

Мощностные характеристики лазеров с волноводом из квантовых ям и блокирующими слоями

А. А. Афоненко ^а Д. В. Ушаков ^а, В. Я. Алешкин ^б, А. А. Дубинов ^б,
Н. В. Дикарева ^в, С. М. Некоркин ^в, Б. Н. Звонков ^в

^а Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь; e-mail: ushakovdv@bsu.by

^б Институт физики микроструктур Российской АН, Нижний Новгород, Россия

^в Нижегородский государственный университет, Нижний Новгород, Россия

Для лазеров с волноводом из квантовых ям на основе распределенной диффузионно-дрейфовой модели проведен расчет мощностных характеристик с учетом нагрева активной области, процессов захвата носителей заряда в квантовые ямы и особенностей инжекции носителей заряда и внутризонного поглощения. Показано, что введение дополнительных барьерных слоев, легированных примесями *n*- и *p*-типа, позволяет при больших накачках блокировать заполнение носителями заряда барьерных слоев, снизить утечки и увеличить мощность излучения лазеров.

Ключевые слова: волновод из квантовых ям, барьерные слои, легирование, диффузионно-дрейфовая модель, мощностные характеристики, токи утечки.

Введение

Использование диэлектрического широкого волновода в мощных полупроводниковых лазерах позволяет уменьшить нагрузку на зеркала и снизить оптические потери [1, 2]. В лазерах с квантовыми ямами (КЯ) для создания волновода можно использовать разницу показателей преломления материала КЯ и окружающего полупроводника [3, 4]. Расчеты показывают (рис. 1), что нескольких (3–6) КЯ вполне достаточно для создания волновода. В отличие от сверхширокого волновода в предлагаемом волноводе отсутствуют проблемы с селекцией мод, поскольку из-за слабого оптического ограничения в волноводе существует только основная мода.

Один из факторов, ограничивающих выходную мощность излучения лазеров с волноводом из КЯ, — большие токи утечки. Как показано в [5], с помощью дополнительных барьерных слоев можно регулировать уровень возбуждения структуры. В настоящей работе исследуется влияние дополнительных блокирующих легированных барьерных слоев для электронов и дырок по обе стороны от КЯ на мощностные характеристики таких лазеров.

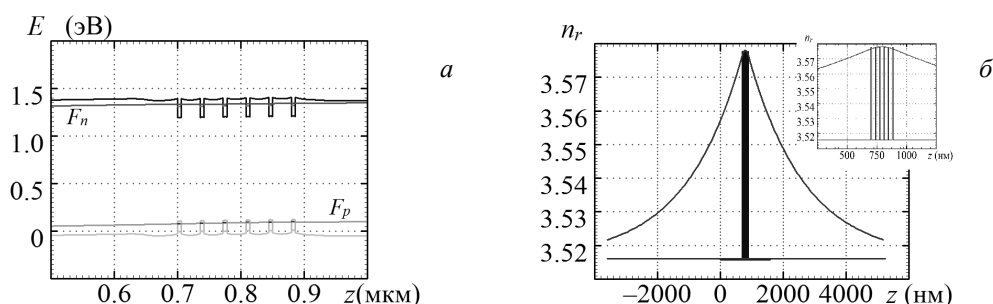


Рис. 1. Зонная диаграмма при $U = 1.37$ В (а) и координатная зависимость показателя преломления и распределение интенсивности моды (б) для лазерной структуры $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As-GaAs}$. $d_{qw} = 6$ нм, $T=300$ К

Теоретическая модель и обсуждение результатов

Расчет зонных диаграмм и электрофизических характеристик проводился на основе распределенной диффузионно-дрейфовой модели [6]. Для анализа мощностных характеристик использовались балансные уравнения для двухмерной концентрации носителей заряда (НЗ) в барьерных областях и КЯ, а также плотности энергии. Распределение мощности излучения вдоль резонатора находилось из уравнения Бугера для прямой и обратной волн с учетом коэффициентов отражения на гранях резонатора. Коэффициент внутренних потерь считался пропорциональным концентрации НЗ в барьерных областях и КЯ.

В лазерах с волноводом из КЯ очень важно корректно рассчитать показатель преломления n_r . В настоящей работе показатель преломления рассчитан на основе модели Адачи [7], модифицированной применительно к квантоворазмерным слоям. Вклад краевого поглощения учитывался с помощью соотношения Крамерса—Кронига. Как показывают расчеты, учет квантоворазмерного характера поглощения в КЯ дает меньшее значение показателя преломления в КЯ по сравнению с объемным полупроводником, что обусловлено уменьшением плотности состояний в квантоворазмерных слоях и смещением состояний в высокоэнергетическую область.

Исследуемые структуры состояли из барьерных (волноведущих) слоев GaAs и шести КЯ $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$. В качестве блокирующих барьерных слоев справа от КЯ использовался слой GaAs толщиной 20 нм, легированный донорами $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, слева от КЯ — два типа блокирующих слоев: слой GaAs толщиной 20 нм, легированный акцепторами $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, и такой же толщины гетерослой GaAs–GaAs_{0.95}P_{0.05}–GaAs с центральной частью GaAs_{0.95}P_{0.05} толщиной 10 нм.

Как видно рис. 2, введение легированных слоев создает потенциальные барьеры слева (130 и 170 мэВ) и справа (~90 мэВ) от КЯ. Чем выше барьер, тем эффективнее идет падение квазиуровней Ферми для электронов F_n (слева от КЯ) и дырок F_p (справа от КЯ). Высоту барьеров можно регулировать либо уровнем легирования, либо введением широкозонных материалов. В качестве блокирующего слоя эффективнее всего использовать материал с большей шириной запрещенной зоны E_g , чем барьерные слои, и большим показателем преломления. Но в полупроводниках, как правило, чем больше E_g , тем меньше n_r , что приводит к ухудшению волновода и уменьшению фактора оптического ограничения. Поэтому эффективно использовать легированные гетерослои GaAs_{0.95}P_{0.05} с небольшим содержанием фосфора (5 %), при этом фактор оптического ограничения снизился на 10 % и составил 0.0015 для одной КЯ.

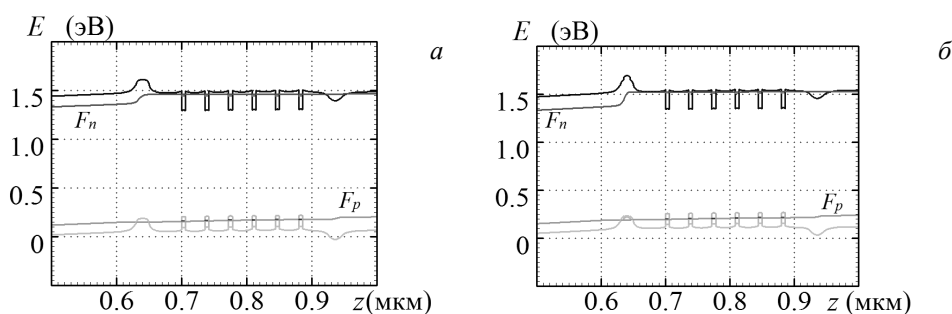


Рис. 2. Зонная диаграмма лазерных структур с легированными блокирующими слоями (а) и с легированными блокирующими гетерослоями (б)

Из рис. 3 видно, что введение блокирующих слоев приводит к значительному уменьшению токов утечки электронов с 60 % при токе 100 А для обычных лазеров на КЯ и 12 % для лазеров с блокирующим легированным гетерослоем. Коэффициент поглощения свободными НЗ увеличивается, однако остается достаточно малым ($\sim 2 \text{ см}^{-1}$). Уменьшение токов утечки позволяет увеличить максимальную мощность генерации. При токе 100 А для лазеров с блокирующим легированным гетерослоем мощность возрастает в 2.5 раза. Отметим, что данные расчеты проведены для длины резонатора $L=4 \text{ мм}$. При увеличении длины резонатора максимальная мощность начинает падать.

Таким образом, введение дополнительных барьерных слоев (в том числе гетерослоев), легированных примесями n - и p -типа, позволяет при больших накачках блокировать заполнение носителями заряда барьерных слоев, снизить токи утечки, увеличить мощность излучения лазеров, а также частично подавить нелинейность ватт-амперной характеристики и снизить пороговый ток лазера.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по проекту БРФФИ-РФФИ № Ф16Р–018 (16-52-00049) и Министерства образования и науки РФ (государственное задание 3.285.2014/К), стипендии президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики № СП-109.2016.3.

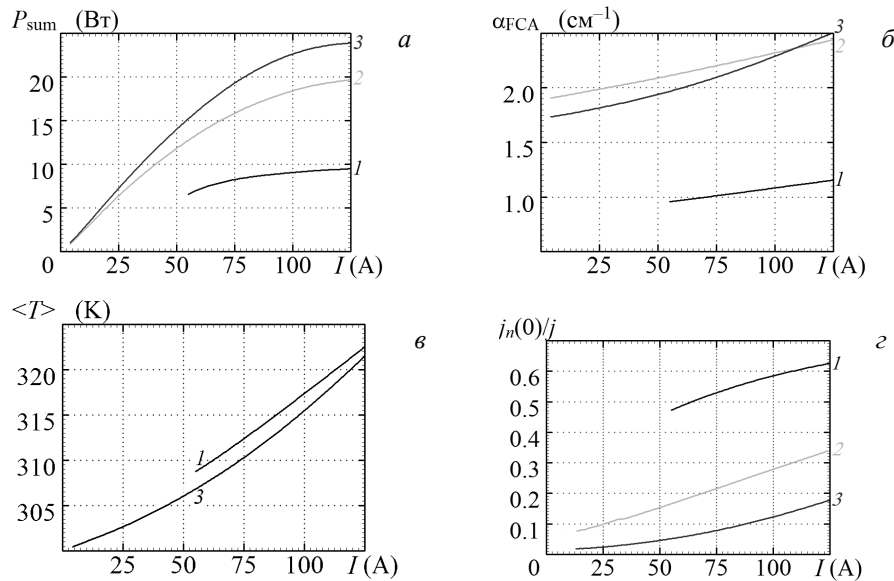


Рис. 3. Суммарная мощности генерации (а), коэффициент внутризонного поглощения (б), температура активной области (в) и доля токов утечки при 300 К (г) для лазеров с 6 КЯ при импульсной накачке 5 мкс для структур без блокирующих слоев (1), с легированными блокирующими слоями (2) и с легированными блокирующими гетерослоями (3). Длина резонатора $L = 4$ мм

Литература

1. В.А. Геловани, А.П. Скороходов, В.И. Швейкин. *Высокоэффективные высокоомощные диодные лазеры нового типа*. М. URSS, 2005. 152 с.
2. С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.А. Пихтин, К.С. Борщев, Д.А. Винокуров, И.С. Тарасов. *ФТП*. 2006. Т. 40, № 8. С. 1017–1023.
3. В.Я. Алешкин, Н.В. Дикарева, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.В. Карзанова, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.Н. Яблонский. *Квантовая электроника*. 2013. Т.43, № 5. С.401–406.
4. В.Я. Алешкин, А.А. Афоненко, Н.В. Дикарёва, А.А. Дубинов, К.Е. Кудрявцев, С.В. Морозов, С.М. Некоркин. *ФТП*. 2013. Т.47, № 11. С.1486–1488.
5. Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко. *Квантовая электроника*. 2008. Т. 38, № 11. С. 1001–1004.
6. А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков. *ФТП*. 2014. Т. 48, № 1. С. 88–93.
7. Sadao Adachi. *Phys. Rev. B*. 1987. Vol. 35, No 14. P. 7454–7463.

The Power Characteristics of Lasers with Multiple Quantum Well Waveguide and Blocking Layers

A. A. Afonenko ^a, D. V. Ushakov ^a, V. Ya. Aleshkin ^b, A. A. Dubinov ^b,
N. V. Dikareva ^c, S. M. Nekorkin ^c, B. N. Zvonkov ^c

^a Belarusian State University, Minsk, Belarus; e-mail: ushakovdv@bsu.by

^b Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia

^c Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia

For lasers with multiple quantum well waveguide based on the distributed diffusion-drift model the power characteristics are calculated taking into account the heating of the active region, the processes of charge carrier capture into quantum wells, and the peculiarities of charge carrier injection and intraband absorption. It is shown that the introduction of additional barrier layers doped with n - and p -type impurities allow to block the filling of barrier layers by charge carriers, reduce leakage and increase the power of laser at high pumping rates.

Keywords: multiple quantum well waveguide, barrier layers, doping, diffusion-drift model, power characteristics, leakage current.