# Исследование спектральных характеристик 2.2 ТГц квантово-каскадного лазера с двухсекционным резонатором в зависимости от температуры и тока

А.К. Долгов<sup>1\*</sup>, Р.Р. Галиев<sup>1,2</sup>, С.С. Пушкарев<sup>1,2</sup>, А.А. Афоненко<sup>3</sup>, Д.В. Ушаков<sup>3</sup>, О.Ю. Волков<sup>4</sup>, В.В. Павловский<sup>4</sup>, И.Н. Дюжиков<sup>4</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>1,2\*\*</sup>

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

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

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

<sup>4</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11

\*sereega.retorov@yandex.ru, \*\*khabibullin@isvch.ru

В работе представлены результаты исследования спектральных характеристик 2.2 ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ) с резонатором Фабри-Перо, состоящим из двух оптически связанных секций – усиливающей и пассивной, разделенных воздушным зазором шириной 3 мкм. Активная область ТГц ККЛ основана на туннельно-связанных квантовых ямах (КЯ) GaAs/AlGaAs с содержанием алюминия в барьерных слоях 15%. Проведены исследования спектральных характеристик изготовленных двухсекционных ТГц ККЛ в зависимости от температуры и тока. Построены карты переходов от одномодового излучения к многомодовому в зависимости от тока накачки и температуры работы лазера. Переход «одномод-многомод» объясняется изменением лоренцевского контура уширения спектра усиления активной среды лазера при увеличении тока/температуры.

#### Введение

Терагерцовое (ТГц) излучение позволяет исследовать структуру и энергетический спектр многих молекул (CO, OH и др.) и атомов (OI и др.), имеющих возбужденные вращательные состояния. Например, вблизи 2 ТГц находятся линии поглощения таких соединений, как угарный газ (CO), оксид азота (NO до 2.7 ТГц), формальдегид (СН<sub>2</sub>О до 2.39 ТГц), включая его изотоп HDCO, и многих других веществ, актуальных для медико-биологических и экологических приложений. Задачу по определению малых концентраций данных веществ в газовой смеси позволяет решить ТГц спектроскопия высокого разрешения, где необходимы ТГц источники излучения с узкой шириной спектральной линии, а также достаточным уровнем выходной мощности и стабильностью частоты. ТГц квантово-каскадные лазеры (ТГц ККЛ) с высокой спектральной яркостью (порядка мВт на МГц) являются отличными кандидатами на эту роль.

Для использования ТГц ККЛ в спектроскопии в качестве источника необходимо обеспечить работу лазера в одномодовом режиме генерации с максимально возможной перестройкой частоты излучения. Целью работы является исследования спектральных характеристик 2.2 ТГц ККЛ с двухсекционным резонатором, который позволяет осуществлять одномодовый режим генерации.

## Экспериментальные образцы

В работе представлены результаты исследования спектральных характеристик 2.24 ТГц ККЛ с активным модулем из 4 квантовых ям GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As. На основе гетероструктуры #723 были изготовлены ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом. Технология изготовления подробно описана в работах [1, 2].



**Рис. 1.** Топология двухсекционного резонатора ТГц ККЛ с шириной полоска 100 мкм и общей длиной составного резонатора Фабри-Перо около 2 мм

На рис. 1 схематично приведена топология двухсекционных ТГц ККЛ с 3 мкм воздушным зазором (в измерительном криостате происходит откачка воздуха, поэтому между секциями будет вакуум), который разделяет активную секцию длиной  $L_1 = 1.8$  мм и пассивную секцию длиной  $L_2$  от 200 до 300 мкм. Таким образом, общая длина составного резонатора Фабри-Перо составляла около 2 мм. Из изготовленных кристаллов были выколоты сформированные плазмохимическим травлением двухсекционные резонаторы, которые далее монтировались на теплоотводе. Активная секция лазеров была разварена золотой проволокой.

## Результаты и обсуждение

Исследование спектральных характеристик, изготовленных двухсекционных ТГц ККЛ проводилось методом Фурье-спектроскопии (Bruker Vertex 80v) в ИРЭ РАН. Были измерены спектры излучения во всем динамическом диапазоне токов генерации и диапазоне температур от 50 до 78 К. Обнаружено, что при изменении тока/температуры на спектрах генерации ТГц ККЛ наблюдается переход «одномод-многомод». Для иллюстрации данного эффекта на рис. 2 представлена карта переходов режимов генерации двухсекционного ТГц ККЛ, на которой видно, что одномодовая генерация существует в ограниченном диапазоне температур и токов.

Для объяснения наблюдаемого эффекта перехода «одномод-многомод» были рассчитаны спектры потерь и усиления двухсекционного ТГц ККЛ (см. Рис. 3). Пассивная секция резонатора приводит к модуляции потерь с амплитудой модуляции около 1.3 см<sup>-1</sup>, что обеспечивает селекцию продольных мод в резонаторе. Соприкосновение на графике контура усиления моды с уровнем потерь (условие равенства G =α) соответствует генерации данной моды излучения. Расчёты показали, что при увеличении уширения лоренцевского контура усиления у с 1 до 2 мэВ резко сокращается количество касаний, обеспечивающих выполнение условия  $G = \alpha$ . Таким образом, переход «одномод-многомод» в двухсекционном ККЛ при изменении температуры/тока связан с уширением контура усиления активной среды.

В работе продемонстрирована одномодовая и многомодовая генерация ТГц ККЛ за счет использования двухсекционного резонатора, состоящего из активного резонатора/воздушного зазора/пассивного резонатора. На основе построенных карт режимов генерации обнаружено, что двухсекционные ТГц ККЛ крайне чувствительны к внешним факторам (температуре и току инжекции).



Рис. 2. Карта режимов работы двухсекционного ТГц ККЛ в диапазоне температур от 50.5 К до 58.5 К и токов от 0.860 А до 1.074 А. Темная область соответствует работе лазера в многомодовом режиме генерации, светлая область обозначает одномодовый режим генерации



Рис. 3. Спектр потерь (синяя кривая) и семейство спектров усиления мод в двухсекционном резонаторе с лоренцевским контуром уширения  $\gamma = 1$  мэВ (верхний рисунок) и 2 мэВ (нижний рисунок). На рисунках представлены только те спектры усиления мод, которые соприкасаются с уровнем потерь в резонаторе, что соответствует условию генерации данных мод

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

#### Литература

- Хабибуллин Р.А. *и др.* // ФТП. Vol. 50, № 10. Р. 1395–1400 (2016).
- Хабибуллин Р.А. *и др.* // ФТП. Vol. 52, № 11. Р. 1268–1273 (2018).