

# Моделирование лазерных диодов с длиной волны генерации 3 мкм на основе HgTe/CdHgTe гетероструктур с множественными квантовыми ямами с учетом эффекта горячих фононов

А.А. Афоненко<sup>1,\*</sup>, Д.В. Ушаков<sup>1</sup>, А.А. Дубинов<sup>2</sup>, В.Я. Алешкин<sup>2</sup>, С.В. Морозов<sup>2</sup>, В.И. Гавриленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь.

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*afonenko@bsu.by

В работе предложен лазерный диод на основе нескольких квантовых ям HgTe с зонной структурой, обеспечивающей подавление оже-рекомбинации. Разработана модель учета горячих фононов для расчета неравновесной температуры электронов и дырок. Используя комплексную модель, учитывающую дрейф и диффузию носителей, оже-рекомбинацию и эффекты горячих фононов, показана возможность генерации при комнатной температуре на длине волны  $\lambda \sim 3$  мкм в гетероструктуре HgTe/Cd<sub>0.85</sub>Hg<sub>0.15</sub>Te с квантовыми ямами толщиной 2.2 нм. Найдено, что выходная мощность в импульсе может достигать 1 Вт для импульсов длительностью 1 мкс.

## Введение

Основными ограничивающими факторами для улучшения температурных характеристик лазеров среднего ИК-диапазона являются оже-рекомбинация в квантовых ямах (КЯ), неравновесный нагрев носителей заряда и друдевское поглощение свободными носителями. В настоящей работе на основе подтвержденной возможности стимулированного излучения при оптической накачке [1] и подавленной оже-рекомбинации в КЯ HgTe исследуется возможность генерации при инжекционной накачке.

## Дизайн структуры

Предлагаемая структура основана на нескольких КЯ HgTe толщиной 2.2 нм, помещенных в барьерные слои Cd<sub>0.85</sub>Hg<sub>0.15</sub>Te. Ширина КЯ HgTe подобрана для генерации излучения с  $\lambda = 3$  мкм. Преимуществом узких КЯ является уменьшение количества уровней размерного квантования, что способствует снижению числа каналов оже-рекомбинации. Из-за малой разницы показателей преломления и малой толщины КЯ волноводный эффект оказывается очень слабым. Для увеличения фактора оптического ограничения КЯ, рядом с активной областью предлагается вырастить дополнительный волноводный слой Cd<sub>0.6</sub>Hg<sub>0.4</sub>Te толщиной 400 нм.

## Неравновесный нагрев электронов

«Горячие» электроны и дырки появляются в активной области в процессе их захвата из барьерных областей на локализованные уровни и последующей термализации на нижние уровни КЯ за счет испускания оптических фононов. При взаимодействии электронов с интерфейсными фононными модами плотность вероятности испустить фонон с волновым числом  $q$  составляет

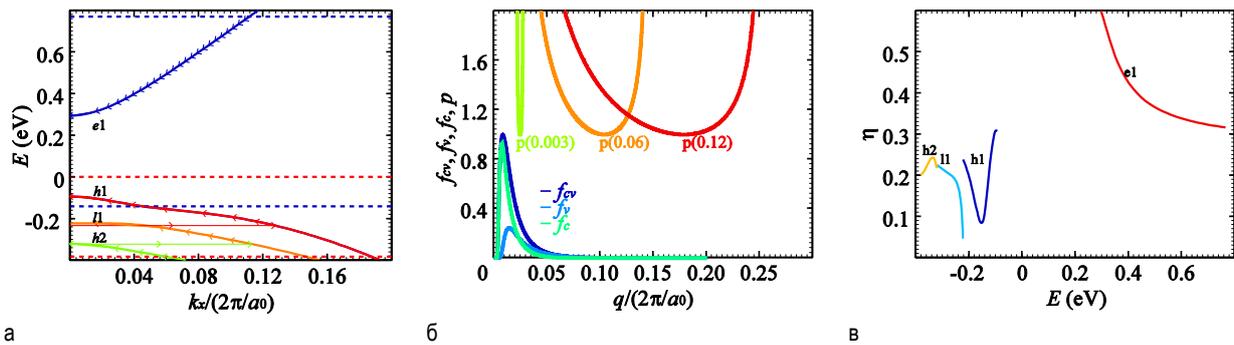
$$p(q) \sim \left( (k_1 + k_2)^2 - q^2 \right) \left( q^2 - (k_1 - k_2)^2 \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – волновые вектора конечного и начального состояния электрона. Эффективность «разогрева» электронов у края зоны фононами с различным  $q$  можно описать весовой функцией

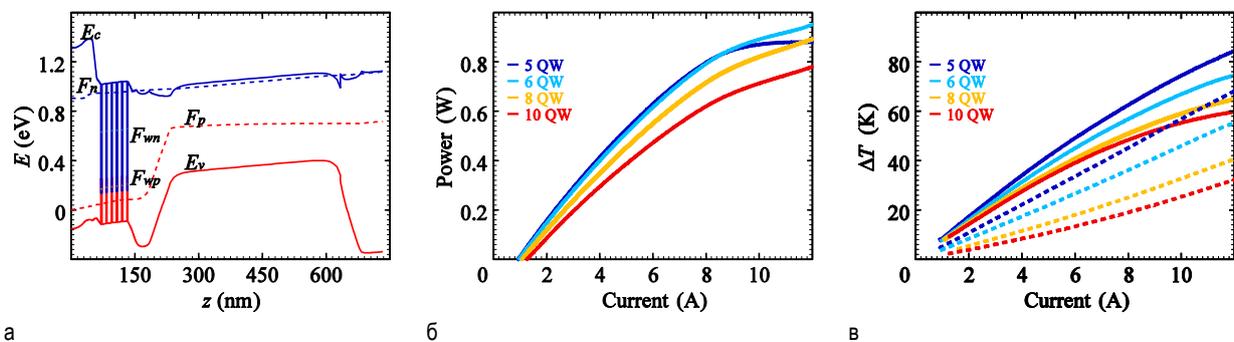
$$f_c(q) = \left( \frac{2m_c \hbar \omega_{LO}}{\hbar^2 q^2} \right) \exp \left[ - \frac{\hbar^2}{2m_c kT} \left( \frac{m_c \hbar \omega_{LO}}{\hbar^2 q} - \frac{q}{2} \right)^2 \right], \quad (2)$$

Здесь  $m_c$  – эффективная масса электрона,  $T$  – температура,  $\hbar \omega_{LO}$  – энергия оптических фононов. Соответствующая (2) эффективно взаимодействующая с электронами плотность фононных мод есть

$$\rho_{ph} = \int f_c(q) \frac{d^2 q}{(2\pi)^2} \approx \frac{m_c \sqrt{\hbar \omega_{LO} kT}}{\sqrt{\pi} \hbar^2}. \quad (3)$$



**Рис. 1.** Дисперсия электронов и дырок в направлении [013] в КЯ HgTe/Cd<sub>0.85</sub>Hg<sub>0.15</sub>Te толщиной 2.2 нм. Горизонтальные линии показывают энергии краев зоны проводимости (синие штриховые линии) и валентной зоны (красные штриховые линии) КЯ и барьерных слоев (а). Весовая функция для нижних уровней КЯ и ее электронная и дырочная составляющие в зависимости от волнового вектора фотона при  $T = 300$  К и плотность вероятности (ненормированная) испускания волнового вектора фотона электроном с волновым вектором  $k = 0.003, 0.06, 0.12 \times 2\pi/a_0$  ( $a_0$  – постоянная решетки) (б). Зависимость доли испускаемых фотонов, участвующих в термализации носителей у дна зоны, в зависимости от энергии носителей заряда. Подписи e1 обозначают подзоны электронов, h1, h2, l – тяжелых и легких дырок, соответственно (в)



**Рис. 2.** Зонная диаграмма лазерной структуры при прямом смещении. Показаны края зоны проводимости  $E_c$  и валентной зоны  $E_v$ , квазиуровни Ферми для носителей заряда в зонах  $F_n, F_p$  и КЯ  $F_{wn}, F_{wp}$  (а). Средняя выходная мощность (б) и избыточная температура «горячих» носителей заряда в крайних КЯ (в) при накачке импульсами тока длительностью 1 мкс для лазера с резонатором длиной 1 мм и шириной 100 мкм

## Результаты расчетов

Расчеты выполнялись на основе распределенной диффузионно-дрейфовой модели с учетом процессов захвата и выброса носителей на уровни КЯ [2]. Избыточная температура «горячих» электронов и дырок находилась из балансных уравнений для числа фотонов с учетом ур. (1)–(3) (рис. 1).

Выходные характеристики лазера с числом КЯ 5–10 рассчитывались в импульсном режиме при длительности импульса тока накачки 1 мкс (рис. 2). Двухмерный коэффициент оже-рекомбинации при 300 К считался равным  $4.3 \times 10^{-15}$  см<sup>4</sup>/с. В течении импульса происходил нагрев активной области на 90 К, поэтому мгновенная мощность и длина волны генерации уменьшались от начала к концу импульса. При времени жизни оптических фотонов 0.9 пс температура электронов и дырок в КЯ превышала температуру решетки на 60–80 К в зависимости от

числа КЯ. Пороговый ток рос от 0.8 до 1.2 А при увеличении числа КЯ с 5 до 10. Максимальная мощность достигалась в области 12 А и составляла 1 Вт для структуры с 6 КЯ. При этом в течении импульса накачки происходила перестройка длины волны генерации на более, чем 400 нм.

Работа выполнена при поддержке НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-906.

## Литература

1. К.Е. Kudryavtsev, V.V. Rumyantsev, V.Ya. Aleshkin *et al.* // Appl. Phys. Lett., 117, 083103 (2020).
2. А. Afonenko, D. Ushakov, G. Alymov *et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 54, 175108-1 (2021).