

# **Анализ мощностных характеристик квантоворазмерных лазеров с расширенным волноводом и легированными широкозонными блокирующими слоями**

**А. А. Афоненко, Д. В. Ушаков**

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; e-mail: afonenko@bsu.by*

На основе диффузионно-дрейфовой модели с учетом поглощения излучения свободными носителями, неоднородного пространственного распределения излучения и носителей заряда, нагрева активной области проведено численное моделирование мощностных характеристик лазерных гетероструктур GaAs/AlGaAs с расширенным волноводом в режиме непрерывной генерации. Предложен способ учета 3D характера растекания тепла в теплоотводе в одномерной модели резонатора. Оценено влияние переноса носителей заряда при внутризонном поглощении на пространственное распределение электронов и дырок в волноводных слоях. Показано, что введение в структуру легированных широкозонных блокирующих слоев позволяет увеличить максимальную мощность генерации.

**Ключевые слова:** мощные полупроводниковые лазеры, поглощение свободными носителями заряда, диффузионно-дрейфовая модель, тепловая модель, неоднородное возбуждение, мощностные характеристики.

## **Введение**

Лазерные гетероструктуры GaAs/AlGaAs, излучающие на длине волны ~850 нм, представляют интерес как источники накачки твердотельных лазеров [1, 2]. Одним из факторов, ограничивающих выходную мощность излучения, является поглощение свободными носителями заряда (НЗ), которое увеличивается с повышением тока накачки [3]. Снизить рост поглощения НЗ с ростом тока накачки можно введением в структуру дополнительных квантовых ям [4]. Другой способ уменьшения заселенности волноводных слоев — введение в структуру дополнительных широкозонных гетерослоев, материал которых отличен от материала эмиттерных слоев и подбирается так, чтобы барьеры преимущественно возникали только в зоне проводимости или в валентной зоне [5]. В настоящей работе показана возможность уменьшения внутренних потерь путем добавления в структуру легированных широкозонных слоев с составом материала, как у эмиттеров. Преимущества предлагаемого способа — более высокие потенциальные барьеры при отсутствии напряженных слоев и лучшая технологичность, так как нет необходимости роста дополнительных соединений.

## **Метод расчета**

Расчеты мощностных характеристик лазерных гетероструктур проведены на основе модифицированной диффузионно-дрейфовой модели [6] с учетом поглощения излучения свободными НЗ и изменения длины волны генерации в зависимости от температуры и уровня возбуждения структуры. Пространственное распределение излучения вдоль резонатора находилось из уравнения Бугера для прямой и обратной волн с учетом коэффициентов отражения на гранях резонатора. При этом зависимости пространственных распределений коэффициента усиления и поглощения свободными НЗ от локальной плотности фотонов получены с помощью билинейной интерполяции по четырем значениям этих величин, рассчитанным на основе диффузионно-дрейфовой модели для разных температур и коэффициентов внутренних потерь при заданной плотности тока накачки.

При расчете теплового режима работы лазера важно учитывать 3D-характер растекания тепла в теплоотводе, при этом для расчета теплового сопротивления планарной гетероструктуры применимо 1D-приближение [7]. Объемный процесс растекания тепла в теплоотводе легко свести к одномерной задаче, если он описывается аналитической зависимостью. Например, функция распределения температуры от точечного источника на поверхности четвертьбесконечного теплоотвода без теплопередачи на границах представляется в виде  $T \sim 1/r + 1/r'$ , где  $r$  и  $r'$  — расстояния до источника и его зеркального отражения от перпендикулярной грани теплоотвода. Разделяя контакт вдоль оси резонатора длиной  $L$  на малые участки длиной  $\Delta x$ ,

можно записать среднюю температуру поверхности каждого участка  $i$  в зависимости от мощности  $P_j$ , отводимой участком  $j$  в полусферу, в виде

$$\langle T_{ij} \rangle = \frac{P_j}{2\pi\kappa} \left( \left\langle \frac{1}{r_{ij}} \right\rangle + \left\langle \frac{1}{r'_{ij}} \right\rangle \right) + \delta_{ij} \frac{P_j}{W\Delta x_n} \sum_n d_n / \kappa_n, \quad (1)$$

где  $d_n$  — толщина слоя  $n$ ;  $\kappa_n$  — его коэффициент теплопроводности,  $W$  — ширина полоскового контакта лазера. Суммирование ведется по всем слоям со стороны  $p$ -эмиттера до квантовой ямы. Средние обратные расстояния между участками  $\langle r_{ij}^{-1} \rangle$  допускают аналитическое вычисление. Тогда при заданных температурах отдельных участков контакта отводимая от каждого участка мощность рассчитывается с помощью обратной матрицы преобразования (1). Для анализируемых лазеров с  $L = 2.7$  мм и  $W = 0.1$  мм тепловое сопротивление слоев структуры составляет 0.7 К/Вт, медного теплоотвода 1.5 К/Вт.

При внутризонном поглощении излучения носители приобретают энергию, существенно превышающую тепловую, и за время релаксации на дно зоны могут баллистически переместиться на значительное расстояние от места поглощения фотона. Кроме того, высокоэнергетическая частица при столкновениях может привести к баллистическому перемещению других носителей заряда. Расчеты указанного механизма переноса, выполненные методом Монте-Карло, показали, что в GaAs после внутризонного поглощения фотона с длиной волны 1 мкм электрон в среднем перемещается на 2.7 мкм, а тяжелая дырка — на 0.73 мкм [8]. В настоящей работе при расчете зонных диаграмм для удобства полагалось экспоненциальное координатное распределение перемещенных НЗ.

### Результаты расчетов и их обсуждение

Как видно из рассчитанных зонных диаграмм (рис. 1), добавление барьерных слоев  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$  толщиной 20 нм и легированием акцепторами  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  со стороны  $p$ -эмиттера, легированием донорами  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  со стороны  $n$ -эмиттера позволяет эффективно блокировать инжекцию неосновных НЗ в область за квантовой ямой. В структурах без блокирующих слоев волновод, как правило, не легируют, концентрации электронов и дырок в нем равны и увеличиваются с ростом тока накачки. В структурах с блокирующими слоями волновод должен быть легированным, так как при накачке концентрация основных НЗ в нем не меняется, а концентрация неосновных НЗ на порядки меньше, чем основных.

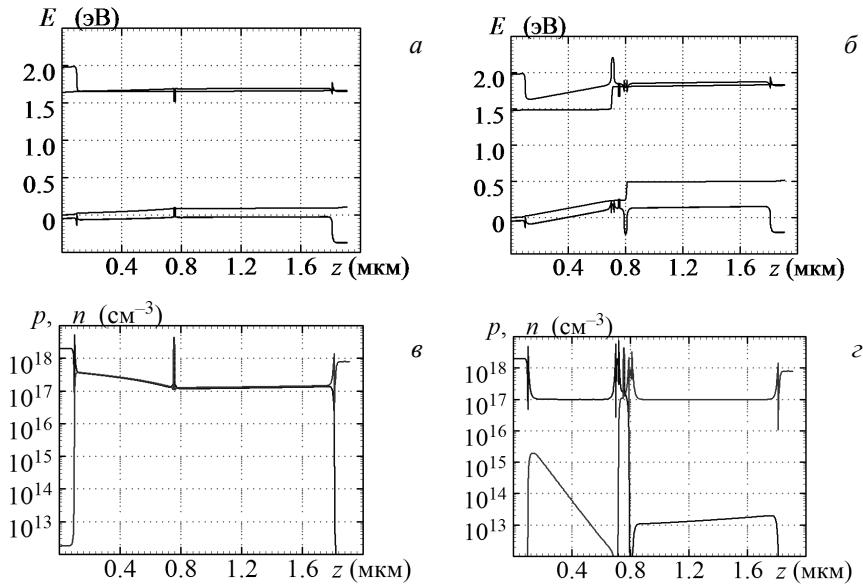


Рис. 1. Зонная диаграмма лазерной гетероструктуры с квантовой ямой 10.5 нм с расширенным нелегированным волноводом (а) и расширенным легированным волноводом с легированными широкозонными блокирующими слоями (б) при приложении прямого смещения и соответствующие распределения концентрации электронов и дырок (в, г).

Уменьшение населенности волновода при больших токах позволяет уменьшить потери на внутризонное поглощение и увеличить максимальную мощность генерации (рис. 2). При этом учет процессов баллистического переноса НЗ приводит к снижению мощности на несколько процентов, но не меняет качественный характер зависимостей. Увеличение мощности в структуре с долей Al в волноводе 0.2 составило ~60 %.

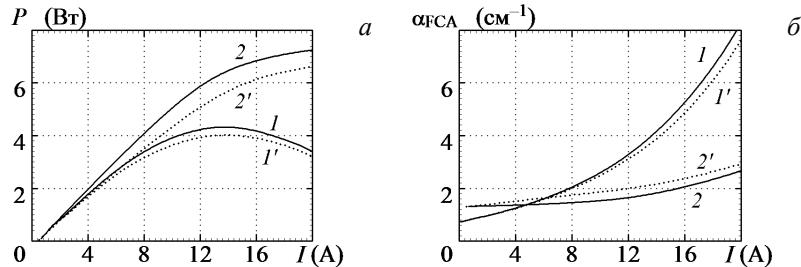


Рис. 2. Выходная мощность лазера с одной гранью в зависимости от тока накачки (а) и коэффициент поглощения свободными носителями (б) на гетероструктуры GaAs/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>As: 1 — без легированных широкозонных блокирующих слоев; 2 — с легированными широкозонными блокирующими слоями; 1', 2' — с учетом эффекта переноса НЗ при внутризонном поглощении

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по проекту БРФФИ № Ф16Р-018.

### Литература

1. А.Ю. Андреев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов. *ФТП*. 2006. Т. 40, № 5. С. 628–632.
2. Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, Л.С. Вавилова, И.С. Тарасов. *ФТП*. 2012. Т. 46, № 10. С. 1344–1348.
3. А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков. Сб. статей 10-го Белорусско-российского семинара “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе”, Минск, 26–29 мая, 2015. С. 46–48.
4. А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков. Тез. докл. V Российского симпозиума с междунар. участием “Полупроводниковые лазеры: физика и технология”, Санкт-Петербург, 15–18 ноября, 2016. С. 47.
5. Ю.С. Полубавкина, Ф.И. Зубов, Э.И. Моисеев, Н.В. Крыжановская, М.В.Максимов, Е.С. Семенова, К. Yvind, Л.В. Асрян, А.Е. Жуков. *ФТП*. 2017. Т. 51, № 2. С. 263–268.
6. А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков. *ФТП*. 2014. Т. 48, № 1. С. 88–93.
7. А.Л. Тер-Мартirosyan, Д.М. Демидов, М.А. Свердов, А.В. Кулик, С.Ю. Карпов. *Научное приборостроение*. 2013. Т. 23, № 4. С. 40–44.
8. А.Н. Дрозд, А.А. Афоненко. *Вестн. Бел. гос. ун-та*. 2007. № 3. С. 26–30.

## Analysis of the Power Characteristics of Quantum-Well Lasers with Extended Waveguide and Doped Wide Bandgap Blocking Layers

A. A. Afonenko, D. V. Ushakov

*Belarusian State University, Minsk, Belarus; e-mail: afonenko@bsu.by*

A numerical simulation of the power characteristics of GaAs/AlGaAs laser heterostructures with extended waveguide in the continuous wave regime is carried out on the basis of the diffusion-drift model taking into account the free carriers absorption, inhomogeneous spatial distribution of radiation and charge carriers, heating of the active region. A method for taking into account the 3D nature of the heat spreading in a heat sink in a one-dimensional cavity model is proposed. The effect of carrier transport due to intraband absorption on the spatial distribution of electrons and holes in the waveguide layers is estimated. It is shown that the introduction of doped wide bandgap blocking layers into the structure will increase the maximum output power.

**Keywords:** power characteristics, free carriers absorption, diffusion-drift model, thermal model, inhomogeneous excitation.