

Моделирование GaAs/AlGaAs квантово-каскадных лазеров с двух- и трехфотонной схемами переходов для низкочастотной ТГц-генерации

Д. В. Ушаков^{1*}, А. А. Афоненко¹, Р. А. Хабибуллин², В. И. Гавриленко³, А. А. Дубинов³

¹Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141701, Россия

³Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, д. Афоново, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087, Россия

*ushakovdv@bsu.by

В настоящее время компактные полупроводниковые источники излучения в диапазоне частот около 1 ТГц востребованы для различных применений: спектроскопии, медицинских исследованиях и промышленных приложений [1]. Одним из важных требований к таким источникам является генерируемая мощность излучения. Проблема получения большой мощности излучения в ККЛ связана с эффектом насыщения усиления, который состоит в уменьшении коэффициента усиления на фиксированной частоте излучения с ростом амплитуды напряженности электромагнитного поля в резонаторе. В подавляющем большинстве терагерцевых ККЛ в активном каскаде работает одна пара лазерных уровней, в рамках которой реализуется инверсная населенность. При этом электронный транспорт в данных дизайнах сопровождается резонансным туннелированием с уровня инжектора на верхний лазерный уровень, испусканием терагерцевого фотона и резонансным опустошением нижнего лазерного уровня в результате испускания продольного оптического фонона при переходе на уровень инжектора следующего активного каскада. Недавно [2, 3] было предложено включить дополнительную «ступень» в энергетическую лестницу электронных уровней активного каскада, т. е. использовать два последовательных оптических перехода с испусканием терагерцевого фотона. Несмотря на то, что в предложенном двухфотонном дизайне на частоте $\sim 3,7$ ТГц инверсная населенность перераспределяется между двумя оптическими переходами ($2\hbar\omega$), которые конкурируют между собой, выигрыш данного подхода состоит в более медленном (приблизительно в 2 раза) падении коэффициента нелинейного усиления α с ростом плотности фотонов по сравнению с традиционной однофотонной схемой. Это должно привести либо (при совпадении энергии переходов) к увеличению мощности выходного излучения либо (при несовпадении энергии переходов) – к широкому спектру генерации. В данной работе впервые предлагаются двух- и трехфотонные схемы лазерных переходов в GaAs/AlGaAs квантово-каскадных лазерах для частот генерации около 1 ТГц.

Разработаны дизайны для генерации в области 1,2–1,3 ТГц и расчетным значением мощности ~ 20 Вт при среднем легировании на каскад $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. На рис. 1 приведены результаты расчета уровней энергии и волновых функций для структуры Al_{0,14}Ga_{0,86}As/GaAs с 4 КЯ. Рабочее напряжение на одном каскаде близко к сумме двух-трех энергий излучения и энергии продольного оптического фонона $2-3\hbar\omega + \hbar\omega_{LO}$. Как показывают расчеты, использование трехфотонной схемы переходов не дает увеличения мощности излучения, однако позволяет отстроиться от «паразитного» пика на вольт-амперной характеристике в области 37 мВ вследствие увеличения суммарной энергии $3\hbar\omega$ лазерных переходов.

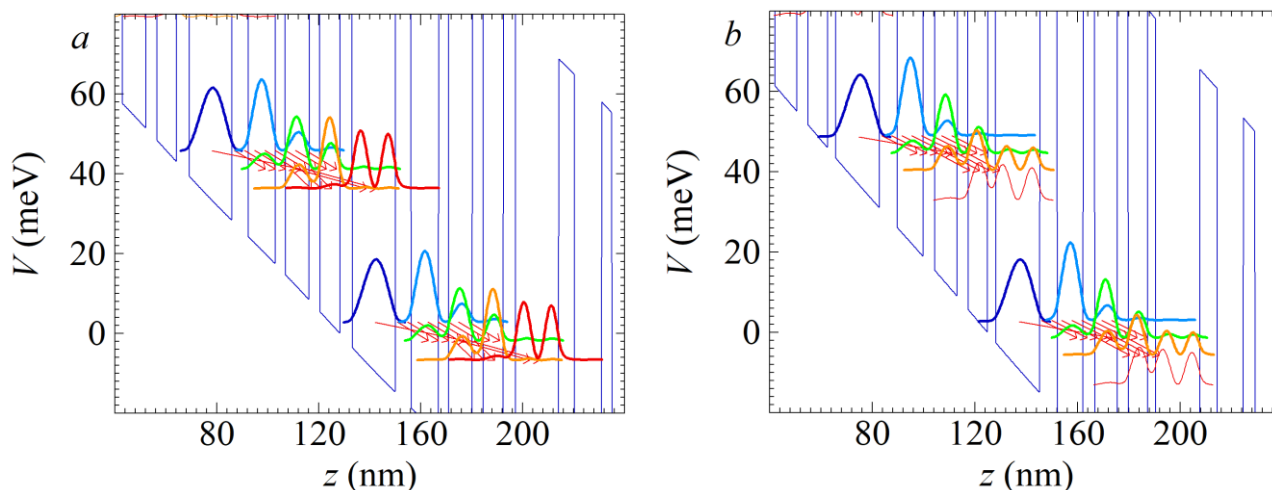


Рис. 1. Диаграмма зоны проводимости и квадраты модулей волновых функций электронов ККЛ с 2-х (а) и 3-х (б) фотонными схемами переходов при напряжении в одном модуле 43 (а) и 46 мВ (б) и температуре $T = 60$ К

1. Leitenstorfer, A.S. Moskalenko, T. Kampfrath, et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2023. Vol. 56. P. 223001.

2. Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, Р.А. Хабибуллин и др. // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 2022. Т. 58. С. 237–244.

3. Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, Д.С. Пономарев и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65. С. 505–515.