

# Влияние количества квантовых ям на эффективность генерации в лазерной структуре $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}/\text{GaInP}$

Д. В. Ушаков<sup>a</sup>, А. А. Афоненко<sup>a</sup>, В. Я. Алешкин<sup>б</sup>

<sup>a</sup> Белорусский государственный университет,  
Минск, Беларусь; e-mail: ushakovdv@bsu.by

<sup>б</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
Нижний Новгород, Россия

Развита модель расчета мощностных характеристик лазерных структур с учетом неоднородного возбуждения квантовых ям (КЯ), процессов рекомбинации в барьерных областях и эффектов нелинейного усиления. Показано, что для структур  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}/\text{InGaP}$  при увеличении числа КЯ мощность генерации сначала существенно возрастает, затем незначительно снижается. При этом в широком диапазоне токов инжекции оптимальное количество квантовых ям составляет  $5\pm 1$ . Неоднородность возбуждения КЯ растет с увеличением тока инжекции и приводит к снижению мощности генерации по сравнению с однородным возбуждением.

**Ключевые слова:** InGaAs/GaAs, оптимизация, квантовая яма, эффективность генерации.

## Введение

В лазерах с высокой выходной мощностью используются сверхширокие волноводы различных конструкций [1—3], в которых необходимо соблюдать высокие требования к точности толщин слоев и расположению активных квантовых ям (КЯ) для подавления многомодовой генерации. Лазеры с вытекающими модами, впервые предложенные в [4], обладают рядом достоинств. Они характеризуются большей апертурой и всегда генерируют основную моду. Кроме того, из-за большей апертуры сужается диаграмма направленности такого лазера и уменьшается нагрузка на зеркала, что позволяет получать большие мощности излучения. В работе [5] создан первый лазер с вытекающей модой в гетеросистеме GaAs/InGaAs/InGaP. В [6] за счет увеличения толщины подложки и уменьшения ее легирования проведена оптимизация оптической схемы и улучшены энергетические параметры лазеров.

В настоящей работе проанализирована зависимость эффективности генерации в лазерной структуре  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}/\text{GaInP}$  от количества КЯ. При моделировании учитывалось неоднородное возбуждение КЯ, процессы рекомбинации в барьерных областях, эффекты нелинейного усиления, роль которых значительно увеличивается при больших токах инжекции.

## 1. Скоростные уравнения и неоднородное возбуждение КЯ

Анализ выходных характеристик многослойного квантоворазмерного лазера проведен на основе скоростных уравнений в одномодовом приближении [7, 8]:

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{\eta_i j}{e} - R_{\text{spi}} - \frac{v_g \Gamma_i g_i S}{1 + \varepsilon_i S}, \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = v_g \left( \sum_i \frac{\Gamma_i g_i}{1 + \varepsilon_i S} - k_{\text{th}} \right) S + \beta \sum_i R_{\text{wi}}. \quad (2)$$

Здесь  $t$  — время;  $n_i$  — двумерная концентрация носителей тока в  $i$ -й квантовой яме;  $S$  — двумерная плотность фотонов генерирующей моды;  $j$  — плотность тока накачки;  $\beta$  — фактор, определяющий вклад спонтанного излучения в генерирующую моду;  $v_g$  — групповая скорость света;  $g_i$  — коэффициент материального усиления  $i$ -й квантовой ямы на длине волны генерации  $\lambda$ ;  $\varepsilon_i$  — параметры нелинейного усиления;  $k_{\text{th}}$  — коэффициент оптических потерь;  $\Gamma_i$  — параметр оптического ограничения;  $\eta_i$  — коэффициент инжекции носителей тока в  $i$ -ю квантовую яму;  $R_{\text{spi}} = R_{\text{wi}} + R_{\text{bi}}$  — результирующая скорость рекомбинации в КЯ  $R_{\text{wi}}$  и прилегающих барьерных областях  $R_{\text{bi}}$ . Длина волны генерации определялась по максимуму результирующего спектра усиления.

Как показали оценки процессов захвата-выброса носителей в КЯ, при сравнительно небольшой глубине КЯ в системе  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$  неоднородность возбуждения барьерных областей и КЯ незначительна. Поэтому скорость рекомбинации в барьерных областях можно включить в рекомбинацию носителей  $R_{\text{spi}}$  соседних КЯ. Границы областей выбирались по центру между КЯ. При этом учитывалась рекомбинация во всем волноводном слое GaAs.

Барьерные слои между КЯ, как правило, выполняются нелегированными. В этом случае для широких барьеров можно считать, что концентрации электронов и дырок равны. Из-за большой подвижности электронов квазиуровень Ферми в структуре практически постоянен, а неоднородное возбуждение КЯ осуществляется за счет изменения квазиуровня Ферми для дырок. Эффективность инжекции носителей тока в  $i$ -ю квантовую яму  $\eta_i$  рассчитана по формулам

$$\eta_i = (j_{i+1,i} - j_{i,i-1})/j, j_{i,i-1} = j_{\text{p}0} \{ \exp(-\Delta F_i/2kT) - \exp(-\Delta F_{i-1}/2kT) \}, \quad (3)$$

где  $j_{\text{p}0} = e D(N_c N_v)^{1/2} \exp(-E_{\text{gb}}/2kT)/d_b$  — эффективная плотность диффузационного тока;  $D$  — коэффициент диффузии дырок;  $N_c, N_v$  — эффективные концентрации электронов и дырок в барьерных слоях,  $d_b$  — расстояние между КЯ.

## 2. Численный расчет и обсуждение результатов

На основе численного решения системы балансных уравнений с учетом зависимости коэффициентов инжекции носителей заряда в КЯ от уровня их возбуждения проведен расчет мощностных характеристик структуры, состоящей из 2—10 КЯ  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}$  толщиной 9 нм, при различных токах  $J$ . Ватт-амперные характеристики, рассчитанные из стационарных уравнений (1) и (2) с учетом (3), показаны на рис. 1. При расчете использованы следующие параметры:  $\Gamma_i = 8 \cdot 10^{-3}$ ,  $\beta = 10^{-5}$ ,  $\epsilon_i = 10^{-12} \text{ см}^2$ ,  $W = 360 \text{ мкм}$ ,  $L = 1 \text{ мм}$ . Толщина волноводного слоя GaAs считалась равной 2.1 мкм.

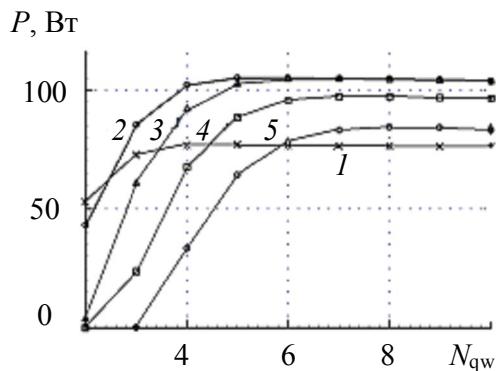


Рис.1. Зависимость мощности излучения ( $P$ ) от количества КЯ ( $N_{\text{qw}}$ ) в активной области квантоворазмерной лазерной гетероструктуры  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$  при коэффициентах потерь  $k_{\text{th}} = 10$  (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4) и 50 (5);  $h\nu = 1.245 \text{ эВ}$ ,  $J = 160 \text{ А}$ ,  $d_b = 115$ .

При малых коэффициентах потерь в структуре с одной КЯ порог генерации может реализоваться при уровне возбуждения, близком к инверсии, тогда при больших токах инжекции мощность генерации практически не зависит от числа КЯ (рис. 1). При больших коэффициентах потерь из-за эффекта стабилизации усиления генерации структуры с малым количеством ям (1—3) наименее эффективны (рис. 1). В таких структурах при высоком уровне возбуждения КЯ заселенность барьерных областей значительна. Для большего числа КЯ (6—10) мощность генерации практически не зависит от их количества. Оптимальные потери составляют  $\sim 20 \text{ см}^{-1}$ .

Неоднородное возбуждение КЯ приводит к снижению эффективности генерации. Как видно из рис. 2, негативное влияние неоднородности возбуждения КЯ растет с увеличением тока инжекции. Уменьшить это влияние можно, разместив КЯ близко друг к другу. Расчеты структуры [6] показывают, что при уменьшении расстояния между КЯ с 115 нм (рис. 2,  $a$ ) до 30 нм (рис. 2,  $b$ ) можно ожидать увеличения мощности генерации на 10 %.

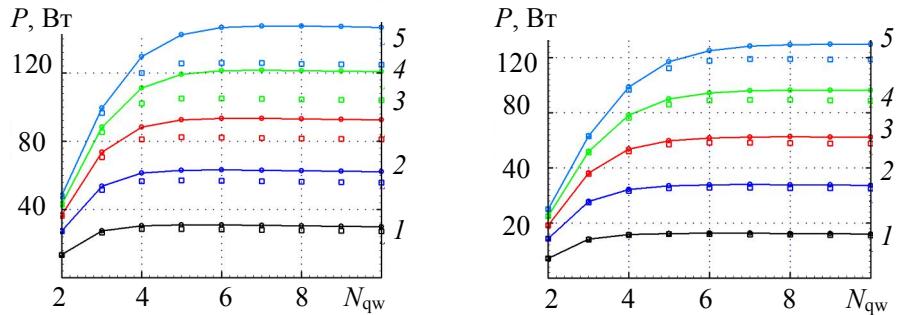


Рис. 2. Зависимость мощности излучения от количества КЯ  $N_{\text{qw}}$  в активной области квантово-размерной лазерной гетероструктуры  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$  при токах  $J=40$  (1),  $80$  (2),  $120$  (3),  $160$  (4) и  $200$  А (5) для энергии фотона  $h\nu=1.245$  эВ в случае практически однородного ( $\circ$ ,  $\bullet$ ) ( $D=5 \text{ см}^2/\text{с}$ ) и неоднородного ( $\square$ ,  $\blacksquare$ ) ( $D=2 \text{ см}^2/\text{с}$ ) возбуждения КЯ;  $k_{\text{th}}=20 \text{ см}^{-1}$ ,  $d_b=115$  (а) и  $30$  нм (б).

При сильном неоднородном возбуждении часть КЯ может не участвовать в усилении излучения. Поэтому по сравнению со случаем однородного возбуждения оптимальное количество КЯ уменьшается. Число “рабочих” (усиливающих) КЯ увеличивается при увеличении коэффициента потерь. Оптимальное количество КЯ увеличивается с ростом тока накачки и при токе 200 А может составлять  $5\pm 1$ .

### Заключение

Развита модель расчета мощностных характеристик лазерных структур с учетом неоднородного возбуждения КЯ, процессов рекомбинации в барьерных областях и эффектов нелинейного усиления. Показано, что для структур  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$  при увеличении числа КЯ мощность генерации сначала существенно возрастает, затем незначительно снижается. При этом в широком диапазоне токов инжекции оптимальное количество квантовых ям составляет  $5\pm 1$ . Неоднородное возбуждение структуры приводит к снижению мощности генерации по сравнению с однородным возбуждением. В рассмотренной структуре уменьшение толщины барьерных слоев между КЯ с 115 до 30 нм показывает увеличение мощности генерации на 10 %. При этом при токе накачки 200 А максимальные мощности реализуются при коэффициенте потерь  $\sim 20 \text{ см}^{-1}$ .

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по проекту БРФФИ № Ф12Р-107, 12-02-90024-Бел.

### Литература

1. В. А. Геловани, А. П. Скороходов, В. И. Швейкин. Высокоэффективные высокомощные диодные лазеры нового типа. М. URSS. 2005.
2. С. О. Слипченко, Д. А. Винокуров, Н. А. Пихтин, З. Н. Соколова, А. Л. Станкевич, И. С. Тарасов, Ж. И. Алферов. *Сверхнизкие внутренние оптические потери в квантово-размерных лазерных гетероструктурах раздельного ограничения*. ФТП. 2004. Т. 38, № 12. С. 1477—1486.
3. С. О. Слипченко, З. Н. Соколова, Н. А. Пихтин, К. С. Борщев, Д. А. Винокуров, И. С. Тарасов. *Конечное время рассеяния энергии носителей заряда как причина ограничения оптической мощности полупроводниковых лазеров*. ФТП. 2006. Т. 40, № 8. С. 1017—1023.
4. D. R. Scifres, W. Streifer, R. D. Burnham. *Leaky wave room-temperature double heterostructure GaAs: GaAlAs diode laser*. Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 29, No. 1. P. 23—25.

5. Н. Б. Звонков, Б. Н. Звонков, А. В. Ершов, Е. А. Ускова, Г. А. Максимов. *Полупроводниковые лазеры на длину волны 0.98 мкм с выходом излучения через подложку*. Квант электрон. 1998. Т. 25, № 7, С. 622—624.
6. С. М. Некоркин, Б. Н. Звонков, М. Н. Колесников, Н. В. Дикарёва, В. Я. Алёшкин, А. А. Дубинов. *Мощный полупроводниковый лазер с улучшенными пространственными и энергетическими характеристиками*. Вестник Нижегородск. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 1 (1). С. 30—32.
7. V. K. Kononenko, I. S. Manak, S. V. Nalivko. *Design and characteristics of widely tunable quantum-well laser diodes*. Spectrochimica Acta. Pt A. 1999. Vol. 55, No. 10. P. 2091—2096.
8. D. V. Ushakov, V. K. Kononenko. *Production of broadband modal gain spectra in asymmetric multiple quantum-well  $Ge_{0.47}In_{0.53}As/Ga_{0.18}In_{0.82}As_{0.4}P_{0.6}$  heterostructures*. Quantum Electronics. 2008. Vol. 38, No. 11. P. 1001—1004.

## Effect of the Number of Quantum Wells on the Lasing Efficiency of $Ge_{0.8}In_{0.2}As/GaAs/GaInP$ Laser Structure

D. V. Ushakov <sup>a</sup>, A. A. Afonenko <sup>a</sup>, V. Ya. Aleshkin <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Belarusian State University, 220030 Minsk, Belarus

<sup>b</sup> Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences,  
Nizhny Novgorod, Russia

A model for calculation of power characteristics of the laser structures with taking into account the inhomogeneous excitation of quantum wells, recombination processes in the barrier region and the effects of nonlinear gain has been developed. It has been shown that for  $Ge_{0.8}In_{0.2}As/GaAs/GaInP$  structures the laser power initially increases significantly with the increase of number of QWs and then reduces slightly. The optimum number of quantum wells is  $5 \pm 1$  for a wide range of injection currents. The inhomogeneity of the excitation of QWs increases with the injection current and reduces the output power in comparison to the homogeneous excitation.

**Keywords:** InGaAs/GaAs, optimization, quantum well, lasing efficiency.