

Исследование излучательных особенностей терагерцового квантово-каскадного лазера при изменении тока и температуры

К.В. Маремьянин^{1,2*}, Р.А. Хабибуллин³, Н.В. Щаврук³, И.С. Васильевский⁴,
А.А. Афоненко⁵, Д.В. Ушаков⁵, В.И. Гавриленко^{1,2}, С.В. Морозов^{1,2}

¹ Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., 607680, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, просп. Гагарина, д. 23, корп. 2, 603950, Нижний Новгород, Россия

³ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., д.7, стр. 5, 117105, Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское ш., 3, 1115409, Москва, Россия

⁵ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь

*kirillm@ipmras.ru

В данной работе исследованы ВАХ, излучательные характеристики и спектры излучения GaAs/AlGaAs квантово-каскадных лазеров. Наблюдался пороговый рост интенсивности ТГц излучения вплоть до температуры 120 К и спектр излучения на частоте около 3.3 ТГц, совпадающей с расчетным значением. Таким образом, продемонстрирован еще один полностью отечественный квантово-каскадный лазер терагерцового диапазона, но с существенно большей максимальной рабочей температурой.

Введение

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) являются компактными, высокоэффективными полупроводниковыми источниками излучения в среднем инфракрасном (ИК) и терагерцовом (ТГц) диапазонах частот. На сегодняшний день за счет разработки более совершенных зонных дизайнов ТГц ККЛ продемонстрирована генерация при термоэлектрическом охлаждении ($T_{\max} = 250$ К) [1], а также достигнут мульти-Ваттный уровень выходной мощности с охлаждением компактным электрическим криоохладителем, работающим по циклу Стирлинга [2]. Таким образом, разностороннее детальное исследование подобных структур с различными параметрами по-прежнему является актуальным.

В то же время в России работы по созданию ТГц ККЛ начались с 10–15-летней задержкой относительно работ зарубежных групп. Однако соавторами настоящей работы уже были представлены полностью российские (рост методом молекулярно-пучковой эпитаксии, постростовой процессинг) ТГц ККЛ [3,4], демонстрирующие конкурентоспособные характеристики по сравнению с аналогичными по дизайну зарубежными образцами. В данной работе мы представляем результаты исследований вольт-амперных и спектральных характеристик ТГц ККЛ, полностью изготовленного в России, с оригинальным дизайном активной области для работы при высоких температурах.

Эксперимент

Разработанный GaAs/AlGaAs дизайн структуры ТГц ККЛ был выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber Compact 21T. За основу был взят резонансно-фононный дизайн с каскадом на основе трех квантовых ям GaAs/AlGaAs, позволяющий получить лазерную генерацию вплоть до 215 К на частоте около 3.4 ТГц.

Исследования вольт-амперных (ВАХ) и излучательных характеристик полученных структур изготовленных ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом проводились в импульсном режиме (длительность импульса 0.5 мкс, частота повторения 100 Гц). Для питания структур использовался специально изготовленный электронный ключ, с выхода ключа импульсы напряжения до 30 В подавались на исследуемую структуру. При измерениях ВАХ и интегральных зависимостей излучения от тока сигналы, пропорциональные амплитуде импульсов напряжения, тока и сигнала с приемника подавались на двухканальный строб-интегратор Stanford Research Systems SR250.

Исследуемый образец размещался в вакууме на медном хладопроводе в гелиевом криостате замкнутого цикла, который позволял менять температуру лазера от 8 до 300 К. Для записи спектров излучения использовался фурье-спектрометр

BRUKER Vertex 80v, работающий в режиме пошагового сканирования, в качестве приемника излучения при этом использовался штатный кремниевый болометр.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены ВАХ и зависимости интенсивности интегрального излучения от тока для исследуемого ККЛ, измеренные при различных температурах. Видно, что лазерная генерация наблюдается вплоть до температуры 120 К, при этом пороговый ток составляет ~ 3.5 А.

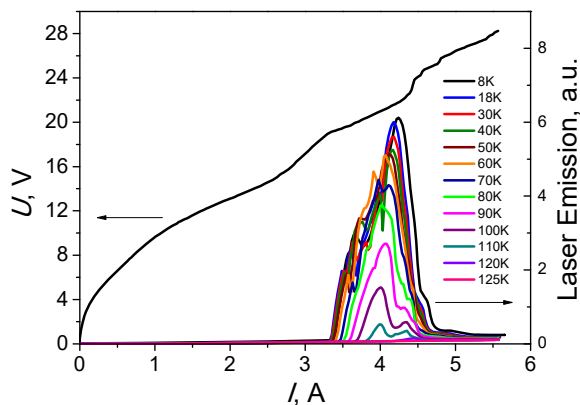


Рис. 1. ВАХ и зависимости интенсивности интегрального излучения от тока для ККЛ № 10-1 при различных температурах

На рис. 2 и 3 показаны спектры излучения исследуемого ККЛ, измеренные при различных температурах и токах смещения соответственно. На спектрах присутствуют от двух до четырех спектральных линий в диапазоне 3.2-3.8 ТГц.

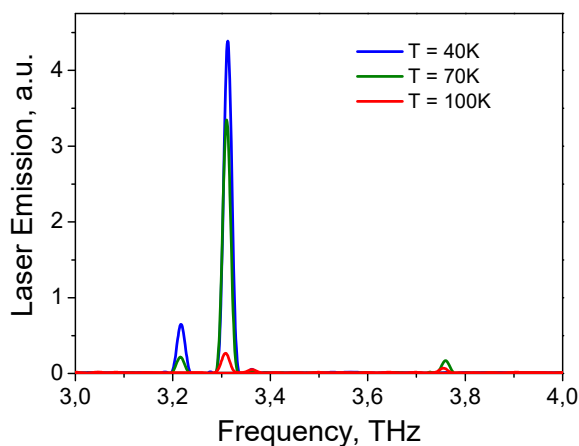


Рис. 2. Спектры излучения ККЛ № 10-3 при различных температурах ($I = 1.78$ А)

Видно, что с увеличением температуры амплитуда спектральных линий уменьшается, что связано с уменьшением инверсной населенности лазерных уровней при высоких температурах. При увеличении тока смещения происходит последовательное увеличение интенсивности высокочастотных мод и падение интенсивностей низкочастотных, что связано со смещением максимума усиления в высокочастотную область.

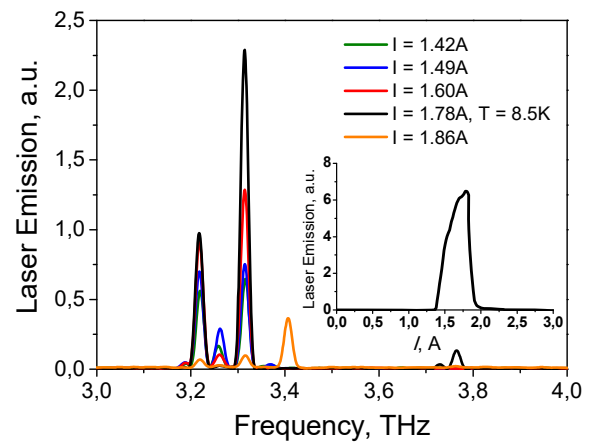


Рис. 3. Спектры излучения ККЛ № 10-3 при разных токах смещения на лазере ($T = 8.5$ К). На вставке - зависимость интегрального излучения ККЛ от тока смещения

В данной работе исследованы ВАХ, излучательные характеристики и спектры излучения ТГц ККЛ GaAs/AlGaAs с двойным металлическим волноводом. Наблюдался пороговый рост интенсивности излучения вплоть до температуры 120 К и спектр излучения на частоте, совпадающей с расчетным значением. Таким образом, наряду с [3,4] продемонстрирован еще один полностью отечественный ККЛ ТГц диапазона частот, но уже с существенно большей максимальной рабочей температурой.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-02-00363, а также в рамках Государственного задания НИЯУ МИФИ (проект № 0723-2020-0037) и Государственного задания ИСВЧПЭ РАН.

Литература

1. Khalatpour A. *et al.* // Nat. Photonics (2020) <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00707-5>.
2. Jin Y. *et al.* // Optica, **7**, 708 (2020).
3. Иконников А.В., Маремьянин К.В. и др. // Письма в ЖТФ, **43**, 86 (2017).
4. Цырлин Г.Э. и др. // ФТП, **54**, 902 (2020).