

11.3

Квантово-каскадный лазер с частотой генерации 3.8 THz, выращенный методом металлоорганической газофазной эпитаксии

© Т.А. Багаев¹, М.А. Ладугин¹, А.А. Мармалюк¹, А.И. Данилов¹, Д.В. Ушаков², А.А. Афоненко², А.А. Зайцев³, К.В. Маремьянин⁴, С.В. Морозов⁴, В.И. Гавриленко^{4,5}, Р.Р. Галиев⁶, А.Ю. Павлов⁶, С.С. Пушкарев⁶, Д.С. Пономарев⁶, Р.А. Хабибуллин^{5,6}

¹ АО „НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия

² Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

³ Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Зеленоград, Москва, Россия

⁴ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

⁵ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва, Россия

E-mail: khabibullin@isvch.ru

Поступило в Редакцию 11 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 14 марта 2022 г.

Принято к публикации 22 марта 2022 г.

Продемонстрирован квантово-каскадный лазер (ККЛ) с частотой генерации около 3.8 THz, выращенный методом металлоорганической газофазной эпитаксии. Многослойная гетероструктура для ККЛ состоит из 185 повторений активного модуля, содержащего четыре квантовые ямы GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As. Пороговый ток и пороговое напряжение изготовленного ККЛ составили 2.25 kA/cm² и 19.7 V соответственно. Генерация ККЛ происходила в многомодовом режиме, детектирование терагерцевого излучения продолжалось при повышении температуры лазера вплоть до 60 K.

Ключевые слова: квантово-каскадные лазеры, терагерцевый диапазон, МОС-гидридная эпитаксия, квантовая яма.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.10.52550.19162

Чрезвычайно высокие требования, предъявляемые к качеству эпитаксиального роста многослойных гетероструктур для квантово-каскадных лазеров терагерцевого диапазона (THz ККЛ), приводят к высокой стоимости и крайне ограниченному предложению данных лазеров на рынке. Малое оптическое усиление межподзонных переходов и высокий уровень потерь в резонаторе вынуждают использовать „каскадную схему“ с толщиной активной области лазера около 10 μm, что требует многократного (более 100 раз) повторения активного модуля — периода структуры, состоящего из набора квантовых ям (КЯ) [1,2]. Времена роста таких структур превышают 10 часов, поэтому остро встает вопрос о стабильности скоростей роста полупроводниковых слоев в течение длительного времени.

Подавляющее большинство успешно реализованных THz ККЛ изготовлено на основе GaAs/AlGaAs-структур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [3]. Технология МЛЭ позволяет выращивать структуры с резкими гетерограницами и малым уровнем фоновой легирования. Развитие технологии МЛЭ-роста и зонных дизайнов THz ККЛ в течение последних 20 лет позволило достичь высоких рабочих температур лазеров до 250 K (около –23°C) с возможностью использования термоэлектрического охлаждения на элементе Пельтье [4]. Однако стабильность скорости роста в МЛЭ определяется уровнем поддержания температуры

эффузионных ячеек с материалами III группы (Ga и Al), которые во время роста не могут находиться в термодинамическом равновесии с тиглем из-за работы заслонок. Ранее было показано, что использование *in situ* методики для стабилизации скорости роста в МЛЭ позволяет существенно улучшить повторяемость толщин и состава слоев как от периода к периоду в одной структуре, так и в серии выращенных структур, что улучшает характеристики изготовленных THz ККЛ [5].

Традиционно считается, что рост полупроводниковых структур методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОС-гидридной эпитаксии, МОСГЭ) уступает МЛЭ с точки зрения резкости гетерограниц и концентрации фоновой примеси. Однако использование режима МОСГЭ-роста при низком давлении в реакторе с меньшими скоростями роста тоже позволяет получать резкие границы гетеропереходов. Стабильность скорости роста в МОСГЭ определяется точностью поддержания температуры роста и давления газов, что, на первый взгляд, технически проще, чем стабилизация МЛЭ-роста. Кроме того, использование промышленно ориентированной технологии МОСГЭ с возможностью масштабирования реактора для одновременного роста большего числа структур обладает преимуществом с точки зрения стоимости одной структуры.

На данный момент успешная реализация THz ККЛ на основе GaAs/AlGaAs, выращенных методом МОСГЭ,

продемонстрирована только одной научной группой под руководством Е. Карон из EPFL (Швейцария), о чем сообщалось в двух работах [6,7]. В этих работах показано, что THz ККЛ на МОСГЭ- и МЛЭ-структурах демонстрируют близкие значения максимальной рабочей температуры T_{\max} . Еще одним успешным примером являются ККЛ на основе InGaAs/InAlAs с частотой генерации 3.7 THz, выращенные методом МОСГЭ, у которых T_{\max} была выше, чем у идентичных по зонному дизайну ККЛ на основе МЛЭ-структур [8]. Таким образом, использование МОСГЭ-технологии для роста THz ККЛ на основе GaAs/AlGaAs требует более детального изучения.

Целью настоящей работы является демонстрация возможности изготовления THz ККЛ с активным модулем из четырех КЯ GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As на основе многослойной гетероструктуры, выращенной методом МОСГЭ.

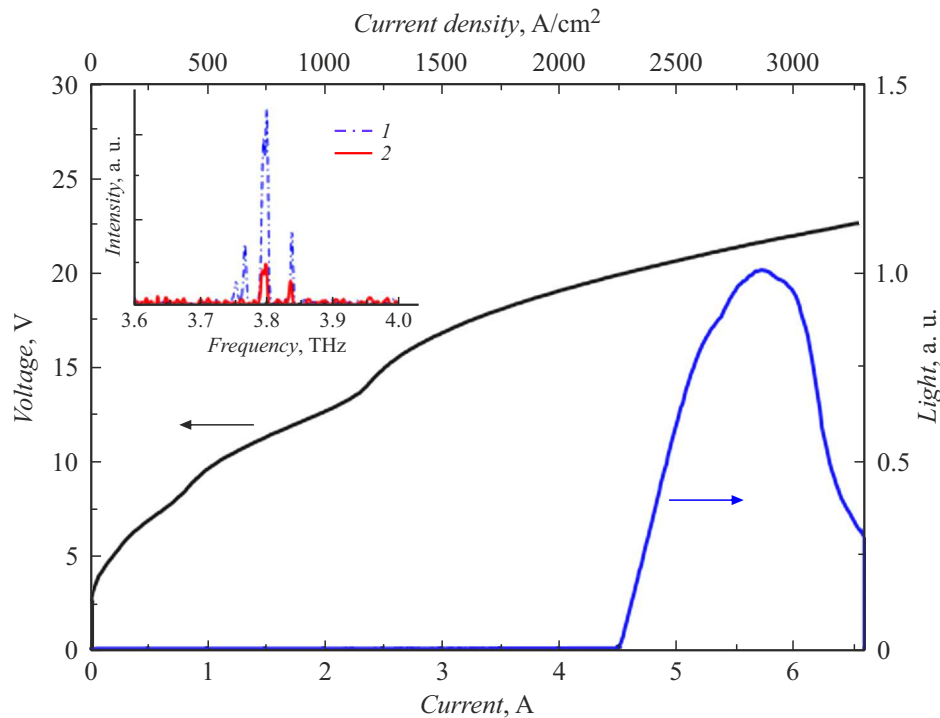
Для дизайна гетероструктуры GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As для ККЛ была выбрана пятиуровневая лазерная схема с резонансно-фононным опустошением нижнего лазерного уровня и максимумом оптического усиления около 3.8 THz. Инжекция электронов на верхний лазерный уровень осуществляется с помощью механизма резонансного туннелирования. Суммарная толщина КЯ и барьеров одного активного модуля (период структуры) составляет около 55 nm, что требует роста 185 периодов для достижения толщины активной области около 10 μm . Центральную часть широкой КЯ активного модуля необходимо легировать донорной примесью со слоевой концентрацией $4.6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. Концентрация донорного легирования в контактных слоях необходима на уровне $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ для минимизации паразитного сопротивления контакта металл/полупроводник. Для создания двойного металлического волновода требуется формирование между подложкой и гетероструктурой стоп-слоя AlGaAs толщиной более 200 nm с содержанием алюминия более 55% для обеспечения селективности жидкостного травления.

Многослойная гетероструктура GaAs/AlGaAs для ККЛ выращивалась методом МОСГЭ при низком давлении в реакторе горизонтального типа в „НИИ „Полус“ им. М.Ф. Стельмаха“. Для эпитаксиального роста использовались триэтилгаллий, триметилалюминий и арсин в качестве прекурсоров Ga, Al и As. При росте активной области ККЛ, состоящей из барьеров Al_{0.15}Ga_{0.85}As и квантовых ям GaAs с минимальной толщиной 8 и 30 монослоев соответственно, скорость роста слоев GaAs составляла 0.180 nm/s, а слоев AlGaAs — 0.214 nm/s. Важное значение для эффективной генерации THz ККЛ имеет точность формирования полупроводниковой сверхрешетки, в том числе стабильность параметров слоев от первого до последнего периода. С этой целью в настоящей работе использованы подходы по получению резких гетерограниц и контролю скорости роста, успешно опробованные при выращивании гетероструктур AlGaAs/GaAs со сверхтонкими слоями и большим количеством периодов [9].

Из выращенной МОСГЭ-структуры был выколот образец квадратной формы размером около $1 \times 1 \text{ cm}$, на основе которого были изготовлены ККЛ с двойным металлическим волноводом из золота. Метод изготовления подробно описан в работах [10,11]. Для электрического контакта к лазерной структуре использовались невжигаемые Ti/Au-контакты, что приводит к дополнительному падению напряжения (3–4 V) на барьере Шоттки. Выколотые THz ККЛ с резонатором Фабри–Перо (ширина 100 μm , длина 2 mm) были смонтированы на теплоотвод типа C-mount; электрический контакт осуществлялся путем приваривания к лазерному полюску нескольких золотых проволочек диаметром 30 μm , распределенных равномерно по всей длине полоска.

На рисунке представлены вольт-амперная характеристика и зависимость интегрального сигнала от тока инжекции для исследуемого THz ККЛ (№. 33111), измеренные при температуре 4.2 K в импульсном режиме с длительностью импульса 1 μs и частотой повторения 100 Hz. Более детальное описание измерительного метода приведено в работе [12]. Следует отметить, что по сравнению с работой [6], где авторы столкнулись с проблемой легирования контактных слоев при МОСГЭ-росте и получили большие рабочие напряжения ККЛ (более 40 V), в нашем случае рабочие напряжения ККЛ около 20 V хорошо соответствуют рассчитанным значениям внешнего электрического поля, которое необходимо приложить к структуре для оптимального выравнивания электронных уровней. Большой пороговый ток генерации изготовленного ККЛ (около 4.5 A, соответствующая плотность тока 2.25 kA/cm^2) характерен для ККЛ с резонансно-фононными дизайнами, что еще усугубляется использованием пятиуровневой лазерной схемы. При этом необходимо отметить большой динамический диапазон токов генерации, составляющий от 4.5 до 7.5 A. На вставке к рисунку приведены спектры генерации ККЛ при токе около 6 A, измеренные с помощью фурье-спектрометра при температурах 12 и 60 K. Наибольшую интенсивность имеет мода излучения с частотой около 3.8 THz, что хорошо согласуется с рассчитанным спектром усиления для выбранного дизайна. При температурах около 60 K интенсивность излучения ККЛ все еще оставалась достаточно высокой для измерения спектра. Принимая во внимание неизбежные потери терагерцевого излучения при измерениях спектров генерации, мы полагаем, что максимальная рабочая температура изготовленного ККЛ должна составлять не менее 70 K.

Таким образом, в работе успешно продемонстрирована возможность МОСГЭ-роста многослойной гетероструктуры GaAs/AlGaAs для THz ККЛ с толщиной активной области около 10 μm . Изготовленный на основе МОСГЭ-структуры THz ККЛ излучает вблизи 3.8 THz с сохранением достаточной интенсивности для измерения спектра при увеличении температуры до 60 K.



Вольт-амперная характеристика и зависимость интенсивности интегрального излучения от тока для THz ККЛ, измеренные при температуре 4.2 К в импульсном режиме с длительностью импульса $1 \mu\text{s}$ и частотой повторения 100 Hz. На вставке приведены спектры генерации лазера, измеренные в импульсном режиме при токе около 6 А и двух температурах: 12 (1) и 60 К (2).

Мы полагаем, что продолжение работ по МОСГЭ-росту THz ККЛ позволит улучшить характеристики лазеров, потенциально способных конкурировать с THz ККЛ на основе МЛЭ-структур.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.С. Бугаеву (ИСВЧПЭ РАН) за плодотворное обсуждение эпитаксиальных методик.

Финансирование работы

Работы по постростовому изготовлению и измерению характеристик излучения ККЛ выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-72-30020).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.E. Yachmenev, S.S. Pushkarev, R.R. Reznik, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, **66**, 100485 (2020). DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485
- [2] Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов, В.И. Гавриленко, И.С. Васильевский, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин, *Квантовая электроника*, **48** (11), 1005 (2018). [D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, A.A. Dubinov, V.I. Gavrilenko, I.S. Vasil'evskii, N.V. Shchavruk, D.S. Ponomarev, R.A. Khabibullin, *Quantum Electron.*, **48** (11), 1005 (2018). DOI: 10.1070/QEL16806].
- [3] M.S. Vitiello, A. Tredicucci, *Adv. Phys. X*, **6**, 1893809 (2021). DOI: 10.1080/23746149.2021.1893809
- [4] B. Wen, D. Ban, *Prog. Quantum Electron.*, **80**, 100363 (2021). DOI: 10.1016/j.pquantelec.2021.100363
- [5] L.H. Li, J.X. Zhu, L. Chen, A.G. Davies, E.H. Linfield, *Opt. Express*, **23**, 2720 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.002720
- [6] L. Sirigu, A. Rudra, E. Kapon, M.I. Amanti, G. Scalari, J. Faist, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 181111 (2008). DOI: 10.1063/1.2924294
- [7] M.I. Amanti, G. Scalari, R. Terazzi, M. Fischer, M. Beck, J. Faist, A. Rudra, P. Gallo, E. Kapon, *New J. Phys.*, **11**, 125022 (2009). DOI: 10.1088/1367-2630/11/12/125022
- [8] K. Fujita, M. Yamanishi, S. Furuta, K. Tanaka, T. Edamura, T. Kubis, G. Klimeck, *Opt. Express*, **20**, 20647 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.020647
- [9] M.A. Ladugin, I.V. Yarotskaya, T.A. Bagaev, K.Yu. Telegin, A.Yu. Andreev, I.I. Zasavitskii, A.A. Padalitsa, A.A. Marmalyuk, *Crystals*, **9**, 305 (2019). DOI: 10.3390/cryst9060305
- [10] Р.А. Хабибуллин, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, И.С. Васильевский, А.А. Зайцев, А.И. Данилов, О.Ю. Волков, В.В. Павловский, К.В. Маремьянин, В.И. Гавриленко, *ФТП*, **52** (11), 1268 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.11.46581.03 [R.A. Khabibullin, N.V. Shchavruk, D.S. Ponomarev, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, I.S. Vasil'evskii, A.A. Zaycev, A.I. Danilov, O.Yu. Volkov, V.V. Pavlovskiy, K.V. Maremyanin, V.I. Gavrilenko, *Semiconductors*, **52** (11), 1380 (2018). DOI: 10.1134/S1063782618110118].

- [11] R.A. Khabibullin, N.V. Shchavruk, D.S. Ponomarev, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, K.V. Maremyanin, O.Yu. Volkov, V.V. Pavlovskiy, A.A. Dubinov, Opto-Electron. Rev., **27**, 329 (2019). DOI: 10.1016/j.opelre.2019.11.002
- [12] А.В. Иконников, К.В. Маремьянин, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко, А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук, Р.А. Хабибуллин, Р.Р. Резник, Г.Э. Цырлин, Ф.И. Зубов, А.Е. Жуков, Ж.И. Алфёров, Письма в ЖТФ, **43** (7), 86 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.07.44473.16602 [A.V. Ikonnikov, K.V. Marem'yanin, S.V. Morozov, V.I. Gavrilenko, A.Yu. Pavlov, N.V. Shchavruk, R.A. Khabibullin, R.R. Reznik, G.E. Cirlin, F.I. Zubov, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, Tech. Phys. Lett., **43** (4), 362 (2017). DOI: 10.1134/S1063785017040083].