

# Моделирование инжекционных лазеров на основе HgTe/CdHgTe гетероструктур с квантовыми ямами, излучающих в области частот фононного резонанса GaAs

А.А. Афоненко<sup>1§</sup>, Д. В. Ушаков<sup>1</sup>, Г.В. Алымов<sup>2</sup>, А.А. Дубинов<sup>3</sup>, С.В. Морозов<sup>3</sup>, В.И. Гавриленко<sup>3</sup>, Д.А. Свинцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Республика Беларусь, §afonenko@bsu.by

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, 141700

<sup>3</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

На основе динамической распределенной диффузионно-дрейфовой модели лазерных гетероструктур, учитывающей процессы электронного и дырочного захвата в квантовые ямы, излучательную и безызлучательную Оже рекомбинации, а также нагрев активной области, теоретически продемонстрирована возможность получения генерации при инжекционной накачке квантовых ям HgTe в диапазоне длин волн 26–30 мкм при температурах до 90 К. Показано, что при внешней температуре 70 К средняя выходная мощность за импульс 1 мкс может достигать ~9 мВт.

## Введение

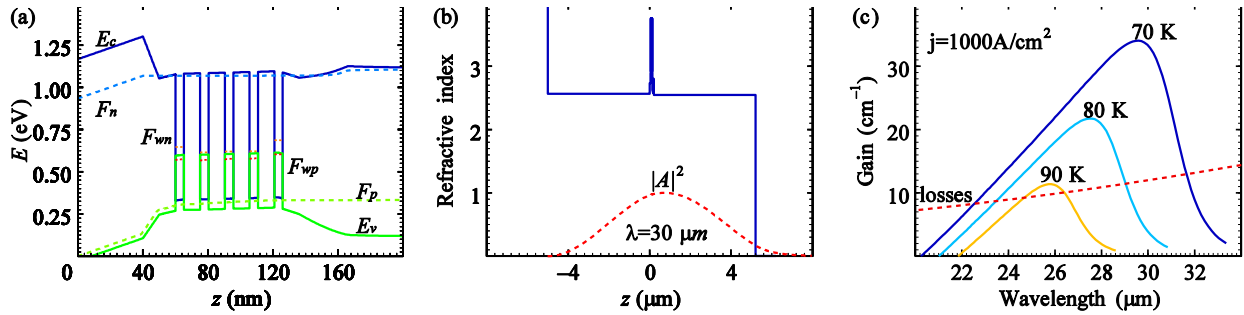
Среди множества электронных фаз, реализованных в квантовых ямах (КЯ) CdHgTe, наиболее привлекательной для генерации в дальнем инфракрасном диапазоне является узкозонный полупроводник с симметричной квазирелятивистской электронно-дырочной дисперсией [1]. Реализация такой дисперсии приводит к сильному подавлению безызлучательной оже-рекомбинации, что является основным препятствием для поддержания межзонной инверсии населенностей в узкозонных полупроводниках [2,3]. Хотя HgCdTe-лазеры с КЯ и электрической накачкой еще не реализованы экспериментально, были теоретические предложения квантово-каскадного лазера (ККЛ) на основе HgCdTe [4] и ИК HgCdTe-лазер, основанный на генерации разностной частоты [5]. В настоящей работе на основе подтвержденной возможности стимулированного излучения [6] и подавленной оже-рекомбинации в КЯ HgTe с оптической накачкой, исследуется возможность генерации с электрической накачкой.

## Теоретическая модель и результаты расчетов

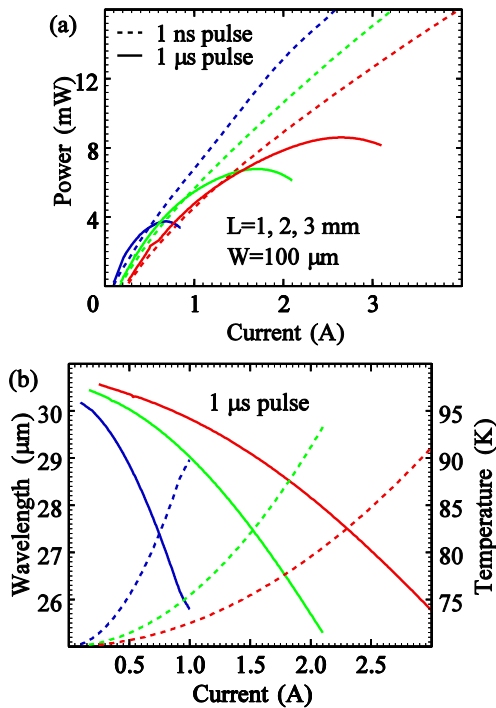
Предлагаемая структура состоит из 5 КЯ HgTe толщиной 5.2 нм и барьерных слоев Cd<sub>0.6</sub>Hg<sub>0.4</sub>Te (рис. 1 а). Толщина КЯ подбиралась для получения генерации в диапазоне длин волн 26–30 мкм. Этот диапазон длин волн лежит в полосе фононного поглощения соединений на основе GaAs и поэтому

недостижим для существующих ККЛ. Теоретическая модель [7, 8] включает в себя: дрейф и диффузию носителей заряда, процессы электронного и дырочного захвата в КЯ, излучательную и безызлучательную Оже-рекомбинацию, а также нагрев активной области. На рисунке 1 приведены рассчитанные диаграмма зоны проводимости и валентной зоны, пространственное распределение показателя преломления и спектры модового усиления. Из-за малой подвижности дырок уровень возбуждения КЯ уменьшается с удалением от *p*-эмиттера. На рисунке 1 б показано оптическое ограничение TE<sub>0</sub> моды ( $\Gamma = 0.0043$ ) за счет сильно легированной подложки GaAs с одной стороны гетероструктуры и металлического контакта с другой стороны. Расчеты показывают, что для получения большого усиления целесообразно использовать 5 КЯ. При дальнейшем увеличении числа КЯ модовый коэффициент усиления практически не растет. Как видно из рисунка 1 с при плотности тока 1 кА/см<sup>2</sup> модовое усиление превышает общие оптические потери до температур немного выше 90 К. При этом, с ростом температуры максимум усиления смещается в более короткие длины волн из-за температурной зависимости ширины запрещенной зоны.

На рис. 2 показаны зависимость выходной мощности, температуры активной области и длины волны генерации от тока накачки при трех значениях длины резонатора:  $L = 1, 2, 3$  мм. Ширина резонатора  $W = 100$  мкм. Максимальная выходная мощность



**Рис. 1.** (а) Зонная диаграмма лазерной структуры при температуре 70 K, напряжении 1.1 В, плотности тока 921 А/см<sup>2</sup> и плотности фотонов  $S^{(2D)} = 4.3 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>,  $F_{wn}$ ,  $F_{wp}$  ( $F_n$ ,  $F_p$ ) – квазиуровни Ферми локализованных (нелокализованных) носителей; (б) пространственное распределение показателя преломления и квадрат напряженности электрического поля основной TE<sub>0</sub>-моды; (с) спектры модового усиления ( $\Gamma(T_{E_0})=0.0043$ ) при температурах  $T = 70, 80, 90$  K



**Рис. 2.** Рассчитанные (а) выходная мощность (б) длина волны генерации (сплошные кривые) при температуре активной области (штриховые кривые) в конце импульса накачки длительностью 1 мкс в зависимости от тока накачки для различных длин резонатора. Ширина резонатора 100 мкм, коэффициенты отражения  $r_1=r_2=0.5$ , внешняя температура 70 K

увеличивается с увеличением длины резонатора, что является следствием более слабого нагрева в устройствах с более длинным резонатором. При длительности импульса 1 мкс максимальная выходная мощность достигает 8.6 мВт при  $L = 3$  мм.

Во время действия импульса накачки активная область нагревается и длина волны излучения изменяется. Как видно из рисунка 2b, изменение длины волны и температуры за время импульса накачки составляет ~4 мкм и ~20 K, соответственно. Про-

блемы с нагревом можно уменьшить с помощью более коротких импульсов, которые позволяют достичь выходной мощности до десятков мВт, как показано на рис. 1а.

Таким образом, теоретически продемонстрирована возможность получения генерации при инжекционной накачке квантовых ям HgTe в диапазоне длин волн 26–30 мкм. Этот диапазон длин волн лежит в полосе фонованого поглощения соединений на основе GaAs и поэтому недостижим для существующих ККЛ. Возможность генерации на таких длинных волнах и температуре жидкого азота обусловлена подавлением Оже-рекомбинации в узких КЯ HgTe, которая, в свою очередь, унаследована от симметричной квазирелятивистской электронно-дырочной дисперсии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 17-12-01360.

### Литература

1. Ruffenach S., de Paula A.M., de Oliveira C.R.M., *et al.* // APL Materials, 5(3), 035503 (2017).
2. Emtage P.R. // J. of Appl. Phys., 47(6), 2565 (1976).
3. Alymov G., Vyurkov V., Ryzhii V., *et al.* // Phys. Rev. B., 2018. 97(20), 205411 (2018).
4. Ushakov D., Afonenko A., Khabibullin R., *et al.* // Opt. Express, 28 (17), 25371 (2020).
5. Dubinov A.A., Aleshkin V.Ya., Morozov S.V. // Quantum Electronics, 49 (7), 689 (2019).
6. Morozov S.V., Rumyantsev V.V., Fadeev M.A., *et al.* // App. Phys. Lett., 111 (19), 192101 (2017).
7. A.A. Afonenko, D.V. Ushakov // Semiconductors, 48 (1), 83 (2014).
8. Afonenko A., Ushakov D., Alymov G., *et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys., (2021 to be published).