia

**Abstract** We investigated the power and spectral characteristics of Fabry–Perot 100- $\mu\text{m}$ -aperture semiconductor laser with 1060 nm emitting wavelength based on MOCVD-grown asymmetric separate-confinement InGaAs/GaAs/AlGaAs heterostructures at high excitation levels in pulsed lasing mode (200 A, 100 ns, 10 kHz). It is shown that lasing spectra of a laser diode with quantum well (QW) active region having one or two electron levels consists of single-band or double-band generation. It is established that a condition for inverse population in the second electron level and double-band lasing is reached by (i) saturation of stimulated radiative recombination from the first electron level and (ii) by high density of states on the second electron level. It is demonstrated that an integral output optical power for the laser diode with double-band spectra generation is larger than that for the laser diode with single electron level in the QW and, therefore, with single-band spectra generation.