

# ТГц квантово-каскадные лазеры с испусканием двух фотонов в одном усиливающем модуле, выращенные методами МЛЭ и МОС-гидридной эпитаксии

Р.А. Хабибуллин<sup>1, 2, \*</sup>, А.А. Афоненко<sup>3</sup>, Д.В. Ушаков<sup>3</sup>, С.С. Пушкарев<sup>1, 2</sup>, Р.Р. Галиев<sup>1, 2</sup>, Д.С. Пономарев<sup>1</sup>, И.С. Васильевский<sup>4</sup>, А.Н. Клочков<sup>4</sup>, А.Н. Виниченко<sup>4</sup>, М.А. Ладугин<sup>5</sup>, Т.А. Багаев<sup>5</sup>, А.А. Мармалюк<sup>5</sup>, К.В. Маремьянин<sup>6</sup>, В.И. Гавриленко<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105.

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, 194021.

<sup>3</sup> Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, Беларусь, 220030.

<sup>4</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское ш., 31, Москва, 1115409.

<sup>5</sup> АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», ул. Введенского, 3, Москва, 117342.

<sup>6</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, Нижний Новгород, 607680.

\*khabibullin@isvch.ru

В работе предложена и экспериментально реализована новая схема работы ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ) с последовательным испусканием двух фотонов в одном усиливающем модуле. В отличие от традиционной схемы с одной парой лазерных уровней, в предложенной схеме электроны совершают переход через дополнительный энергетический уровень, который является нижним лазерным уровнем для первого излучательного перехода и верхним лазерным уровнем для второго излучательного перехода. Это приводит к прохождению электронов в усиливающем модуле по схеме «резонансное туннелирование – фотон – фотон – фонон». На основе предложенной схемы был оптимизирован двух-фотонный дизайн ТГц ККЛ с активным модулем (инжектор и усиливающий модуль) из четырех туннельно-связанных квантовых ям GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As с максимумом усиления вблизи 3.8 ТГц. Лазерные структуры с активной областью на основе двухфотонного дизайна были выращены с помощью двух эпитаксиальных методик – молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и МОС-гидридная эпитаксия (МОСГЭ). Изготовленные ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом на основе золота продемонстрировали хорошую толерантность к ростовым методам, поскольку спектры излучения лазеров на МЛЭ- и МОСГЭ-структурах очень близки.

## Введение

Квантово-каскадные лазеры терагерцевого диапазона (ТГц ККЛ) непрерывно улучшают излучательные (выходная мощность, режимы генерации и др.) и эксплуатационные (рабочая температура, потребляемая электрическая мощность и др.) характеристики, что является большим преимуществом по сравнению с конкурирующими источниками ТГц волн. Данный прогресс ТГц ККЛ в первую очередь связан с развитием зонных дизайнов полупроводниковых лазерных структур, состоящих из набора туннельно-связанных квантовых ям (КЯ), что обеспечивает большое число степеней свободы для оптимизации (толщины и количество КЯ, высота потенциальных барьеров, механизмы инжекции/экстракции электронов и др.).

В данной работе предложена новая «двухфотонная» схема работы ТГц ККЛ и продемонстрированы спектральные характеристики лазеров, изготовленных на основе двухфотонной схемы.

## Двухфотонная схема

Чрезвычайно малая энергия ТГц фотона (4–20 мэВ) позволяет включить дополнительную «ступень» в энергетическую лестницу электронных уровней усиливающего модуля при использовании традиционной гетеропары GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As. При этом «паразитная» инжекция с уровня  $i'$  на уровень  $l$  для однофотонного дизайна начинает играть положительную роль для накачки второго излучательного перехода  $i' \rightarrow l(u)$  в двухфотонном дизайне (см. рис. 1).

## Результаты

На основе предложенной двухфотонной схемы был оптимизирован дизайн ТГц ККЛ с активным модулем из четырех туннельно-связанных квантовых ям GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As с максимумом усиления вблизи 3.8 ТГц. ТГц ККЛ с Au-Au волноводом были изготовлены на основе лазерных структур, выращенных с помощью МЛЭ и МОСГЭ. Толщина активной области выращенных структур составляла около 10

мкм, что включает 185 повторений активного модуля. Описание роста методом МЛЭ представлено в работе [1]. В МОСГЭ в качестве исходных реагентов использовались триэтилгаллий, триметилалюминий и арсин. В качестве легирующего компонента для получения n-типа проводимости применялся моносилан. Температура роста составляла 680-700°C. Типичная скорость роста для GaAs составляла 0.65 мкм/час, для AlGaAs 0.77 мкм/час.

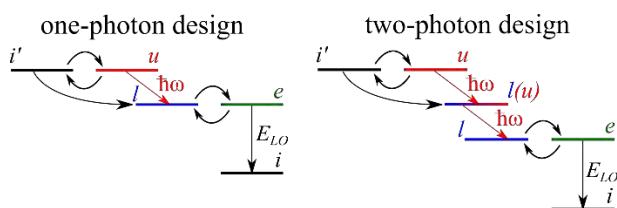


Рис. 1. Схема уровней одно- и двухфотонных дизайнов для ТГц ККЛ с резонансно-фононным опустошением

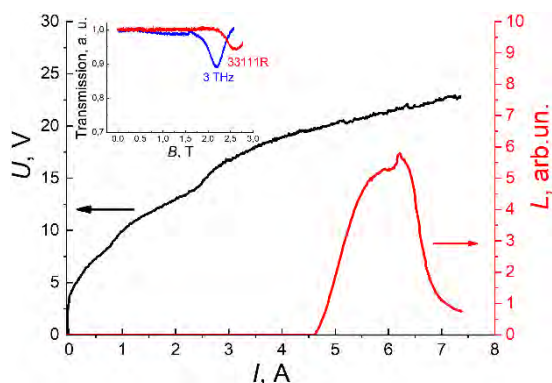


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика и зависимость интенсивности интегрального излучения от тока для ККЛ #33111R на основе структуры, выращенной МОС-гидридной эпитаксией. На вставке приведены спектры циклотронного резонанса в гетероструктуре HgTe/CdHgTe, полученные с помощью референсного 3.0 ТГц ККЛ и ККЛ #33111R

На рис. 2 приведены  $L$ - $I$ - $V$  зависимости для ККЛ #33111R, выращенного МОСГЭ, с размерами лазерного полоска 100 мкм/2 мм. Для генерации данного лазера требуются чуть большие напряжения (более 19.7 В), что соответствует ожидаемым значениям при  $V_i = 2 \cdot \hbar\omega_{ph} + E_{LO}$  на одном активном модуле. На вставке рис. 2 приведены спектры циклотронного резонанса в HgTe/CdHgTe гетероструктурах, из которых видно, что частота излучения ККЛ выше 3 ТГц.

Для более точного измерения частоты генерации изготовленных ККЛ был использован метод Фурье-

спектроскопии. На рис. 3 приведены спектры генерации двух ККЛ: #54214L (выращенный МЛЭ) и #33111R (выращенный МОСГЭ). На спектрах наблюдаются две или три линии генерации вблизи 3.8 ТГц, соответствующие продольным модам резонатора Фабри-Перо. Стоит отметить точность совпадения частоты генерации, рассчитанной при проектировании дизайна, с экспериментом. Кроме того, предложенный дизайн продемонстрировал хорошую толерантность к двум принципиально разным по физическим принципам методам роста.

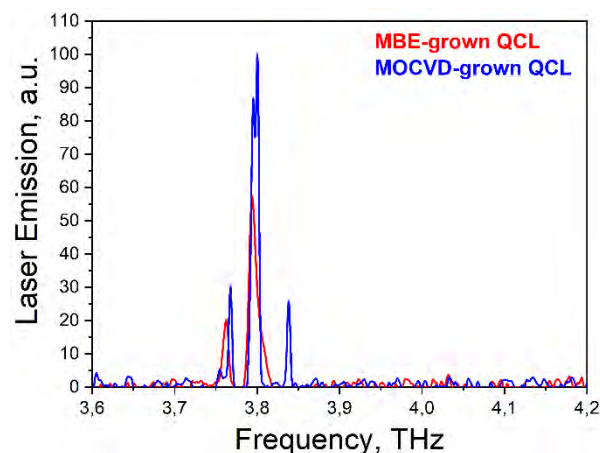


Рис. 3. Спектры излучения ККЛ #54214L (МЛЭ) и #33111R (МОСГЭ), измеренные при 30 К

При более детальном сравнении ККЛ было установлено, что лазеры на основе МЛЭ структур имеют меньшие пороговые токи, но большие рабочие напряжения по сравнению с лазерами, выращенными МОС-гидридной эпитаксией. Рабочие температуры некоторых лазеров достигали  $\sim 80$  К, при этом интенсивность излучения оставалась достаточной для измерения спектра.

Таким образом, в работе впервые продемонстрированы ТГц ККЛ с двухфотонным дизайном, выращенные МЛЭ и МОС-гидридной эпитаксией. Мы полагаем, что двухфотонный дизайн позволит улучшить характеристики низкочастотных ТГц ККЛ и увеличить мощность данных лазеров.

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

## Литература

1. Р.А. Хабибуллин и др. // ФТП, V. 11, pp. 989-994 (2021).