

07.2

Мощные квантово-каскадные лазеры с длиной волны генерации $8\ \mu\text{m}$

© А.В. Бабичев¹, В.В. Дюделев², А.Г. Гладышев³, Д.А. Михайлов^{2,4}, А.С. Курочкин¹, Е.С. Колодезный¹, В.Е. Бугров¹, В.Н. Неведомский², Л.Я. Карачинский¹⁻³, И.И. Новиков¹⁻³, Д.В. Денисов⁴, А.С. Ионов⁵, С.О. Слипченко², А.В. Лютецкий², Н.А. Пихтин², Г.С. Соколовский^{2,1}, А.Ю. Егоров¹

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

⁵ АО „ОКБ-Планета“, Великий Новгород, Россия

E-mail: a.babichev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 16 апреля 2019 г.

Принято к публикации 16 апреля 2019 г.

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращена гетероструктура квантово-каскадного лазера на основе гетеропары $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$, согласованной по параметру кристаллической решетки с подложкой InP. Слои InP использованы для формирования оптического волновода. Получена генерация при комнатной температуре в спектральном диапазоне $8\ \mu\text{m}$ с максимальной выходной оптической мощностью $0.45\ \text{W}$ с одного торца лазера в стандартной полосковой геометрии резонатора Фабри–Перо, образованного сколотыми гранями.

Ключевые слова: квантово-каскадные лазеры, эпитаксия, фосфид индия.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.14.48025.17824

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) спектрального диапазона $7\text{--}8\ \mu\text{m}$ требуются для ряда приложений, в числе которых дистанционный газоанализ [1] и медицинские применения [2–4]. Наиболее распространенными схемами активных областей при изготовлении ККЛ спектрального диапазона $7\text{--}8\ \mu\text{m}$ являются конструкции с двухфононным резонансным рассеянием [5], а также схема на основе переходов связанное состояние–непрерывный спектр [6].

Конструкция на основе двухфононного резонансного рассеяния позволяет достичь высокого усиления в узкой спектральной области (вследствие малой ширины спектра усиления), что дает возможность реализовать генерацию в непрерывном режиме при повышенных температурах. В частности, на основе данной схемы активной области удалось реализовать одночастотную лазерную генерацию при комнатной температуре в арочной геометрии резонатора [7].

В настоящей работе представлены результаты исследований по формированию мощных ККЛ с длиной волны генерации $8\ \mu\text{m}$ в геометрии резонатора Фабри–Перо, работающих в импульсном режиме накачки при комнатной температуре. Гетероструктура ККЛ была выращена компанией „Коннектор Оптик“ на промышленной установке молекулярно-пучковой эпитаксии Ribet 49, оснащенной твердотельным источником мышьяка, фосфора кречерного типа и источниками марки AVI 1000 для создания потоков галлия и индия [8,9]. В качестве подложки использовались пластины InP с ориентацией (001), легированные серой

до уровня $n = 1 \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$. Толщина буферного вышележающего слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ составляла $500\ \text{nm}$, $n = 5 \cdot 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$). Активная область включала 50 каскадов на основе гетеропары $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$. Использована конструкция с двухфононным резонансным рассеянием носителей заряда [10,11]. Толщина верхней обкладки волновода (слоя InP) составила $4\ \mu\text{m}$ ($n = 1 \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$). В качестве контактных слоев использованы слои $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 100 и $20\ \text{nm}$ с уровнями легирования $1 \cdot 10^{17}$ и $1 \cdot 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ соответственно.

Структурное качество гетероструктуры исследовалось методом рентгенодифракционного анализа и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). ПЭМ-измерения выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, поддержанного Министерством науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор RFMEFI62117X0018). Измерения кривых качания были проведены вблизи симметричного рефлекса (004) InP на дифрактометре PANalytical X'PertPro в параллельной геометрии пучка рентгеновского излучения [11]. Рентгенодифракционная кривая сформированной гетероструктуры представлена на рис. 1 (кривая 1). Наблюдается набор пиков-сателлитов, соответствующих периодической структуре каскадов. Наряду с экспериментальной кривой на рис. 1 представлен результат аппроксимации (кривая 2). На основании положения пиков-сателлитов определена средняя толщина каскада (d), которая составила

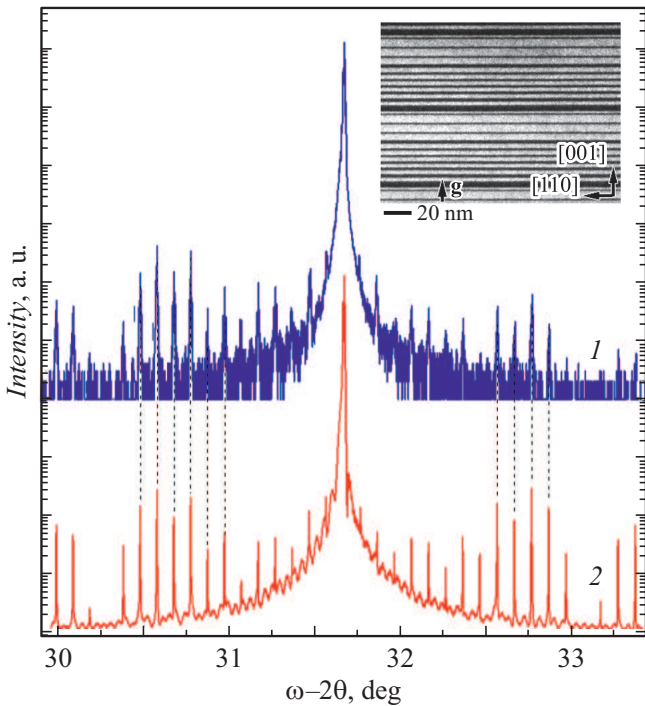


Рис. 1. Рентгенодифракционные кривые. 1 — экспериментальная зависимость, 2 — результат расчета. Пунктирными линиями отмечены положения пиков-спутников, использованных при расчете периода каскада. На вставке — ПЭМ-изображение двух каскадов.

$52.0 \pm 0.5 \text{ nm}$, что соотносится с суммарной толщиной слоев каскада, заданной в ростовом маршруте (52.7 nm).

ПЭМ-исследования проводились на просвечивающем электронном микроскопе JEM2100F (Jeol, Япония) с ускоряющим напряжением 200 kV. Использовалась стандартная методика подготовки образцов в геометрии поперечного сечения, которая представлена, например, в работе [11]. Вставка на рис. 1 демонстрирует ПЭМ-изображение двух каскадов. Толщина каскада, полученная на основе анализа ПЭМ-изображений, составила 52.3 nm . Приборная погрешность, согласно методике измерений, составляет $\pm 5\%$. Протяженных дефектов не обнаружено. Все слои имеют планарные гетерограницы. Таким образом, результаты рентгеноструктурного анализа и просвечивающей микроскопии подтверждают высокое структурное совершенство изготовленных гетероструктур.

При формировании резонаторов Фабри–Перо была сформирована меза с двойной канавкой (double-trench geometry [12]). Шаги процессирования кристалла ККЛ аналогичны описанному ранее [13]. Ширина полоскового контакта вблизи поверхности гетероструктуры составила $20 \mu\text{m}$, а длина резонатора — 5 mm . Зеркала лазеров формировались скалыванием. Отражающее и антиотражающее покрытия на сколотые грани лазера не наноси-

лись. Монтаж кристалла производился эпитаксиальной поверхностью вниз, на медный теплоотвод, при помощи индиевого припоя.

Ватт-амперные характеристики измерялись при пропуске импульсов тока с длительностью 70 ns и частотой повторения 48 kHz . Спектры лазерной генерации записывались при помощи монохроматора МДР-23 с дифракционной решеткой 75 mm^{-1} . Излучение регистрировалось охлаждаемым фотоприемником Vigo PVI-4TE-10.6 с использованием техники синхронного детектирования [14]. Выходная оптическая мощность детектировалась с помощью откалиброванного термоэлектрического преобразователя (Thorlabs S401). Все измерения были проведены при температуре 15°C .

Типичный вид ватт-амперной характеристики двух кристаллов ККЛ с шириной полоскового контакта вблизи поверхности гетероструктуры $20 \mu\text{m}$, длиной резонатора 5 mm представлен на рис. 2. Пороговый ток лазерной генерации (I_{th}) составлял около 4.0 A , что соответствует оценочным значениям плотностей порогового тока j_{th} в 4.0 kA/cm^2 . Высокие значения плотностей пороговых токов по сравнению с литературными данными обусловлены повышенным уровнем легирования инжектора в каскадах. Продемонстрирован рост выходной оптической мощности лазера при повышении тока до значения, соответствующего $4I_{th}$. Последующее увеличение токовой накачки приводит к падению интенсивности в связи с перегревом активной области. Максимальная выходная оптическая мощность, измеренная с одного торца, составляет 380 mW . С учетом коэффициента пропус-

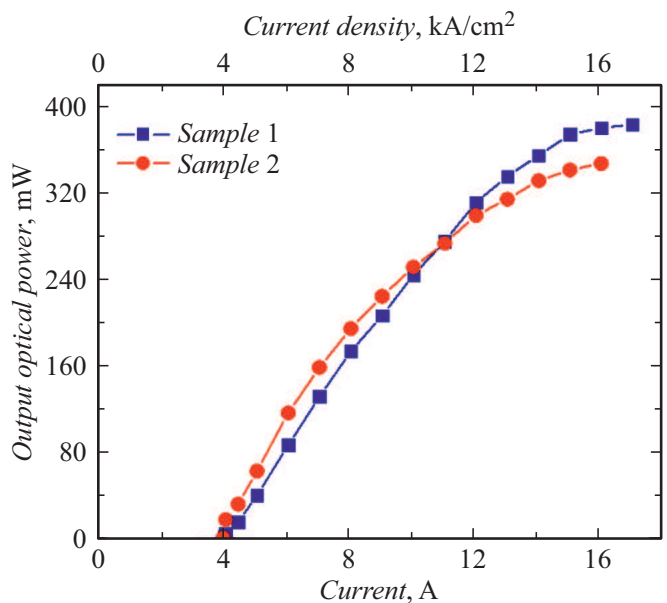


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики двух образцов ККЛ в конструкции резонатора Фабри–Перо. Ширина полоскового контакта вблизи поверхности гетероструктуры $20 \mu\text{m}$, длина полоска 5 mm .

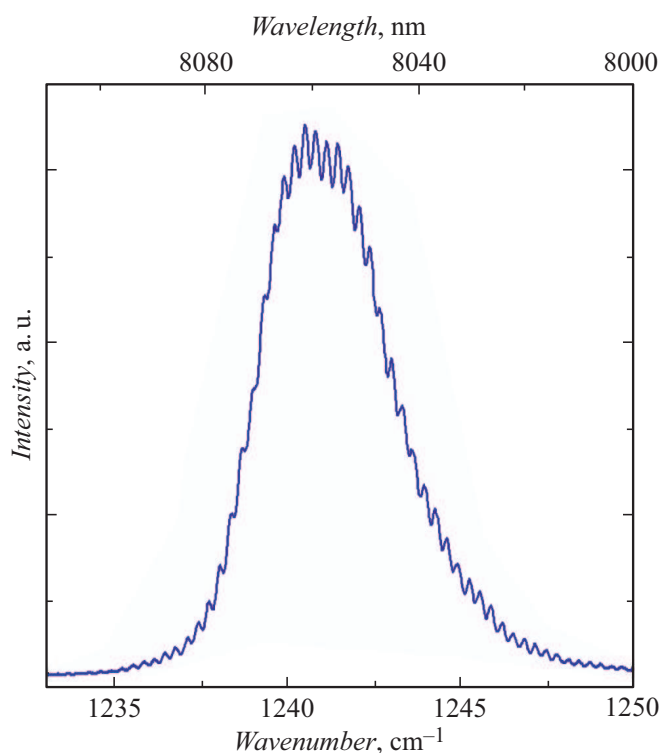


Рис. 3. Типичный спектр многомодовой лазерной генерации ККЛ (ток накачки $I = 8$ А).

ния фокусирующих лазерное излучение линз, оценочное значение которого равно 0,85, реальная максимальная выходная оптическая мощность с одного торца составляет около 447 мВт. Таким образом, выходная оптическая мощность с обоих торцов лазера, равная удвоенному значению, составляет ~ 890 мВт. При этом дифференциальная эффективность (dP/dI) такого лазера имеет значение не менее чем 0,1 Вт/А. Спектр многомодовой лазерной генерации вблизи длины волны $8\ \mu\text{m}$ представлен на рис. 3. Спектр соответствует току накачки в 8 А ($j = 8\ \text{kA/cm}^2$). Межмодовое расстояние между продольными модами ($\Delta\lambda$) составляет $\sim 2,0$ нм. Эффективный показатель преломления для основной моды $n_{eff} = \lambda^2 / (2L\Delta\lambda) = 3,28$, где λ — длина волны лазерной генерации, L — длина резонатора. Расчетное значение коэффициента отражения на зеркалах $R_{eff} = (n_{eff} - 1)^2 / (n_{eff} + 1)^2$ составляет 0,28, что соответствует коэффициенту потерь на зеркалах $\alpha_m = \ln(R_{eff}) / L = 2,5\ \text{cm}^{-1}$.

Таким образом, в ходе выполнения работы проведены исследования по формированию мощных ККЛ с длиной волны генерации $8\ \mu\text{m}$. Продемонстрирована многомодовая генерация ККЛ при комнатной температуре с пиковой выходной оптической мощностью с обоих торцов лазера около 0,89 Вт. Дифференциальная эффективность составила 0,1 Вт/А. На основе данной гетероструктуры ККЛ удалось реализовать одночастотную лазерную генерацию при комнат-

ной температуре в конструкции арочного резонатора [7].

Финансирование работы

Работа А.В. Бабичева, А.С. Курочкина, Е.С. Колодезного, В.Е. Бугрова, Л.Я. Карачинского, И.И. Новикова, Г.С. Соколовского, А.Ю. Егорова поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках Федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.“, шифр 2016-14-579-0009, соглашение № 14.578.21.0204, уникальный идентификатор RFMEFI57816X0204.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Michel A.P.M., Kapit J., Witinski M.F., Blanchard R. // *Appl. Opt.* 2017. V. 56. P. E23–E29.
- [2] Zimmermann H., Wiese M., Fiorani L., Ragnoni A. // *J. Sens. Sens. Syst.* 2017. V. 6. P. 155–166.
- [3] Kunkel D., Basseri R.J., Makhani M.D., Chong K., Chang C., Pimentel M. // *Dig. Dis. Sci.* 2011. V. 56. P. 1612–1618.
- [4] Jahjah M., Ren W., Stefański P., Lewicki R., Zhang J., Jiang W., Tarka J., Tittel F.K. // *Analyst.* 2014. V. 139. P. 2065–2069.
- [5] Xu G., Moreau V., Chassagneux Y., Bousseksou A., Colombelli R., Patriarche G., Beaudoin G., Sagnes I. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 221101.
- [6] Jouy P., Bonzon C., Wolf J., Gini E., Beck M., Faist J. // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 106. P. 071104.
- [7] Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Курочкин А.С., Дюделев В.В., Колодезный Е.С., Соколовский Г.С., Бугров В.Е., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Денисов Д.В., Ионов А.С., Слипенко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Егоров А.Ю. // *Письма в ЖТФ.* 2019. Т. 45. В. 8. С. 31–33.
- [8] Бабичев А.В., Гусев Г.А., Софронов А.Н., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Усикова А.А., Задиранов Ю.М., Ильинская Н.Д., Неведомский В.Н., Дюделев В.В., Соколовский Г.С., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Егоров А.Ю. // *ЖТФ.* 2018. Т. 88. В. 10. С. 1559–1564.
- [9] Бабичев А.В., Курочкин А.С., Колодезный Е.С., Филимонов А.В., Усикова А.А., Неведомский В.Н., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Егоров А.Ю. // *ФТП.* 2018. Т. 52. В. 6. С. 597–602.
- [10] Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Курочкин А.С., Колодезный Е.С., Соколовский Г.С., Бугров В.Е., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Bousseksou A., Егоров А.Ю. // *ФТП.* 2018. Т. 52. В. 8. С. 954–957.
- [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., Егоров А.Ю. // *Письма в ЖТФ.* 2017. Т. 43. В. 14. С. 64–71.

- [12] *Szerling A., Slivken S., Razeghi M.* // Opto-Electron. Rev. 2017. V. 25. P. 205–208.
- [13] *Бабичев А.В., Bousseksou A., Пихтин Н.А., Тарасов И.С., Никитина Е.В., Софронов А.Н., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Егоров А.Ю.* // ФТП. 2016. Т. 50. В. 10. С. 1320–1324.
- [14] *Дюделев В.В., Лосев С.Н., Мильников В.Ю., Бабичев А.В., Когновицкая Е.А., Слипченко С.О., Лютецкий 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. 10. С. 387–390.