

Перестройка частоты излучения квантово-каскадного лазера среднего ИК диапазона

© В.И. Гавриленко¹, Д.И. Курицын¹, А.В. Антонов¹, К.А. Ковалевский¹, Р.Х. Жукавин¹,
В.В. Дюделев², Е.Д. Черотченко², А.В. Бабичев², А.В. Лютецкий²,
С.О. Слипченко², Н.А. Пихтин², А.Г. Гладышев³, И.И. Новиков^{3,4},
Л.Я. Карачинский^{3,4}, А.Ю. Егоров³, Г.С. Соколовский²

¹ Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603087 д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,

194021 Санкт-Петербург, Россия

³ ООО „Коннектор Оптик“,

194292 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет ИТМО,

197101 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: gavr@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 6 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 30 января 2025 г.

Принята к публикации 31 января 2024 г.

Методом фурье-спектроскопии измерены спектры излучения импульсного квантово-каскадного лазера диапазона 4.5 мкм и продемонстрирована перестройка длины волны излучения от 4.56 мкм (2233.9 см^{-1}) до 4.48 мкм (2192.5 см^{-1}) в широком интервале температур от 293 до 10 К.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, средний ИК диапазон, фурье-спектроскопия, перестройка частоты.

DOI: 10.61011/FTP.2025.01.60494.7301

1. Введение

Компактные квантово-каскадные лазеры (ККЛ) среднего инфракрасного (ИК) диапазона, работающие в окнах прозрачности атмосферы 3–5 и 8–12 мкм, востребованы для многих практических применений. Одной из важнейших характеристик таких лазеров является возможность перестройки частоты излучения. Простым и доступным способом перестройки частоты излучения ККЛ является изменение рабочей температуры прибора. В работе [1] нами была исследована перестройка частоты излучения ККЛ диапазона 7.7 мкм в широком интервале температур от комнатной до 10 К. В настоящей работе исследована перестройка при изменении температуры спектра излучения ККЛ среднего ИК диапазона с длиной волны излучения вблизи 4.5 мкм. Несмотря на 30-летнюю историю ККЛ этого диапазона, в литературе имеются лишь отрывочные сведения о температурных зависимостях частоты излучения таких приборов (см., например, [2–6]), а для коммерчески доступных лазеров такие зависимости приводятся для ограниченного интервала температур (см., например, [7]).

2. Методика эксперимента

Исследовался ККЛ среднего ИК диапазона, спроектированный из упругосбалансированной гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ) $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$

на подложке $\text{InP}(001)$, аналогичной описанной в работе [8]. Ширина лазерного полоска контакта составляла 20 мкм, длина — 3 мм. Зеркала лазеров формировались скалыванием. Монтаж кристалла на теплоотвод типа F-mount производился эпитаксиальной поверхностью вниз. Все исследования проводились в импульсном режиме при длительности импульсов 100 нс, методика измерений была аналогична описанной в работе [1]. Максимальная выходная мощность исследуемого ККЛ составляла ~ 1 Вт.

3. Обсуждение результатов

На рис. 1 показана зависимость порогового тока ККЛ от температуры. Видно, что его величина падает в 2.5 раза при понижении температуры до 100 К, что связано с уменьшением рассеяния на фононах, и далее не меняется.

На рис. 2 представлены спектры излучения лазера при температурах 293–10 К, полученные методом фурье-спектроскопии [1], а на рис. 3 — зависимость спектрального положения линий от температуры. Видно, что при понижении температуры спектр излучения ККЛ в целом смещается в коротковолновую область с „разрывом“ при 200 К, когда генерация наблюдается на двух разнесенных частотах 2203 и 2222 см^{-1} . Величина перестройки от 293 до 10 К превышает 40 см^{-1} . „Синий“ сдвиг (повышение частоты) генерации ККЛ при понижении

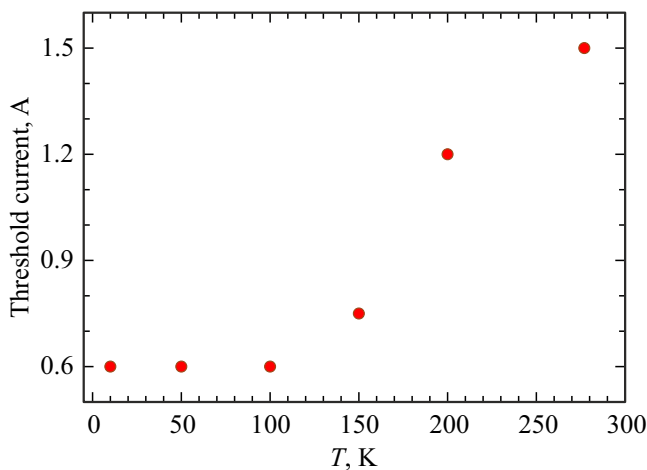


Рис. 1. Зависимость порогового тока ККЛ от температуры.

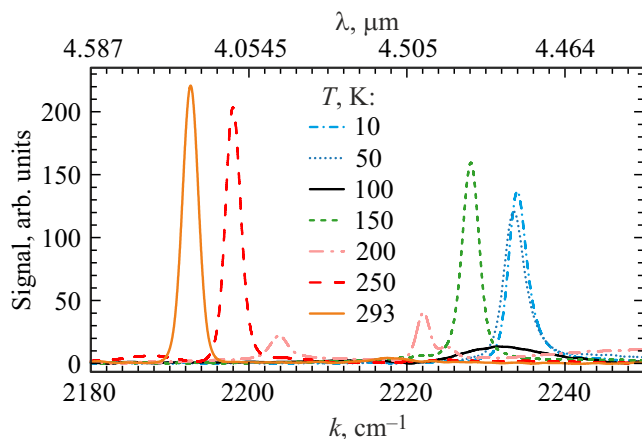


Рис. 2. Спектры излучения ККЛ при токе накачки 2 А при различных температурах.

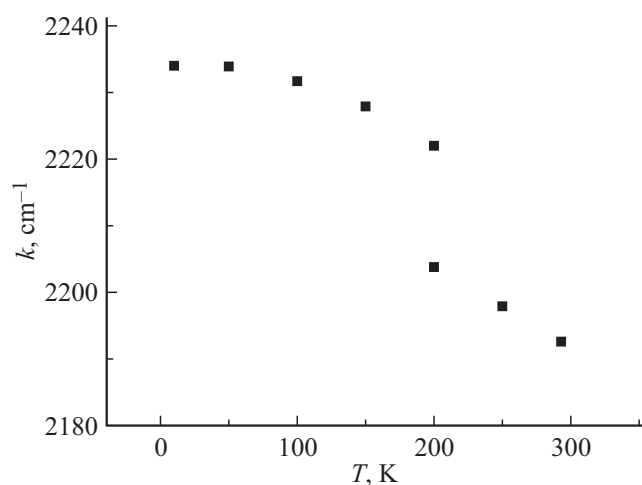


Рис. 3. Зависимость спектрального положения линии излучения ККЛ от температуры.

температуры является общим свойством для приборов, изготовленных на основе гетеропары InGaAs/InAlAs и работающих на пространственно-вертикальных (а не на диагональных между двумя разными КЯ) переходах [9]. Такая перестройка частоты наблюдалась в работе ККЛ диапазона 8 [1–3], 5.7 [7], 3.8 [6] и 3.4 мкм [5]. Наиболее подробные исследования были выполнены в работе [6], однако они были ограничены температурным интервалом 80–298 К. Механизм изменения частоты перехода нигде не обсуждался. Как и в работе [1], мы полагаем, что она связана с ростом высоты барьеров при понижении температуры. Точные расчеты затруднены в связи с большим количеством разнонаправленных факторов, особенно для случая напряженных и упругосбалансированных гетероструктур. Что касается обнаруженного в настоящей работе „перескока“ частоты излучения ККЛ при $T = 200$ К, то он, скорее всего, связан с близостью верхнего рабочего уровня лазера в КЯ и большим числом плотно расположенных уровней в сверхрешетке инжектора (см. рис. 1 в работе [8]), взаимное положение которых, очевидно, меняется с температурой, что и приводит при каком-то значении последней к двухчастотной генерации.

4. Заключение

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность перестройки частоты излучения ККЛ среднего диапазона, работающего в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм на величину $> 40 \text{ см}^{-1}$, за счет изменения рабочей температуры прибора от 293 до 10 К.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Национального центра физики и математики (проект „Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023–2025“). Создание и тестирование ККЛ в ФТИ им. А.Ф. Иоффе выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-30020).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Д.И. Курицын, А.В. Антонов, С.В. Морозов, В.А. Анфертьев, М.Б. Черняева, В.Л. Вакс, В.В. Дюделев, Д.А. Михайлов, Д.В. Чистяков, С.О. Слипенченко, А.В. Лютецкий, А.Г. Гладышев, А.В. Бабичев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров, Г.С. Соколовский, В.И. Гавриленко. Письма ЖТФ, **55** (5), 23 (2024).
- [2] P.Q. Liu, X. Wang, J.-Y. Fan, C.F. Gmachl. Appl. Phys. Lett., **98**, 061110 (2011).

- [3] C. Gmachl, A. Tredicucci, F. Capasso, A.L. Hutchinson, D.L. Sivco, J.N. Baillargeon, A.Y. Cho. Appl. Phys. Lett., **72**, 3130 (1998).
- [4] А.Ю. Егоров, А.В. Бабичев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Е.В. Никитина, М. Tchernycheva, А.Н. Софронов, Д.А. Фирсов, Л.Е. Воробьев, Н.А. Пихтин, И.С. Тарасов. ФТП, **49**, 1574 (2015).
- [5] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, A.L. Hutchinson, S-N.G. Chu, A.Y. Cho. Appl. Phys. Lett., **72**, 680 (1998).
- [6] J.S. Yu, A. Evans, S. Slivken, S. R. Darvish, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **88**, 251118 (2006).
- [7] <https://alpeslasers.ch/lasers-on-stock/lasersSTANew-ln2.html>
- [8] А.В. Бабичев, А.Г. Гладышев, В.В. Дюделев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Д.В. Денисов, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Г.С. Соколовский, А.Ю. Егоров. Письма ЖТФ, **46** (9), 35 (2020).
- [9] В.В. Мамутин, В.М. Устинов, J. Boettcher, H. Kuenzel. Письма ЖТФ, **34** (9), 34 (2010).

Редактор Г.А. Оганесян

Tuning the radiation frequency of a mid-IR quantum cascade laser

V.I. Gavrilenko¹, D.I. Kuritsyn¹, A.V. Antonov¹,
K.A. Kovalevskii¹, R.Kh. Zhukavin¹, V.V. Dudelev²,
E.D. Cherotchenko², A.V. Babichev², A.V. Lyuteskiy²,
S.O. Slipchenko², N.A. Pikhitin², A.G. Gladyshev³,
I.I. Novikov^{3,4}, L.Ya Karachinsky^{3,4},
A.Yu. Egorov³, G.S. Sokolovskii²

¹ Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603087 Afonino, Kstovskii region, Nizhny Novgorod
district, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

³ Connector Optics LLC,
194292 St. Petersburg, Russia

⁴ ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

Abstract The Fourier-transform spectroscopy method was used to measure the emission spectra of a pulsed quantum cascade laser in the $4.5\mu\text{m}$ range and to demonstrate the tuning of the emission wavelength from $4.56\mu\text{m}$ (2233.9 cm^{-1}) to $4.48\mu\text{m}$ (2192.5 cm^{-1}) in a wide temperature range from 293 to 10 K.