

03

Высокотемпературная лазерная генерация квантово-каскадных лазеров в спектральной области 8 μm

© В.В. Дюделев^{1,2}, С.Н. Лосев¹, В.Ю. Мыльников¹, А.В. Бабичев¹, Е.А. Когновицкая³, С.О. Слипченко¹, А.В. Лютецкий¹, Н.А. Пихтин¹, А.Г. Гладышев⁴, Л.Я. Карачинский^{2,4}, И.И. Новиков^{2,4}, А.Ю. Егоров², В.И. Кучинский¹, Г.С. Соколовский^{1,2,¶}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: gs@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 22 мая 2018 г.)

Представлены исследования характеристик квантово-каскадных лазеров с длиной волны генерации в области 8 μm при высоких температурах вплоть до +65°C. Определены характеристические температуры температурных зависимостей величины порогового тока и дифференциальной эффективности. Спектральные исследования показали наличие двух линий генерации коротковолновая $\sim 7800\text{ nm}$ и длинноволновая $\sim 8100\text{ nm}$. Наблюдаемая конкуренция между коротковолновой и длинноволновой линиями генерации приводит к немонотонному характеру зависимости интенсивности излучения от тока накачки.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61617X0074).

DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46672.141

Полупроводниковые квантово-каскадные лазеры (ККЛ), генерирующие излучение в среднем инфракрасном спектральном диапазоне, привлекают большое внимание в связи с уникальными возможностями их использования в различных областях науки и техники, в частности, для химического зондирования, ультрачувствительного обнаружения различных газов в атмосфере, в спектроскопии, в космической связи, для биомедицинских применений и др. [1,2]. С момента первой практической реализации ККЛ в 1994 г. [3] достигнут значительный прогресс в улучшении их оптических, электрических и мощностных характеристик, в расширении их спектрального диапазона [4–6].

Следует отметить, что практическое использование ККЛ во многом зависит от возможности их работы при комнатной и повышенных температурах, от величины излучаемой ими оптической мощности, возможности работы в непрерывном режиме генерации. Этим обусловлено значительное количество публикаций в последнее время, посвященных исследованиям и улучшению соответствующих характеристик ККЛ [7–10]. Важной проблемой на пути достижения этих целей, а именно, проблемой получения значительной выходной мощности при лазерной генерации ККЛ в непрерывном режиме при комнатной и повышенной температурах, является большое количество тепла, которое должно быть отведено от лазерного чипа для предотвращения перегрева его активной области. Следует помнить, что через чип ККЛ

в рабочем режиме протекает значительный ток (порядка единиц ампер) при большом падении напряжения на структуре (порядка десятков вольт). Поэтому дизайну структуры и чипа ККЛ в настоящее время уделяется значительное внимание разработчиков [9,10].

В настоящей работе представлено исследование характеристик квантово-каскадных лазеров (ККЛ), излучающих вблизи 8100 nm в температурном диапазоне от +15 до +65°C. Для изготовления гетероструктур ККЛ использовался метод молекулярно-пучковой эпитаксии. Эпитаксиальный рост гетероструктур был выполнен ООО „Коннектор Оптик“ на установке Ribet 49. Активная область ККЛ состояла из 50 каскадов, на основе слоев, согласованных по параметру решетки с подложкой InP, представляющих собой последовательность квантовых ям $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ и барьерных слоев $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$, со следующими толщинами в нанометрах: **2.4/2.4/2.6/2.1/2.6/1.8/2.7/1.6/2.9/1.7/3.1/2.5/4.4/1.2/5.2/1.2/5.3/1.0/1.7/4.3**, где полужирным шрифтом выделены толщины квантовых ям, а обычным шрифтом обозначены толщины барьерных слоев. Детальное описание гетероструктуры исследуемых ККЛ представлено в [11].

Исследования проводились на образцах ККЛ, которые изготавливались из гетероструктур после нанесения контактов. Площадь полученных лазерных чипов составила $\sim 0.5 \times 0.5\text{ mm}$. После выкалывания лазерные чипы напаивались на первичный теплоотвод. Для исследования температурных зависимостей характеристик

ККЛ, экспериментальные образцы устанавливались на медный теплоотвод с системой термостабилизации на основе элемента Пельтье. Контроль температуры осуществлялся термосопротивлением с известной кривой зависимости сопротивления от температуры.

Исследования характеристик ККЛ проводились в импульсном режиме с частотой следования импульсов 48 kHz. Длительность импульсов накачки на половине высоты составляла ~ 70 ns. Исследования температурных зависимостей характеристик ККЛ проводились в температурном диапазоне 288–338 К. Для исследования зависимости величины порогового тока от температуры, а также зависимости интенсивности излучения от амплитуды тока накачки проводилась регистрация осциллограмм импульсов света при помощи быстродействующего фотоприемника с предусилителем с полосой пропускания 1 GHz. Все исследованные образцы демонстрировали лазерную генерацию вплоть до +65°C (338 К). Типичные осциллограммы оптического сигнала

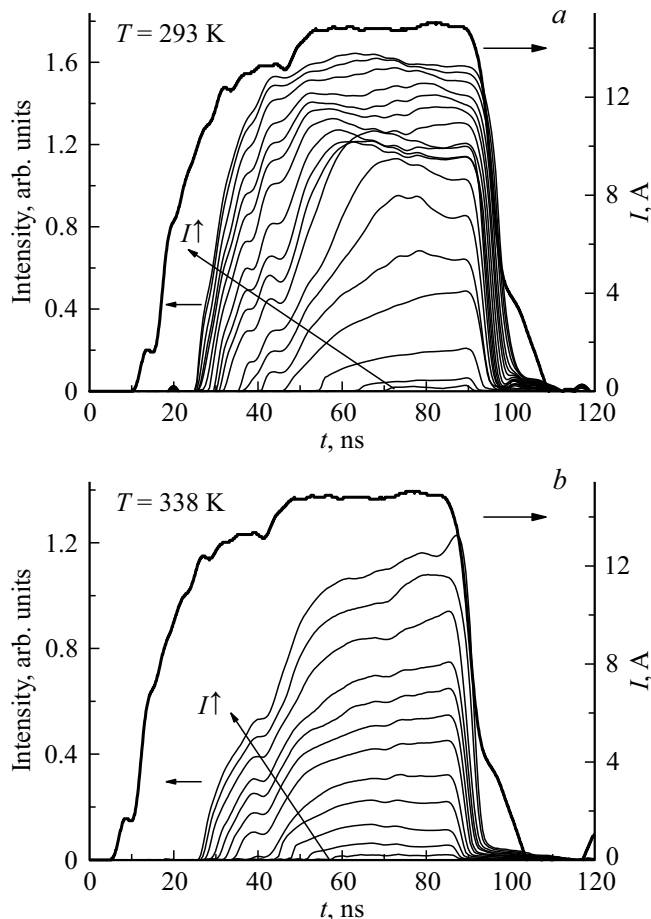


Рис. 1. Осциллограммы импульсов света для различных значений тока накачки: *a* — при температуре 293 К для значений тока 6.8 А, 7–15 А с интервалом 0.5 А. Самая высокая осциллограмма соответствует импульсу тока накачки с амплитудой 15 А; *b* — при температуре 338 К для значений тока 9.8 А, 10–15 А с интервалом 0.5 А. Самая высокая осциллограмма соответствует импульсу тока накачки с амплитудой 15 А.

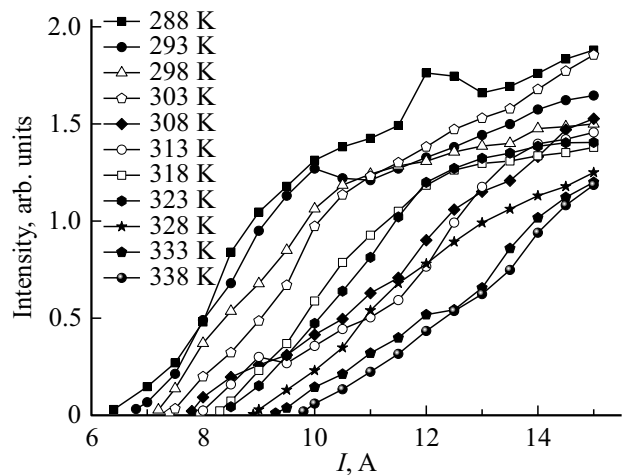


Рис. 2. Зависимости выходной пиковой интенсивности от амплитуды тока накачки для различных температур.

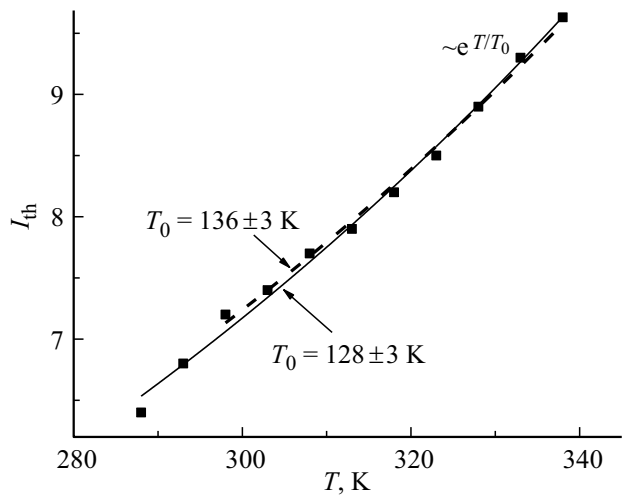


Рис. 3. Зависимость величины порогового тока ККЛ от температуры.

при различных амплитудах импульса тока накачки для температур 293 и 338 К приведены на рис. 1, *a* и 1, *b*. На этих рисунках приведен импульс тока накачки с амплитудой 15 А. Из полученных осциллограмм были получены зависимости пиковой интенсивности излучения от тока накачки для различных температур. Зависимости пиковой интенсивности ККЛ от тока накачки при различных температурах представлены на рис. 2. Проведенные исследования ватт-амперных характеристик позволили построить экспериментальную кривую зависимости порогового тока от температуры, представленную на рис. 3.

Хорошо известно, что зависимость порогового тока от температуры, в общем случае, является экспоненциальной: $I_{th} \sim \exp(T/T_0)$, где I_{th} — пороговый ток, T — температура лазера, а T_0 — характеристическая температура, определяющая скорость роста порогового тока с температурой. Анализ экспериментальной зависи-

мости порогового тока от температуры (рис. 3) показал, что в широком температурном диапазоне 298–338 К значение характеристической температуры составило $T_0 = 134 \pm 3$ К (для полного температурного диапазона 288–338 К, в котором проводились исследования, это значение несколько ниже $T_0 = 128 \pm 3$ К). Полученные результаты указывают на высокое совершенство гетероструктур созданных квантово-каскадных лазеров и сравнительно низкую скорость роста порогового тока при высоких температурах.

Помимо исследований зависимости порогового тока от температуры была изучена температурная зависимость дифференциальной эффективности (т.е. наклона зависимости пиковой интенсивности излучения от амплитуды импульса тока накачки). Результаты данных исследований представлены на рис. 4. Известно, что дифференциальная эффективность, в общем случае, зависит от температуры экспоненциально: $\eta_d \sim \exp(-T/T_1)$, где η_d — дифференциальная эффективность, T — температура лазера, T_1 — характеристическая температура, определяющая скорость уменьшения дифференциальной эффективности при увеличении температуры. Аппроксимация экспериментальной зависимости, приведенной на рис. 4, позволила определить характеристическую температуру: $T_1 = 54 \pm 5$ К.

Нами были так же проведены исследования спектральных характеристик ККЛ при различных температурах. Для регистрации спектров излучения ККЛ использовался монохроматор МДР-23 с дифракционной решеткой 75 nm^{-1} и оптической системой сбора и фокусировки излучения на основе линз из фторида бария. На выходной щели монохроматора был установлен тот же фотоприемник, что и при измерениях зависимостей интенсивности излучения от тока накачки. Фотоприемник был подключен к селективному вольтметру Unipan 232В. Применение синхронного детектирования позволяет существенно повысить чувствительность системы, хотя и усредняет сигнал по времени. На рис. 5 приведены типичные спектры излучения ККЛ для четырех различных температур исследуемого образца 288, 303, 318 и 338 К при токах накачки 10 А для 288 К, 12 А для 303 К и 13 А для 318 и 338 К. Ширина входной и выходной щели монохроматора составляла 0.2 мм, что обеспечивало спектральное разрешение 4.16 нм. В представленных спектрах видны две линии генерации: длинноволновая вблизи 8100 нм и коротковолновая вблизи 7800 нм для температур 288, 303 и 318 К. Интересно отметить, что при температурах 303 и 318 К интенсивность коротковолновой линии сравнима с интенсивностью длинноволновой линии. В то же время при 338 К генерация коротковолновой линии практически не выражена. Сопоставляя данные спектральных измерений с зависимостью интенсивности излучения ККЛ от тока накачки при различных температурах можно отметить, что при высоких температурах зависимость интенсивности излучения от тока накачки имеет более плавный характер, что по-видимому, связано с более поздним

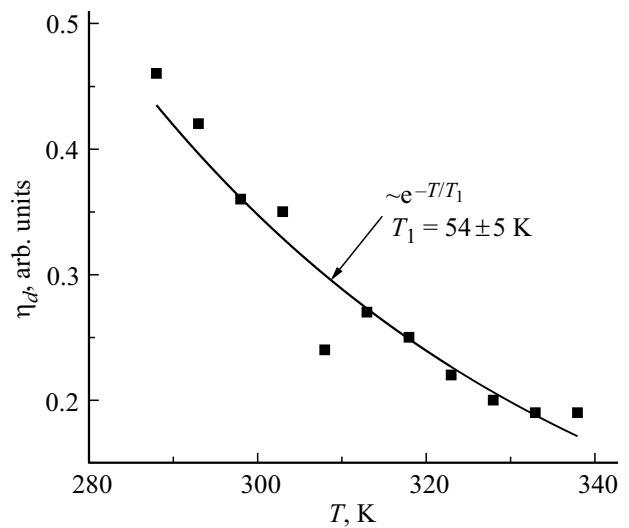


Рис. 4. Зависимость дифференциальной квантовой эффективности ККЛ от температуры.

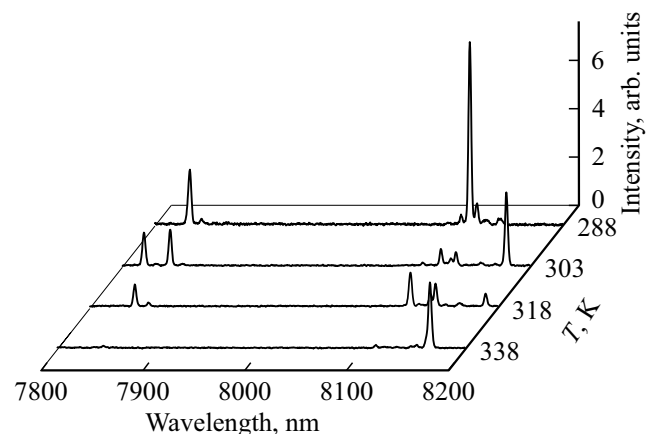


Рис. 5. Типичный спектр генерации ККЛ при различных температурах. Амплитуды токов накачки составляли: 10 А для 288 К, 12 А для 303 К и 13 А для 318 К и 338 К.

включением коротковолновой линии генерации, а увеличение наклона указывает на включение коротковолновой линии генерации. Неровный характер зависимостей интенсивности от тока накачки для интервала температур 303–318 К, по-видимому, связан с конкуренцией между длинноволновой и коротковолновой линиями генерации.

В исследуемой структуре ККЛ излучение фотона осуществлялось при прямом переходе инжектируемого электрона с верхнего уровня квантовой ямы на нижний. Затем при рассеянии на ЛО-фононе, происходил его переход на нижний уровень следующей квантовой ямы. Далее электрон релаксировал при помощи еще одного ЛО-фонона на нижний уровень следующей квантовой ямы, после чего выбрасывался в инжектор. Таким образом, в структуре ККЛ был реализован механизм двухфононного опустошения нижнего уровня [12]. При этом изменения в структуре ККЛ при приложении

напряжения, а также температурные сдвиги могут приводить к изменениям энергетической структуры каскада. Данное обстоятельство может влиять как на характер и эффективность рассеяния электронов, так и на механизм оптических переходов. Поэтому при лазерной генерации наравне с прямыми переходами между верхним и нижним уровнями первой квантовой ямы могут возникать и диагональные оптические переходы с верхнего уровня одной квантовой ямы на нижний уровень соседней, что, в свою очередь, может являться источником двухчастотной генерации, аналогично механизму, недавно предложенному для использования при разностной генерации терагерцового излучения [13]. Относительное изменение величины порогового тока для спектральных линий 7800 и 8100 nm от 288 до 388 K составило 58 и 50%, соответственно. Разность темпов роста пороговых токов этих спектральных линий можно объяснить меньшей глубиной уровня в квантовой яме для более коротковолнового перехода и, соответственно, большей вероятностью теплового выброса носителей заряда при повышении температуры.

Таким образом, в настоящей работе были проведены исследования ККЛ с длиной волны генерации в области $8\ \mu\text{m}$ при высоких температурах вплоть до 338 K ($+65^\circ\text{C}$). Определены характеристические температуры температурных зависимостей величины порогового тока и дифференциальной эффективности. Спектральные исследования показали, что конкуренция между коротковолновой и длинноволновой линиями генерации приводит к немонотонному характеру зависимости интенсивности излучения от тока накачки.

Список литературы

- [1] R.F. Curl, F. Capasso, C. Gmachl, A.A. Kosterev, B. McManus, R. Lewicki, H. Pusharsky, G. Wysocki, F. Tittel. *Chem. Phys. Lett.* **487**, 1–3, 1 (2010). DOI: 10.1016/j.cplett.2009.12.073
- [2] F. Capasso, C. Gmachl, R. Paiella, A. Tredicucci, A.L. Hutchinson, D.L. Sivco, J.N. Baillargeon, A.Y. Cho, H.C. Liu. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.* **6**, 6, 931 (2000). DOI: 10.1109/2944.902142.
- [3] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho. *Science* **264**, 5158, 553 (1994). DOI: 10.1126/science.264.5158.553.
- [4] S. Slivken, A. Evans, J. David, M. Razeghi. *Appl. Phys. Lett.* **81**, 23, 4321 (2002). DOI: 10.1063/1.1526462.
- [5] C. Faugeras, S. Forget, E. Boer-Duchemin, H. Page, J.-Y. Bengloan, O. Parillaud, M. Calligaro, C. Sirtori. *IEEE J. Quant. Electron.* **41**, 12, 1430 (2005). DOI: 10.1109/JQE.2005.858797.
- [6] J.S. Yu, S. Slivken, M. Razeghi. *Semicond. Sci. Technol.* **25**, 125015 (2010). DOI: 10.1088/0268-1242/25/12/125015.
- [7] J.S. Yu, S. Slivken, A. Evans, M. Razeghi. *Appl. Phys. A* **93**, 405 (2008). DOI: 10.1007/s00339-008-4783-9.
- [8] J.C. Zhang, F.Q. Liu, L.J. Wang, S.Q. Zhai, D.Y. Yao, J.Q. Liu, Z.G. Wang. *Physica E* **48**, 42–45 (2013). DOI: 10.1016/j.physe.2012.11.014.
- [9] J.D. Rirch, C.-C. Chang, C. Boile, L.J. Mawst, D. Lindberg, T. Earles, D. Botez. *Appl. Phys. Lett.* **106**, 12, 151106 (2015). DOI: 10.1063/1.4917499.
- [10] S.M.S. Rassel, L. Li, Y. Li, R.Q. Yang, J.A. Gupta, X. Wu, G.C. Aers. *Opt. Eng.* **57**, 1, 011021 (2018). DOI: 10.1117/1.QE.57.1.011021.
- [11] A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, A.V. Filimonov, V.N. Nevedomskii, A.S. Kurochkin, E.S. Kolodeznyi, G.S. Sokolovskii, V.E. Bugrov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A. Bousseksou, A.Yu. Egorov. *Tech. Phys. Lett.* **43**, 7, 666 (2017). DOI:10.1134/S1063785017070173.
- [12] G. Xu, V. Moreau, Y. Chassagneux, A. Bousseksou, R. Colombelli, G. Patriarche, G. Beaudoin, I. Sagnes. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 221101 (2009). DOI: 10.1063/1.3143652.
- [13] K. Fujita, M. Hitaka, A. Ito, T. Edamura, M. Yamanishi, S. Jung, M.A. Belkin. *Appl. Phys. Lett.* **106**, 251104 (2015). DOI: 10.1063/1.4923203.

Редактор К.В. Емцев