

08.3

Генерация частотных гребенок квантово-каскадными лазерами спектрального диапазона $8\ \mu\text{m}$

© В.В. Дюделев¹, Д.А. Михайлов², А.В. Бабичев¹, С.Н. Лосев¹, Д.В. Чистяков³, Е.А. Когновицкая^{1,2}, Д.Д. Авров², С.О. Слипченко¹, А.В. Лютецкий¹, Н.А. Пихтин¹, А.Г. Гладышев⁴, Л.Я. Карачинский^{3,4}, И.И. Новиков^{3,4}, В.И. Кучинский¹, А.Ю. Егоров³, Г.С. Соколовский^{1,¶}

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

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия

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

¶ E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 июня 2019 г.

В окончательной редакции 5 июня 2019 г.

Принято к публикации 1 июля 2019 г.

Представлены результаты исследований генерации частотных гребенок квантово-каскадными лазерами спектрального диапазона $8\ \mu\text{m}$. Проведенные исследования показали наличие режима самопульсаций вблизи порога лазерной генерации. Дальнейшее увеличение токовой накачки приводило к резкому уширению спектра генерации, что позволило получить частотные гребенки со спектральной шириной более 1.5 ТГц. Такое поведение исследуемых лазеров может быть объяснено наличием поглощения вдоль полоскового гребня за счет проникновения волноводной моды в непрокачиваемые области.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, частотная гребенка, модуляция добротности, синхронизация мод.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.20.48387.17905

Спектральная область среднего инфракрасного диапазона вблизи $8\ \mu\text{m}$ является крайне привлекательной ввиду наличия в ней как линий поглощения многих химических веществ, так и второго окна прозрачности атмосферы ($8\text{--}12\ \mu\text{m}$). В связи с этим разработка квантово-каскадных лазеров (ККЛ), излучающих вблизи $8\ \mu\text{m}$, является актуальной задачей, имеющей множество практических приложений, в числе которых можно выделить газоанализ, мониторинг состояния окружающей среды, неразрушающий дистанционный контроль, а также беспроводную оптическую связь.

Решение этих и многих других задач связано в том числе с применением частотных гребенок, состоящих из эквидистантных по частоте спектральных линий. Получение и использование частотных гребенок для уточнения резонансных частот переходов в атомах и прецизионной спектроскопии [1,2] были отмечены Нобелевской премией по физике 2005 г. Более того, ведутся активные исследования по получению частотных гребенок от ККЛ [3–5], что открывает новые возможности в спектроскопии, позволяя проводить быструю диагностику в широком спектральном диапазоне. Основным подходом для получения частотных гребенок является синхронизация мод в ККЛ [5–7]. Хотя часто режим синхронизации мод получается в ККЛ самопроизвольно, природа этого явления не до конца изучена [8,9]. Для устойчивой генерации частотных гребенок в ККЛ наиболее часто используют метод активной синхронизации мод, что требует сложной постростовой обработки кри-

сталла, а также системы токовой накачки, содержащей в себе высокочастотную составляющую с малой глубиной модуляции. Альтернативным подходом является включение дополнительных поглощающих слоев в активную область ККЛ [10].

В настоящей работе представлены результаты исследования генерации частотных гребенок ККЛ, излучающими вблизи $8\ \mu\text{m}$. ККЛ были изготовлены на основе гетероструктуры с активной областью с 50 квантовыми каскадами, состоящими из чередования квантовых ям $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ и барьеров $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$, согласованных по параметру решетки с подложкой InP . Подробное описание используемой гетероструктуры опубликовано ранее [11]. На основе данной гетероструктуры получены ККЛ, генерирующие излучение в спектральной области $8\ \mu\text{m}$ при комнатной температуре [12,13], а также показана генерация при повышенных температурах вплоть до 65°C [14,15].

Наблюдаемая в ККЛ, изготовленных на основе данной гетероструктуры, двухчастотная генерация [13,15] демонстрирует широкий спектр усиления [16], что является необходимым условием для генерации частотных гребенок.

Межа кристалла ККЛ формировалась жидкостным травлением. Ширина полоска вблизи поверхности составляла $17\ \mu\text{m}$. Использована геометрия мелкой мезы (протрав слоев верхней обкладки волновода без затрава в активную область). Токовая накачка осуществлялась через окно, открытое в слое диэлектрика на поверхности

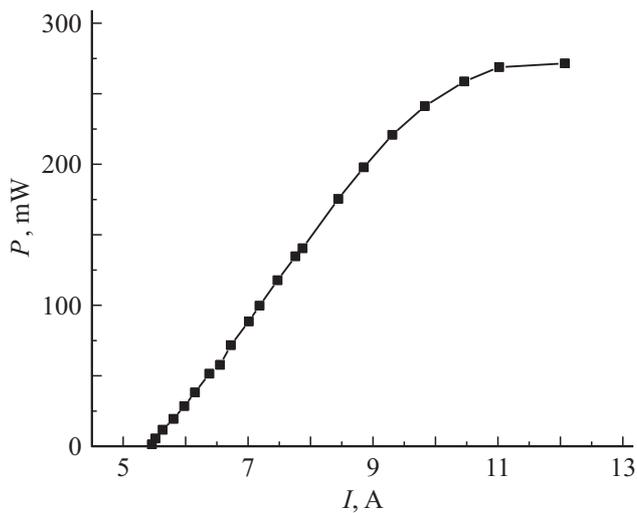


Рис. 1. Типичная ватт-амперная характеристика ККЛ, генерирующего частотные гребенки (сбор излучения производился с одного торца ККЛ).

мезы. Кристаллы ККЛ монтировались подложкой на первичный теплоотвод. Длина исследуемых образцов ККЛ составляла ~ 1 mm. Исследования характеристик ККЛ проводились в импульсном режиме токовой накачки [12]. Пороговые токи ККЛ составили ~ 5 А. Типичная ватт-амперная характеристика приведена на рис. 1. Пиковая выходная импульсная мощность превышала 250 mW при комнатной температуре. Исследования динамических характеристик ККЛ показали наличие самопульсаций вблизи порога генерации. На рис. 2, *a* приведена осциллограмма импульса фотоответа ККЛ для тока накачки 5.7 А, на которой хорошо видны пики самопульсаций в импульсе фотоответа. Проведенные исследования радиочастотного спектра показали наличие пика на частоте вблизи 500 МГц. Типичный радиочастотный спектр приведен на рис. 2, *b*. Наиболее интенсивный пик соответствует частоте самопульсаций, менее интенсивные пики — его гармоникам. Наблюдаемые самопульсации имеют очень низкую частоту и не соответствуют частоте наблюдаемому явлению самопроизвольной синхронизации мод [8,9,17]. По-видимому, данный механизм самопульсаций связан с возникновением в исследуемых образцах режима модуляции добротности, ранее малоосвещенного в литературе по ККЛ. Возникновение режима модуляции добротности возможно при наличии насыщающегося поглотителя. В исследуемых образцах таким насыщающимся поглотителем являются области лазерного кристалла, расположенные сбоку от накачиваемого током полоска. В данном случае формирование мезы кристалла ККЛ проводилось без затравки в активную область. Вследствие этого лазерный волновод в латеральной плоскости имеет малый контраст показателя преломления, что приводит к существенному проникновению поперечной лазерной моды в боковые области, в которых происходит поглощение. Хотя по

оценкам [18,19] внутризонное поглощение в непрокачиваемых областях не превышает нескольких cm^{-1} , так как в данном случае поглотитель распределен вдоль всей длины лазера, результирующее поглощение оказывается достаточным, чтобы сформировать область насыщающегося поглотителя, приводящего к возникновению режима модуляции добротности. При повышении уровня токовой накачки выше 6.1 А амплитуда самопульсаций лазера резко уменьшается, достаточно ярко выражено (20–30% от амплитуды) несколько первых пиков, тогда как остальные едва заметны на фоне импульса. При этом в радиочастотном спектре ККЛ наблюдается уширение и уменьшение амплитуды пика, соответствующего режиму модуляции добротности.

Проведенные измерения оптических спектров показали, что спектр ККЛ вблизи порога генерации имеет тенденцию к расширению с увеличением тока накачки. Однако, как видно из спектров, приведенных на рис. 3, резкое уширение спектра происходит сразу после выключения самопульсаций, связанных, по нашему мнению, с модуляцией добротности. Так, при токе накачки 5.8 А

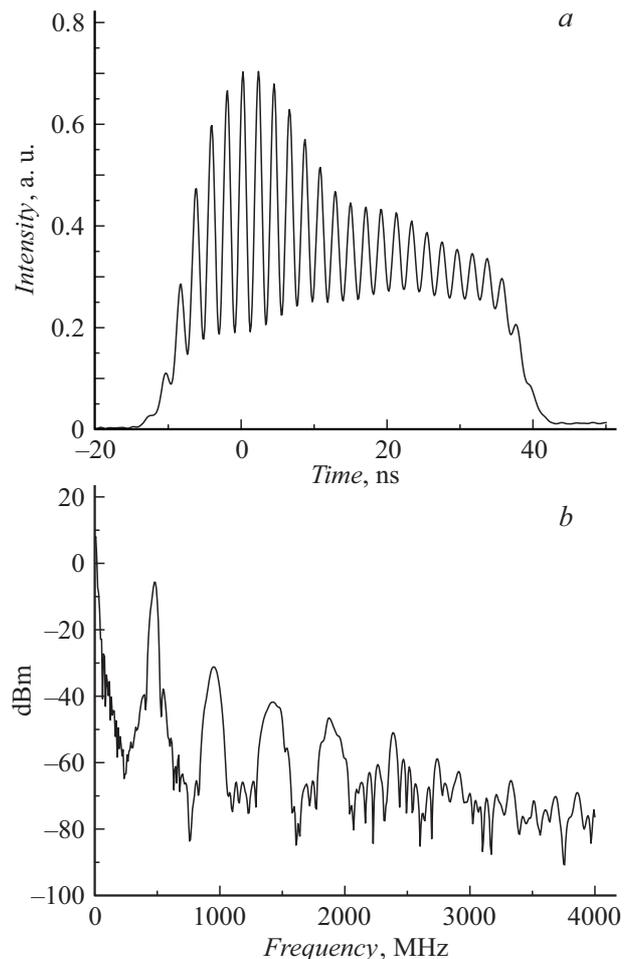


Рис. 2. *a* — осциллограмма импульса фотоответа ККЛ, работающего в режиме модуляции добротности, при токе накачки 5.7 А; *b* — радиочастотный спектр ККЛ при токе накачки 5.7 А.

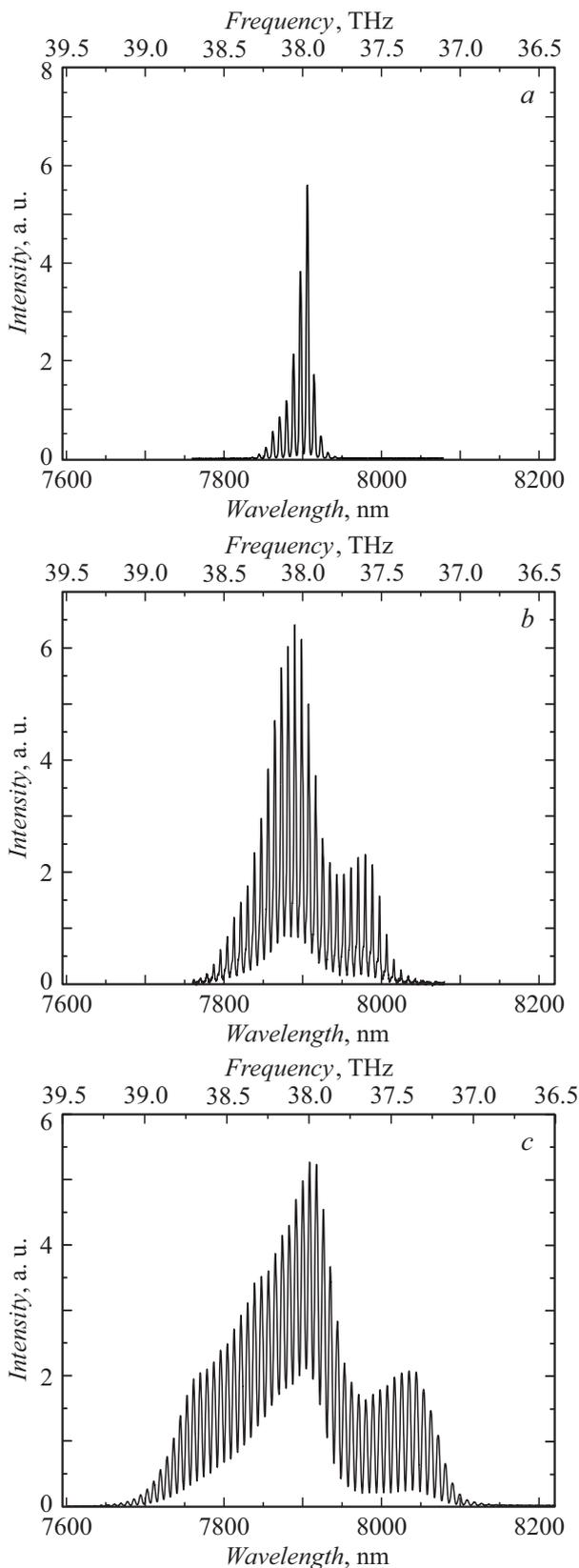


Рис. 3. Спектры генерации ККЛ, демонстрирующие частотные гребенки: *a* — при токе накачки 5.8 А в режиме модуляции добротности, *b* и *c* — после прекращения самопульсаций при токе накачки 7 и 9 А соответственно.

количество продольных мод, участвующих в генерации, ~ 10 , тогда как при токе 7 А их общее количество превышает 30, а при токе 9 А мод, участвующих в генерации, становится более 40. Такое поведение спектра указывает на включение другого механизма самопульсаций после выключения режима модуляции добротности. Резкое уширение диапазона и узость спектральных линий спектра генерации ККЛ позволяют говорить о получении частотных гребенок. Частотные гребенки, по-видимому, указывают на переключение ККЛ из режима модуляции добротности в режим синхронизации мод. Максимальная спектральная ширина полученной частотной гребенки составляла около 400 нм при токе 9 А, что соответствует ~ 2 THz (рис. 3, *c*).

Таким образом, показано, что использование геометрии мелкой мезы позволяет создавать распределенный насыщающийся поглотитель в ККЛ, что приводит к модуляции добротности вблизи порога генерации. Применение такого распределенного насыщающего поглотителя открывает пути для генерации широких частотных гребенок без усложнения конструкции ККЛ.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61617X0074).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Reichert J., Niering M., Holzwarth R., Weitz M., Udem Th., Hänsch T.W. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. N 15. P. 3232–3235. DOI: 10.1103/physrevlett.84.3232
- [2] Holzwarth R., Udem Th., Hänsch T.W., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. N 11. P. 2264–2267. DOI: 10.1103/physrevlett.85.2264
- [3] Hillbrand J., Jouy P., Beck M., Faist J. // *Opt. Lett.* 2018. V. 43. N 11. P. 1746–1749. DOI: 10.1364/OL.43.001746
- [4] Faist J., Villares G., Scalfari G., Rösch M., Bonzon C., Hugli A., Beck M. // *Nanophotonics*. 2016. V. 5. N 2. P. 272–291. DOI: 10.1515/nanoph-2016-0015
- [5] Hillbrand J., Andrews A.M., Detz H., Strasser G., Schwarz B. // *Nature Photon.* 2019. V. 13. N 2. P. 101–104. DOI: 10.1038/s41566-018-0320-3
- [6] Capasso F., Gmachl C., Paiella R., Tredicucci A., Hutchinson A.L., Sivco D.L., Baillargeon J.N., Cho A.Y., Liu H.C. // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* 2000. V. 6. N 6. P. 931–947. DOI: 10.1109/2944.902142
- [7] Wang C.Y., Kuznetsova L., Gkortsas V.M., Diehl L., Kärtner F.X., Belkin M.A., Belyanin A., Li X., Ham D., Schneider H., Grant P., Song C.Y., Haffouz S., Wasilewski Z.R., Liu H.C., Capasso F. // *Opt. Express*. 2009. V. 17. N 15. P. 12929–12943. DOI: 10.1364/oe.17.012929

- [8] Gordon A., Wang C.Y., Diehl L., Kärtner F.X., Belyanin A., Bour D., Corzine S., Häfner G., Liu H.C., Schneider H., Maier T., Troccoli M., Faist J., Capasso F. // *Phys. Rev. A*. 2008. V. 77. N 5. P. 053804. DOI: 10.1103/PhysRevA.77.053804
- [9] Bai J., Citrin D.S. // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 106. N 3. P. 031101. DOI: 10.1063/1.3180960
- [10] Talukder M.A., Menyuk C.R. // *Opt. Express*. 2010. V. 18. N 6. P. 5639–5653. DOI: 10.1364/oe.18.005639
- [11] Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Филимонов А.В., Неведомский В.Н., Курочкин А.С., Колодезный Е.С., Соколовский Г.С., Бугров В.Е., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Bousseksou A., Egorov A.Yu. // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43. В. 14. С. 64–71. DOI: 10.21883/PJTF.2017.14.44833.16776 [Babichev A.V., Gladyshev A.G., Filimonov A.V., Nevedomskii V.N., Kurochkin A.S., Kolodeznyi E.S., Sokolovskii G.S., Bugrov V.E., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Bousseksou A., Egorov A.Yu. // *Tech. Phys. Lett.* 2017. V. 43. N 7. P. 666–669. DOI: 10.1134/S1063785017070173].
- [12] Дуделев В.В., Лосев С.Н., Мьльников В.Ю., Бабичев А.В., Когновицкая Е.А., Слипченко С.О., Лотецкий А.В., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Егоров А.Ю., Кучинский В.И., Соколовский Г.С. // *ЖТФ*. 2018. Т. 88. В. 11. С. 1708–1710. DOI: 10.21883/JTF.2018.11.46634.179-18 [Dudelev V.V., Losev S.N., Myl'nikov V.Yu., Babichev A.V., Kognovitskaya E.A., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Pikhitin N.A., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Egorov A.Yu., Kuchinskii V.I., Sokolovskii G.S. // *Tech. Phys.* 2018. V. 63. N 11. P. 1656–1658. DOI: 10.1134/S1063784218110087].
- [13] Дуделев В.В., Лосев С.Н., Мьльников В.Ю., Бабичев А.В., Когновицкая Е.А., Слипченко С.О., Лотецкий А.В., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Егоров А.Ю., Кучинский В.И., Соколовский Г.С. // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125. В. 3. С. 387–390. DOI: 10.21883/PJTF.2019.20.48387.17905 [Dudelev V.V., Losev S.N., Myl'nikov V.Yu., Babichev A.V., Kognovitskaya E.A., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Pikhitin N.A., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Egorov A.Yu., Kuchinskii V.I., Sokolovskii G.S. // *Opt. and Spectroscopy*. 2018. V. 125. N 3. P. 402–404. DOI: 10.1134/S0030400X18090096].
- [14] Дуделев В.В., Лосев С.Н., Мьльников В.Ю., Бабичев А.В., Когновицкая Е.А., Слипченко С.О., Лотецкий А.В., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Егоров А.Ю., Кучинский В.И., Соколовский Г.С. // *ФТТ*. 2018. Т. 60. В. 11. С. 2251–2254. DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46672.141. [Dudelev V.V., Losev S.N., Myl'nikov V.Yu., Babichev A.V., Kognovitskaya E.A., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Pikhitin N.A., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Egorov A.Yu., Kuchinskii V.I., Sokolovskii G.S. // *Phys. Solid State*. 2018. V. 60. N 11. P. 2291–2294. DOI: 10.1134/S1063783418110057].
- [15] Dudelev V.V., Losev S.N., Myl'nikov V.Yu., Babichev A.V., Kognovitskaya E.A., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Pikhitin N.A., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Egorov A.Yu., Kuchinskii V.I., Sokolovskii G.S. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1135. P. 012073. DOI: 10.1088/1742-6596/1135/1/012073
- [16] Babichev A.V., Gladyshev A.G., Kolodeznyi E.S., Kurochkin A.S., Sokolovskii G.S., Bougrov V.E., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Dudelev V.V., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Sofronov A.N., Firsov D.A., Vorobjev L.E., Pikhitin N.A., Egorov A.Y. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1124. P. 041029. DOI: 10.1088/1742-6596/1124/4/041029
- [17] Vuković N.N., Radovanović J., Milanović V., Boiko D.L. // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* 2017. V. 23. N 6. P. 1200616. DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2699139
- [18] Dikmelik Y., Khurgin J.B., Escarra M.D., Liu P.Q., Hoffman A.J., Franz K.J., Gmachl C.F., Fan J., Wang X. // *Conf. on Lasers and Electro-Optics and Conf. on Quantum Electronics and Laser Science*. Baltimore, MD, USA, 2009. P. JTuD23. DOI: 10.1364/CLEO.2009.JTuD23
- [19] Lyakh A., Maulini R., Tsekoun A., Go R., Patel C.K.N. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. N 21. P. 211108. DOI: 10.1063/1.2937207