

05

Влияние разогрева активной области на динамические и мощностные характеристики квантовых каскадных лазеров, излучающих на длине волны $4.8 \mu\text{m}$ при комнатной температуре

© В.В. Дюделев¹, В.В. Мамутин¹, Д.В. Чистяков², Е.А. Когновицкая^{1,3}, В.И. Кучинский¹, Н.А. Малеев¹, А.П. Васильев^{1,4}, А.Г. Кузьменков^{1,4}, В.М. Устинов^{3,4}, Г.С. Соколовский¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197022 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: gs@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 11.02.2019 г.

В окончательной редакции 11.02.2019 г.

Принята к публикации 15.03.2019 г.

Представлены результаты исследования полосковых квантово-каскадных лазеров спектрального диапазона $4.8 \mu\text{m}$, излучающих при комнатной температуре. Изучены мощностные характеристики и динамика включения исследуемых лазеров при импульсной накачке. Проведенные исследования показали наличие существенного нагрева активной области за время импульса накачки.

Ключевые слова: гетероструктура, активная область, импульс накачки.

DOI: 10.21883/OS.2019.09.48199.47-19

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ) являются основным источником когерентного излучения в среднем инфракрасном диапазоне. В связи с этим особенно привлекательным видится их применение для газоанализа [1,2], так как основные линии поглощения газов лежат в спектральной области $3\text{--}16 \mu\text{m}$. В частности, источники, генерирующие излучение в спектральном диапазоне $4.5\text{--}5 \mu\text{m}$, активно используются для детектирования диоксида углерода и закиси азота [3]. В настоящее время проводятся активные исследования по улучшению характеристик ККЛ данного спектрального диапазона [4–6]. Ввиду того, что ККЛ используют для своей работы внутризонные переходы между уровнями размерного квантования, инверсная населенность обеспечивается конструированием зонной структуры активной области за счет создания сложных сверхрешеток из различных по толщине и составу кванторазмерных слоев [3]. При этом для обеспечения порогового условия — превышения усиления над внутренними и внешними потерями — из-за наличия больших внутренних потерь [3] необходимо создание большого количества каскадов, следующих последовательно друг за другом. Однако при такой структуре активной области работа прибора возможна только при высоких значениях рабочего напряжения, что в свою очередь приводит к сильному нагреву активной области. Обеспечение эффективного отвода тепла является актуальной задачей, для решения которой существует множество подходов.

В том числе — наращивание мезы фосфидом индия с высокой теплопроводностью [7] и монтаж лазерных чипов на алмазный теплоотвод [8]. Таким образом, правильный расчет гетероструктуры ККЛ и выбор условий монтажа является необходимым условием обеспечения лазерной генерации при комнатной температуре.

В настоящей работе были проведены исследования полосковых ККЛ, излучающих вблизи $4.8 \mu\text{m}$. Типичным подходом для изготовления ККЛ, работающих в спектральном диапазоне вблизи $4.5\text{--}5 \mu\text{m}$, являются гетероструктуры с активной областью, состоящей из чередования слоев твердых растворов InGaAs/AlInAs, изопериодичных с подложкой InP [9]. Исследуемые гетероструктуры ККЛ были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на установке RIBER Compact-21 ТМ. Температуры выращивания активных областей лазерных структур составляли $\approx 500^\circ\text{C}$. При эпитаксиальном росте использовались слабо As-стабилизированные условия. Лазерная структура была спроектирована исходя из условия согласования всех эпитаксиальных слоев по параметру решетки с подложкой InP. Для выращивания гетероструктур ККЛ использовалась подложка $n\text{-InP}(100) : \text{Sn}$, легированная до $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Активная область ККЛ состояла из 30 периодов. Каждый период содержал последовательность из 18 чередующихся слоев барьеров AlInAs и квантовых ям GaInAs: $3.0/4.0/2.2/4.7/1.5/0.9/5.0/1.9/$

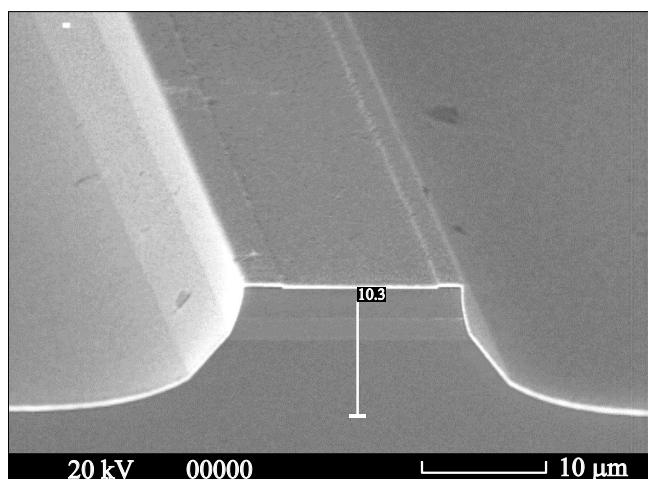


Рис. 1. Фотография полоска, сформированного на гетероструктуре ККЛ. Изображение получено методом сканирующей электронной микроскопии.

/2.8/1.9/2.3/2.0/2.0/2.0/2.2/2.2/2.3/2.3, где толщины указаны в нанометрах. Подчеркиванием выделены слои, соответствующие квантовым ямам GaInAs, а жирным шрифтом выделены слои, легированные кремнием. Уровень легирования составлял $4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Эпитаксиальная структура ККЛ выращивалась в следующем порядке: сперва выращивался волноводный слой $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ($1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 300 nm, затем (30 периодов) активная область толщиной 1356 nm, далее второй волноводный слой $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ($1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 200 nm, затем выращивался толстый эмиттер: $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ ($2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 600 nm, $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ ($3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 700 nm, $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ ($7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 1200 nm и верхний „подконтактный“ сильно легированный слой $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ($2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 50 nm (указана последовательность от подложки по направлению роста, в скобках приводится уровень легирования кремнием). Выбор числа периодов был обусловлен необходимостью обеспечения высокой квантовой эффективности и приемлемых пороговых токов для генерации при комнатной температуре [9,10]. Ранее в работе [10] проводилось исследование постростовой обработки и характеристик полученной полосковой структуры с целью отработки на имеющемся в ФТИ им. А.Ф. Иоффе оборудовании необходимых операций для получения высококачественных ККЛ. Первичные исследования полосковых лазерных структур показали возможность получения генерации при комнатной температуре и соответствие спектральных характеристик расчетным значениям [11].

В рамках настоящей работы были проведены исследования динамических и мощностных характеристик полосковых ККЛ, генерирующих излучение вблизи $4.8 \mu\text{m}$ при комнатной температуре. На гетероструктуре ККЛ методами фотолитографии были сформированы полоски

с шириной верхней части $\sim 17 \mu\text{m}$. Ввиду того, что, как уже было отмечено ранее, ККЛ имеют высокие рабочие напряжения, необходимо принимать меры, предотвращающие возможные утечки. Поэтому при изготовлении полосков была сформирована глубокая ($\sim 10 \mu\text{m}$) меза. Фотография полоска ККЛ, сформированного на гетероструктуре, приведена на рис. 1. После формирования полосков из гетероструктуры выкалывались отдельные чипы ККЛ с типичной длиной $\sim 3 \text{ mm}$. Для обеспечения эффективного отвода тепла от активной области образцы монтировались на первичный теплоотвод полоском вниз. Накачка образцов осуществлялась в импульсном режиме. Длительность импульсов по ширине на половине высоты составляла 70 ns, частота следования импульсов 48 kHz. Подробнее параметры используемой накачки и детали экспериментальной установки описаны в работах [12–14]. Измерение мощности проводилось измерителем мощности Thorlabs PM100D с приемной термоэлектрической головкой S401C. Типичная импульсная ватт-амперная характеристика приведена на рис. 2. Порог лазерной генерации составил 7.2 A. Максимальная пиковая мощность составила 9 mW при амплитуде тока накачки 9 A. Резкое насыщение ватт-амперной характеристики наступает при достижении амплитуды тока накачки 8.5 A.

Помимо мощностных характеристик ККЛ были исследованы их динамические характеристики. Для этого были последовательно зарегистрированы осциллограммы фотоотклика быстродействующего фотоприемника с четырехкаскадным охлаждением и предусилителем с полосой пропускания 1 GHz. Полоса спектральной чувствительности используемого фотоприемника имеет диапазон 3–10.6 μm . Результаты измерения динамических характеристик исследуемых ККЛ представлены на рис. 3. Представлены осциллограммы для следующих амплитуд импульсов токов накачки: 7.5, 8.0, 8.5, 9.0,

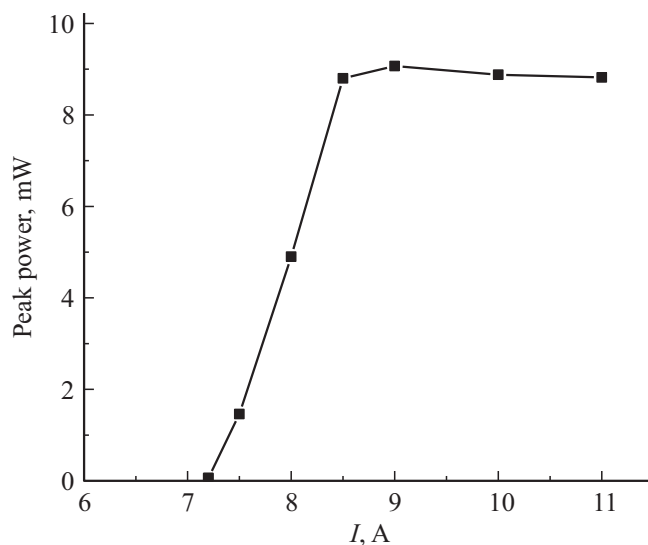


Рис. 2. Типичная ватт-амперная характеристика ККЛ спектрального диапазона $4.8 \mu\text{m}$ при комнатной температуре.

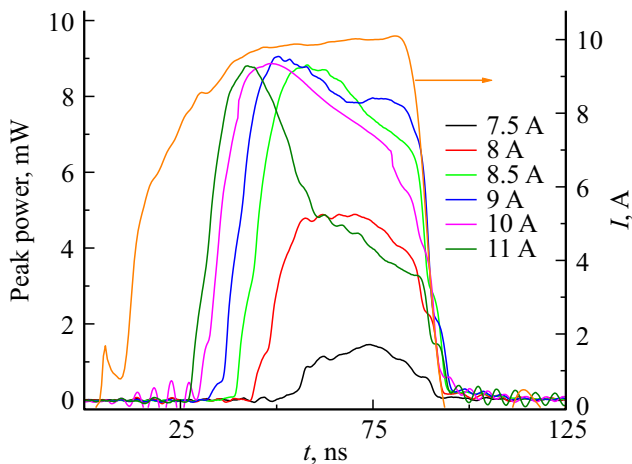


Рис. 3. Осциллограммы импульсов фотоотклика для токов накачки 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 10.0, 11.0 А. Также приведена осциллограмма импульса (самая высокая осциллограмма на рисунке, стрелка указывает на ось, на которой откладывается амплитуда тока накачки) токовой накачки, соответствующая амплитуде тока накачки 10 А.

10.0 и 11.0 А. На рис. 3 приведена также осциллограмма импульса тока накачки с амплитудой 10 А. Форма импульса накачки остается практически неизменной для всех амплитуд тока, при которых проводились измерения. Из приведенных осциллограмм хорошо видно, что оптический импульс не повторяет форму импульса накачки. Заметно, что на протяжении всего импульса накачки, вплоть до его заднего фронта, наблюдается некоторый рост его амплитуды. Однако амплитуда оптического импульса вблизи заднего фронта резко уменьшается на всех приведенных осциллограммах. Особенно сильно данная особенность выражена в диапазоне токов накачки, который соответствует участку ватт-амперной характеристики, на котором наблюдается ее насыщение. Тем не менее, как видно из рис. 3, вблизи порога генерации также заметно некоторое снижение интенсивности при развитии импульса лазерной генерации.

Такое динамическое поведение интенсивности ККЛ может быть объяснено сильным разогревом активной области исследуемых ККЛ в течение импульса накачки. По-видимому, влияние наблюдаемого разогрева активной области также приводит к ограничению выходной мощности исследуемых ККЛ при комнатной температуре. Снижение теплового сопротивления лазерных чипов ККЛ в дальнейшем позволит существенно повысить их выходную мощность.

Кроме того, как видно из рис. 3, наблюдается существенная задержка включения импульса генерации по отношению к импульсу накачки, превышающая несколько наносекунд. Данный экспериментальный результат более чем на два порядка превышает значения теоретических оценок, которые предсказывают для ККЛ задержку включения, не превышающую десятков пикосекунд даже вблизи порога генерации [15,16]. Необходимо

отметить, что наблюдаемая в наших экспериментах задержка включения ККЛ на порядок превосходит также задержку включения полупроводниковых лазеров с квантоворазмерной активной областью, не превышающую, как правило, долей наносекунд [17]. По-видимому, причиной столь серьезного расхождения теоретических оценок и экспериментальных результатов, наблюдаемых в рамках этой работы, а также для ККЛ в диапазоне $\sim 8 \mu\text{m}$ [12], является не совсем корректный учет влияния на задержку включения времен межуровневой релаксации носителей в активной области ККЛ [18]. Поэтому при решении системы балансных уравнений, описывающих динамику носителей в активной области ККЛ, не учитывается время спонтанного излучательного перехода, которое на несколько порядков выше времени релаксации носителей [15,16], что может приводить к существенному занижению теоретической оценки величины задержки включения ККЛ.

Таким образом, в настоящей работе были исследованы мощностные и динамические характеристики ККЛ спектрального диапазона $4.8 \mu\text{m}$ при комнатной температуре. Максимальная пиковая мощность составила 9 мВт. Исследования динамических характеристик показали наличие существенного разогрева активной области ККЛ в течение развития импульса накачки. Эффект разогрева активной области наблюдался даже вблизи порога генерации. Дальнейшая оптимизация гетероструктуры ККЛ, а также конструкции лазерного чипа и постростовой обработки позволит существенно повысить выходную мощность ККЛ.

Список литературы

- [1] *Curl R.F., Capasso F., Gmachl C., Kosterev A.A., McManus B., Lewicki R., Pusharsky H., Wysocki G., Tittel F.* // Chem. Phys. Lett. 2010. V. 487 (1-3). P. 1–18. doi 10.1016/j.cpllett.2009.12.073
- [2] *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. Selected Topics in Quant. Electron. 2000. V. 6. N 6. P. 931–947. doi 10.1109/2944.902142
- [3] *Gmachl C., Capasso F., Sivco D.L., Cho A.Y.* // Rep. Prog. Phys. 2001. V. 64. N 11. P. 1533–1601. doi 10.1088/0034-4885/64/11/204
- [4] *Kirch J.D., Shin J.C., Chang C.-C., Mawst L.J., Botez D., Earles T.* // Electron. Lett. 2012. V. 48. N 4. P. 234–U178. doi 10.1049/el.2012.0017
- [5] *Shin J.C., Souza M.D., Liu Z., Kirch J., Mawst L.J., Botez D., Vurgafman I., Meyer J.R.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 201103. doi 10.1063/1.3139069
- [6] *Botez D., Shin J.C., Kirch J.D., Chang C.-C., Mawst L.J., Earles T.* // IEEE J. of Sel. Topics in Quant. Electron. 2013. V. 19. N 4. P. 1200312. doi 10.1109/JSTQE.2012.2237387
- [7] *Tsecoun A., Go R., Pusharsky M., Razeghi V., Patel C.K.N.* // PNAS (Proc. Natl. Acad. Sci., USA) 2006. V. 103. P. 4831.
- [8] *Razeghi M., Slivken S., Bai Y., Gokden B., Darvish S.R.* // New J. Phys. 2009. V. 11. P. 125017.

- [9] *Gmachl C., Capasso F., Sivco D.L., Cho A.Y.* // Rep. Prog. Phys. 2001. V. 64. P. 1533.
- [10] *Mamutin V.V., Vasilyev A.P., Lyutetskiy A.V., Ilyinskaya N.D., Zadiranov Yu.M., Sofronov A.N., Firsov D.A., Vorobjev L.E., Maleev N.A., Ustinov V.M.* // Semiconductors. 2018. V. 52. P. 950. doi 10.1134/S106378261807014X
- [11] *Mamutin V.V., Vasil'ev A.P., Lyutetskii A.V., Il'inskaya N.D., Usikova A.A., Zadiranov Yu.M., Maleev N.A., Sofronov A.N., Firsov D.A., Vorob'ev L.E., Ustinov V.M.* // Tech. Phys. Lett. 2018. V. 44. N 9. P. 814–816. doi 10.1134/S1063785018090249
- [12] *Dudelev V.V., Losev S.N., Myl'nikov V.Yu., Babichev A.V., Kognovitskaya E.A., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Pikhtin N.A., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Y., 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] *Dudelev V.V., Losev S.N., Myl'nikov V.Yu., Babichev A.V., Kognovitskaya E.A., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Pikhtin N.A., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Y., Novikov I.I., Egorov A.Yu., Kuchinskii V.I., Sokolovskii G.S.* // Opt. Spectrosc. 2018. V. 125. N 3. P. 402–404. doi 10.1134/S0030400X18090096
- [14] *Dudelev V.V., Losev S.N., Myl'nikov V.Yu., Babichev A.V., Kognovitskaya E.A., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Pikhtin N.A., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Y., Novikov I.I., Egorov A.Yu., Kuchinskii V.I., Sokolovskii G.S.* // Phys. Sol. Stat. 2018. V. 60. N 11. P. 2291–2294. doi 10.1134/S1063783418110057
- [15] *Hamadou A., Lamari S., Thobel J.-L.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. N 9. P. 093116. doi 10.1063/1.3124379
- [16] *Yong K.S.C., Haldar M.K., Webb J.F.* // J. Mod. Opt. 2018. V. 65. N 4. P. 406–414. doi 10.1080/09500340.2017.1397219
- [17] *Sokolovskii G.S., Dudelev V.V., Kolykhalova E.D., Deryagin A.G., Maximov M.V., Nadtochiy A.M., Kuchinskii V.I., Mikhrin S.S., Livshits D.A., Viktorov E.A., Erneux T.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. N 8. P. 081109. doi 10.1063/1.3688604
- [18] *Kruczek T., Fedorova K.A., Sokolovskii G.S., Teissier R., Baranov A.N., Rafailov E.U.* // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. N 1. P. 011124. doi 10.1063/1.4774088