

# Новые дизайны лазерных переходов квантово-каскадных структур ТГц диапазона для получения высокой мощности и для работы при повышенных температурах

Д.В. Ушаков<sup>1\*</sup>, А.А. Афоненко<sup>1</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>2</sup>, А.А. Васильевский<sup>3</sup>, В.И. Гавриленко<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 1115409, Москва, Россия.

<sup>4</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

\*ushakovdv@bsu.by

Предложены два новых дизайна лазерных переходов квантово-каскадных структур на основе GaAs/AlGaAs для получения высокой мощности излучения и увеличения рабочих температур. Первый дизайн основан на использовании двух фотонной схемы лазерных переходов, что обуславливает приблизительно в 2 раза более медленное насыщение коэффициента усиления с ростом плотности фотонов и высокую расчетную мощность (~600 мВт) при азотных температурах. Второй дизайн основан на концепции использования рабочих уровней с волновыми функциями, простирающимися на два и более периода структуры, что позволяет увеличить матричный элемент дипольных переходов. При этом, нижний лазерный уровень имеет больший энергетический зазор с инжектором, менее заселен и температурно стабилен по сравнению с традиционными дизайнами, что позволяет ожидать максимальную рабочую температуру ~250 К.

## Введение

Реализованные в настоящее время квантово-каскадные лазеры (ККЛ) преимущественно созданы на основе структур GaAs/AlGaAs с дизайном «резонансное испускание оптического фонона» [1–5]. В терагерцовой области частот рабочие температуры постоянно повышались как за счет минимизации потерь [2, 6], так и оптимизации матричных элементов дипольных переходов  $Z_{nm}$  между рабочими уровнями и числа квантовых ям (КЯ) [1–6]. Для уменьшения утечек в континуум предлагались схемы с увеличенной высотой барьерных слоев [7–8].

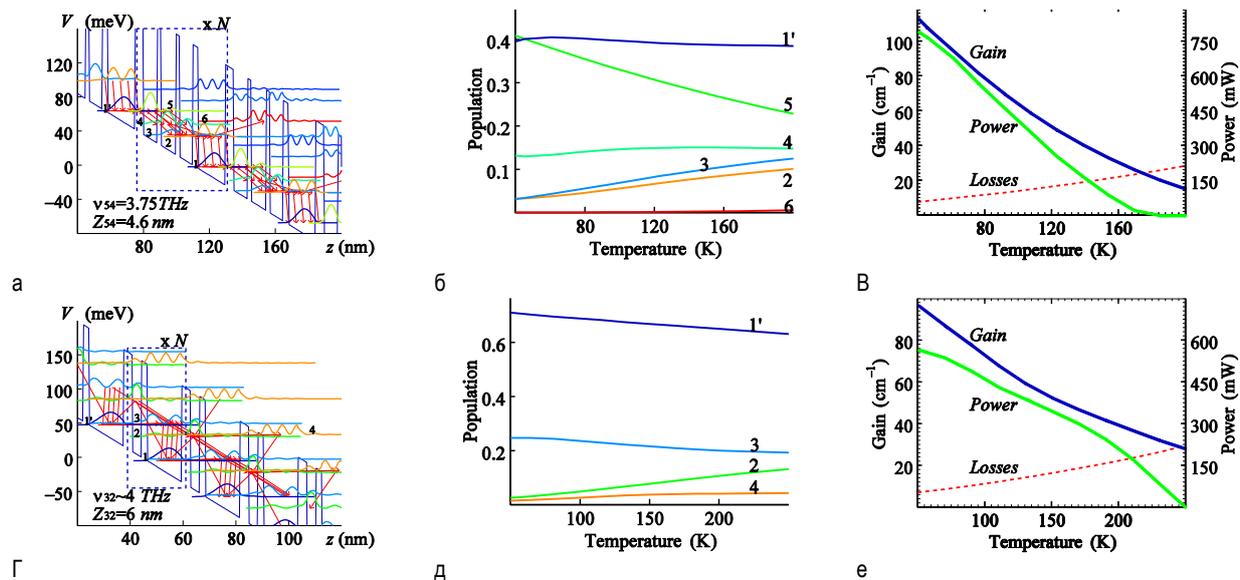
В настоящей работе предложены новые конструкции ТГц ККЛ на основе GaAs/AlGaAs и обсуждаются особенности двух разработанных дизайнов лазерных переходов для получения высокой мощности излучения и увеличения рабочих температур.

## Теоретическая модель и новые дизайны лазерных переходов

Вольт-амперная характеристика каскада находилась методом балансных уравнений с периодическими граничными условиями [9–10]. Базисные волновые функции находились **к р**-методом [10] с последующим преобразованием специального вида для учета дефазировки [9,10]. Вероятности переходов

учитывали процессы туннелирования, электрон-электронного рассеяния, рассеяния на оптических фононах, заряженных примесях, шероховатостях гетерограниц.

Основной задачей проектирования ККЛ является получение усиления структуры на возрастающем участке вольт-амперной характеристики. Первый дизайн – для получения высокой мощности излучения получен путем сканирования толщин барьерных слоев и КЯ для активной области из 4-х КЯ. На рисунке 1 а–в приведены расчеты уровней энергии и волновых функций, а также температурные зависимости населенностей уровней, спектры усиления и мощности излучения для одной из оптимальных структур  $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ , слои которой составляют 3.39/16.37/5.08/8.47/2.26/9.03/2.26/7.9 нм. Центральная часть широкой КЯ легирована примесями со слоевой концентрацией  $4.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Схема лазерных переходов основана на использовании туннелирования с уровня инжектора 1' на верхний рабочий уровень 5, двух последовательных лазерных переходов (5-4 и 4-3) и опустошения нижнего рабочего уровня 3 за счет туннелирования на уровень 2 и резонансного испускания оптического фонона. При этом, рабочее напряжение на одном каскаде близко к сумме двух энергий излучения и энергии продольного оптического фонона  $2 \hbar\omega + \hbar\omega_{LO}$ . Эффективность схемы  $2 \hbar\omega + \hbar\omega_{LO}$



**Рис. 1.** (а, г) Диаграммы зоны проводимости и квадраты модулей волновых функций электронов, рассчитанные **к р**-методом, для оптимизированных ТГц ККЛ на основе GaAs/AlGaAs при напряжении на каскаде  $V_1=65.5$  (а) и  $52.5$  мВ (г) и температуре  $T=77$  (а) и  $200$  К (г), температурные зависимости населенностей энергетических уровней (б, д), а также (в, е) коэффициентов усиления и потерь на частоте генерации и мощности излучения

подтверждается приближенно в 2 раза более медленным насыщением коэффициента усиления с ростом плотности фотонов по сравнению с традиционной схемой  $\hbar\omega + \hbar\omega_{LO}$ . Расчеты на рисунке 1 в показывают, что при азотных температурах достигается высокое значение мощности  $\sim 600$  мВт, а максимальная рабочая температура составляет  $180$  К.

Второй дизайн для повышения рабочих температур ККЛ основан на концепции использования слабо локализованных состояний с волновыми функциями, простирающимися на два и более периодов структуры [10]. На рисунке 1 г–е приведены расчеты уровней энергии и волновых функций, а также температурных характеристик для одной из оптимальных структур, толщины слоев которой барьер/КЯ слева направо имеют следующие значения:  $2.26/12.99/3.39/3.39$  нм. Центральная часть широкой КЯ легирована примесями со слоевой концентрацией  $3 \cdot 10^{10}$  см $^{-2}$ . В предложенном дизайне волновые функции, соответствующие рабочим уровням 3 и 2, оказываются протяженными и слабо локализованными. При этом достигается большой матричный элемент дипольных переходов  $Z_{32} = 6$  нм. Предложенный дизайн с 2 КЯ характеризуется гибридной схемой накачки, основанной на резонансных туннельных переходах с уровня инжектора  $1'$  на верхний лазерный уровень 3 следующего периода. Однако, населенность верхнего лазерного уровня 3 слабо связана с населенностью инжекторного уровня  $1'$  и синхронизирована через

электрон-фононное взаимодействие с населенностью нижнего лазерного уровня 2 следующего (предыдущего) периода. При этом, расчетное значение максимальной рабочей температуры составляет  $\sim 250$  К.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-72-30020.

## Литература

1. B.S. Williams // Nature Photonics, V. 1, 517 (2007).
2. H. Luo, S.R. Laframboise, Z.R. Wasilewski et al. // Appl. Phys. Lett., V. 90, 041112 (2007).
3. M.A. Belkin, J.A. Fan, S. Hormoz et al. // Opt. Exp., V. 16, 3242 (2008).
4. S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno // Appl. Phys. Lett., V. 94, 131105 (2009).
5. S. Fatholouloumi, E. Dupont, C.W.I. Chan et al. // Optics Express, V. 20, 3866 (2012).
6. Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов и др. // Квантовая электроника, Т. 48, 1005 (2018).
7. L. Bosco, M. Franckie, G. Scalari et al. // Appl. Phys. Lett., V. 115, 010601 (2019).
8. A. Khalatpour, A.K. Paulsen, C. Deimert et al. // Nature Photonics, V. 15, 16 (2021).
9. Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов и др. // Квантовая электроника, Т. 49, 913 (2019).
10. D. Ushakov, A. Afonenko, R. Khabibullin, et al. // Opt. Express, 28 (17), 25371 (2020).