

05

## Двухчастотная генерация в квантово-каскадных лазерах спектрального диапазона $8\ \mu\text{m}$

© В.В. Дюделев<sup>1,2</sup>, С.Н. Лосев<sup>1</sup>, В.Ю. Мыльников<sup>1</sup>, А.В. Бабичев<sup>1</sup>, Е.А. Когновицкая<sup>3</sup>, С.О. Слипченко<sup>1</sup>, А.В. Лютецкий<sup>1</sup>, Н.А. Пихтин<sup>1</sup>, А.Г. Гладышев<sup>4</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>2,4</sup>, И.И. Новиков<sup>2,4</sup>, А.Ю. Егоров<sup>2</sup>, В.И. Кучинский<sup>1</sup>, Г.С. Соколовский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197022 Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> „Коннектор Оптикс“,  
194292 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: gs@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 31.05.2018 г.

Представлены исследования квантово-каскадных лазеров спектрального диапазона  $8\ \mu\text{m}$ , генерирующих двухчастотное излучение при комнатной температуре. Проведенные исследования спектров генерации позволили изучить зависимости интенсивности излучения для двух спектральных линий, которые показали наличие насыщения и затухания длинноволновой линии и линейный рост интенсивности коротковолновой линии генерации. На основе анализа полученных данных предложен механизм двухчастотной генерации в исследуемых образцах ККЛ.

DOI: 10.21883/OS.2018.09.46556.147-18

Эффективная генерация терагерцового излучения в частотном диапазоне от нескольких сотен гигагерц до нескольких терагерц ( $0.3\text{--}10\ \text{THz}$ ) находится в фокусе исследований уже более 20 последних лет. Терагерцовый диапазон очень важен для многих применений, среди которых следует отметить химическое и биологическое зондирование, спектроскопию, астрофизику и др. [1,2]. Для этого используется важное преимущество излучения терагерцового диапазона — проникать сквозь мелкодисперсные безводные среды (пластмассы, бумагу, текстиль, дерево и др.), поскольку для него резко понижается уровень релеевского рассеяния. При этом терагерцовое излучение безвредно для человека, что позволяет применять его для медицинской диагностики, в современных системах безопасности, экологического мониторинга, для контроля качества медикаментов и продуктов питания, высокоскоростной связи.

Для генерации терагерцового излучения при комнатной температуре привлекательными являются методы, основанные на использовании лазеров инфракрасного диапазона. В частности, хорошо известно использование накачки ультракороткими лазерными импульсами узкого промежутка между нанесенными на поверхность полупроводника электродами, соединенными с излучающей терагерцовое излучение антенной [3]. Но наиболее привлекательным в последнее время является использование квантово-каскадных лазеров (ККЛ) для получения терагерцового излучения в режиме генерации разностной частоты. В частности, в [4–6] сообщается о создании двухчастотных квантово-каскадных лазеров и

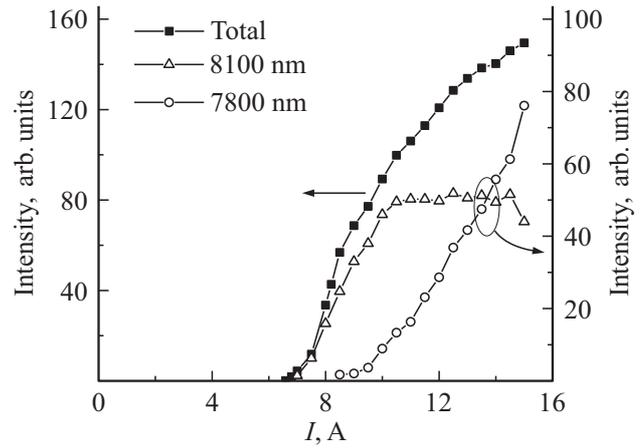
о получении с их помощью терагерцового излучения в частотном диапазоне  $2\text{--}4\ \text{THz}$  за счет генерации разностной частоты.

В настоящей работе проведено исследование двухполосной генерации при комнатной температуре в ККЛ спектрального диапазона  $8\ \mu\text{m}$ . Экспериментальные гетероструктуры ККЛ были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber 49 в ООО „Коннектор Оптикс“. Гетероструктуры выращивались на *n*-легированных подложках InP. Активная область ККЛ состояла из пятидесяти каскадов на основе чередования квантовых ям  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  и барьеров  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  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 жирным шрифтом выделены толщины квантовых ям, а обычным шрифтом обозначены толщины барьерных слоев. Все слои активной области согласованы по составу с подложкой InP. Детальное описание гетероструктуры исследуемых ККЛ представлено в [7]. Выбранная структура каскада рассчитана для генерации в спектральной области вблизи  $8\ \mu\text{m}$ . Релаксация электрона после испускания фотона в данной структуре обеспечивается по схеме с двухфононным опустошением уровня [8], при которой после испускания фотона электрон релаксирует в следующую квантовую яму каскада с испусканием LO фонона. Затем, еще раз испуская LO фонон, электрон переходит в квантовую яму, находящуюся непосредственно перед инжектором, после чего выбрасывается в инжектор. Данный механизм обеспечивает быстрое опустошение нижнего уровня

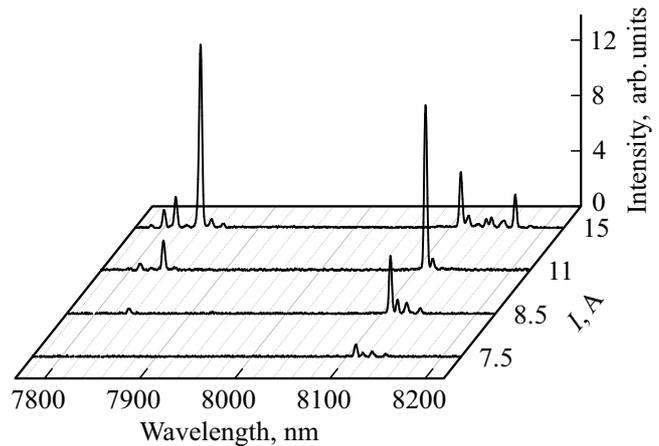
квантовой ямы, в которой происходит оптический переход, и поддерживает инверсию населенности. Однако необходимым условием его успешной работы является соблюдение величины энергетического зазора между уровнями близлежащих квантовых ям, близкой к энергии ЛО фонона, составляющей  $\sim 34$  meV [6] для исследуемой структуры.

Экспериментальные образцы ККЛ с площадью  $\sim 0.5 \times 0.5$  mm<sup>2</sup> выкалывались из гетероструктуры после нанесения металлических контактов. Исследования проводились при накачке образцов импульсами тока с частотой следования 48 kHz и длительностью на половине от максимальной амплитуды  $\sim 70$  ns. Исследования проводились при стабилизации температуры образца на уровне 16°C. Максимальная амплитуда тока накачки составила 15 А.

Пороговая плотность тока исследуемых образцов составила  $\sim 2.4$  kA/cm<sup>2</sup>, что соответствовало пороговым токам накачки  $\sim 6.5$  А. Исследования зависимости интенсивности излучения ККЛ от тока накачки показали, что на ватт-амперной характеристике присутствуют три участка с разными наклонами (рис. 1, заполненные квадраты, левая вертикальная ось), однако во всем диапазоне токов накачки не наблюдалось полного насыщения и снижения интенсивности. Нами были проведены спектральные измерения в диапазоне токов от порогового значения до 15 А. Спектральные измерения проводились при помощи монохроматора МДР-23 с дифракционной решеткой 75 mm<sup>-1</sup>. Спектры регистрировались при помощи охлаждаемого фотоприемника со спектральной полосой чувствительности 3.5–10.6  $\mu$ m. Для регистрации использовалась техника синхронного детектирования, что обеспечивало высокий уровень чувствительности системы регистрации. Результаты спектральных измерений представлены на рис. 2, где показаны спектры для значений амплитуды импульсов тока накачки 7.5, 8.5, 11 и 15 А соответственно. При достижении порогового значения тока происходит включение лазерной генерации на длине волны  $\sim 8100$  nm. Однополосная генерация наблюдается вплоть до значения токовой амплитуды 8.2 А, после достижения которой в спектре ККЛ появляется вторая (коротковолновая) линия генерации  $\sim 7800$  nm. Для того, чтобы определить, как изменяется интенсивность спектральных линий генерации с ростом амплитуды тока накачки, нами были математически проинтегрированы спектры генерации для каждой спектральной линии по отдельности. На основании полученных данных были построены зависимости интенсивности от тока накачки для спектральных линий 8100 и 7800 nm, приведенные на рис. 1 (пустые символы, правая вертикальная ось). После включения второй линии генерации наблюдается монотонный рост интенсивности обеих линий генерации вплоть до величины тока накачки 10.5 А, после которой наблюдается насыщение интенсивности длинноволнового излучения. При этом интенсивность коротковолновой линии гене-



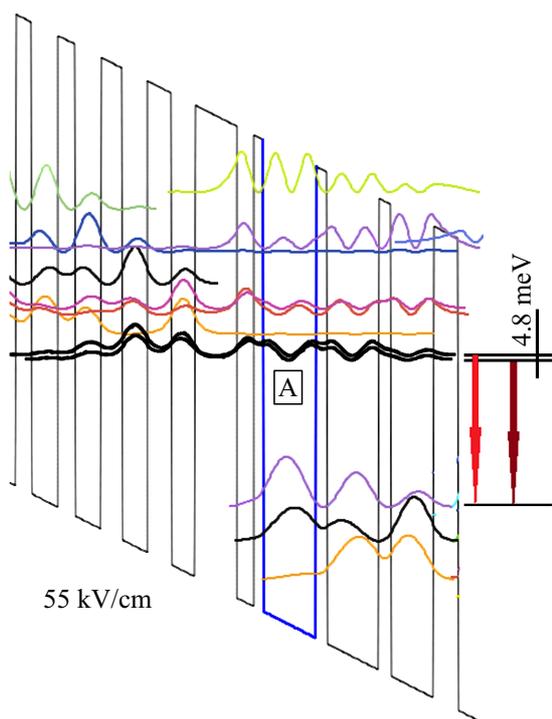
**Рис. 1.** Зависимости интенсивности излучения ККЛ от тока накачки. Заполненные квадраты (правая вертикальная ось) — измеренная зависимость интенсивности излучения ККЛ от амплитуды тока накачки. Пустые треугольники и круги (левая вертикальная ось) — зависимости интенсивности излучения ККЛ от тока накачки на линиях генерации  $\sim 8100$  и  $\sim 7800$  nm соответственно.



**Рис. 2.** Спектры генерации ККЛ для амплитуд токов накачки 7.5, 8.5, 11, 15 А.

рации продолжает увеличиваться без насыщения во всем доступном диапазоне амплитуд токов накачки.

Наиболее часто двухчастотную генерацию наблюдают в ККЛ, сконструированных для генерации разностной гармоники в терагерцовом спектральном диапазоне [4–6]. Типичным подходом в таких лазерах является совмещение в одном ККЛ двух типов квантовых каскадов для получения генерации на двух частотах [4,5]. В отличие от указанных работ используемая для изготовления наших экспериментальных образцов ККЛ гетероструктура состояла из квантовых каскадов одного типа. Совершенство и идентичность каскадов подтверждается исследованиями рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии гетероструктуры ККЛ, опубликованными ранее [7].



**Рис. 3.** Результаты расчета зонной диаграммы и профилей квадратов модулей волновых функций в зоне проводимости квантового каскада при приложенном электрическом поле  $55 \text{ kV/cm}$ . А — активная область квантового каскада. Энергетический зазор между уровнями, выделенными жирными черными линиями, составляет  $4.8 \text{ meV}$ , что хорошо согласуется с экспериментом.

Полученные экспериментальные кривые рентгеновской дифрактометрии хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов, что говорит о точном соответствии химического состава расчетным значениям. Исследования просвечивающей микроскопии показали соответствие толщин слоев расчетным. Данные этих исследований исключают появление второй линии генерации вследствие наличия в структуре ККЛ двух различных типов квантовых каскадов из-за технологического сбоя в процессе эпитаксиального роста.

Расчет профилей квадратов модулей волновых функций в зонной структуре квантового каскада проводился методом решения уравнения Шредингера в приближении эффективной массы. Данный подход подробно описан в [9]. Расчет показал наличие двойного верхнего уровня в активной области квантового каскада (рис. 3). Энергетический зазор между уровнями, выделенными жирными линиями на рис. 3, составляет  $4.8 \text{ meV}$ , что хорошо согласуется с экспериментом. По нашему мнению, именно наличие двойного верхнего уровня в активной области квантового каскада исследуемых ККЛ является источником наблюдаемой двухчастотной генерации. На пороге лазерная генерация происходит за счет длинноволнового оптического перехода с первого верхнего уровня на нижний уровень в активной области кван-

тового каскада. По мере роста тока накачки происходит заполнение второго верхнего уровня в связанной квантовой яме, что приводит к включению генерации коротковолновой спектральной линии. Данный механизм имеет прямое сходство с генерацией через основное и возбужденное квантовое состояние электрона в полупроводниковых лазерах на основе межзонных переходов с активной областью на квантовых точках и квантовых ямах [10,11]. Подобный механизм был реализован в работе [6], в которой для двухчастотной генерации использовался один тип квантовых каскадов и полученный характер зависимостей интенсивностей длинноволновой и коротковолновой линий генерации от тока накачки хорошо согласуется с наблюдаемым в наших экспериментах.

Таким образом, в настоящей работе была получена двухчастотная генерация в ККЛ спектрального диапазона  $8 \mu\text{m}$  при комнатной температуре. Проведенные исследования спектров генерации позволили изучить зависимости интенсивности излучения для двух спектральных линий генерации, которые показали наличие насыщения и затухания длинноволновой линии генерации и линейный рост интенсивности коротковолновой линии генерации. На основе анализа полученных данных предложен механизм двухчастотной генерации в исследуемых образцах ККЛ.

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

## Список литературы

- [1] Tonouchi M. // Nat. Photonics. 2007. V. 1 N 2. P. 97-105. doi 10.1038/nphoton.2007.3
- [2] Ferguson B., Zhang X.-C. // Nature Materials. 2002. V. 1 N 1. P. 26–32. doi 10.1021/cr020685g
- [3] Daghestani N.S., Sokolovskii G.S., Bazieva N.E., Tolmatchev A.V., Rafailov E.U. // Semicond. Sci. Technol. 2009. V. 24. P. 095025. doi 10.1088/0268-1242/24/9/095025
- [4] Lu Q. Y., Bandyopadhyay N., Slivken S., Bai Y., Razeghi M. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. P. 221105. doi 10.1063/1.4902245
- [5] Vijayraghavan K., Jiang Y., Jang M., Jiang A., Choutagunta K., Vizbaras A., Demmerle F., Boehm G., Amann M.C., Belkin M.A. // Nature Communications. 2013. V. 4. P. 2021. doi 10.1038/ncomms3021
- [6] Fujita K., Hitaka M., Ito A., Edamura T., Yamanishi M., Jung S., Belkin M. A. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 251104. doi 10.1063/1.4923203
- [7] 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. doi 10.1134/S1063785017070173
- [8] Xu G., Moreau V., Chassagneux Y., Bousseksou A., Colombelli R., Patriarche G., Beaudoin G., Sagnes I. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 221101. doi 10.1063/1.3143652

- [9] *Faist J.* Quantum cascade lasers. Oxford University Press, 2013. 320 p.
- [10] *Sokolovskii G.S., Vinokurov D.A., Deryagin A.G., Dudelev V.V., Kuchinskii V.I., Losev S.N., Lyutetskiy A.V., Pikh-tin N.A., Slipchenko S.O., Sokolova Z.N., Tarasov I.S.* // *Tech. Phys. Lett.* 2008. V. 34. N 8. P. 708. doi 10.1134/S1063785008080257
- [11] *Sokolovskii G.S., Cataluna M.A., Deryagin A.G., Kuchin-skii V.I., Novikov I.I., Maksimov M.V., Zhukov A.E., Usti-nov V.M., Sibbett W., Rafailov E.U.* // *Tech. Phys. Lett.* 2007. V. 33. N 1. P. 4. doi 10.1134/S1063785007010026