

07.2

## Гетероструктуры квантово-каскадных лазеров спектрального диапазона $4.6 \mu\text{m}$ для реализации непрерывного режима генерации

© А.В. Бабичев<sup>1</sup>, А.Г. Гладышев<sup>1</sup>, В.В. Дюделев<sup>2</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>1–3</sup>, И.И. Новиков<sup>1–3</sup>, Д.В. Денисов<sup>4</sup>, С.О. Слипенченко<sup>2</sup>, А.В. Лютецкий<sup>2</sup>, Н.А. Пихтин<sup>2</sup>, Г.С. Соколовский<sup>2</sup>, А.Ю. Егоров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступило в Редакцию 12 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 12 февраля 2020 г.

Принято к публикации 13 февраля 2020 г.

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии реализована упругосбалансированная гетероструктура квантово-каскадного лазера спектрального диапазона  $4.6 \mu\text{m}$  на основе гетеропары твердых растворов  $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$  и слоев фосфида индия, которые выполняли функцию обкладок волновода. Метод рентгеноструктурного анализа продемонстрировал высокую однородность состава и толщин слоев в каскадах созданной гетероструктуры по площади подложки. Лазеры с четырьмя сколотыми гранями демонстрируют генерацию при комнатной температуре на длине волны излучения вблизи  $4.6 \mu\text{m}$  с относительно низкой плотностью порогового тока  $1.1 \text{ kA}/\text{cm}^2$ .

**Ключевые слова:** сверхрешетки, квантово-каскадный лазер, эпитаксия, фосфид индия.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49371.18243

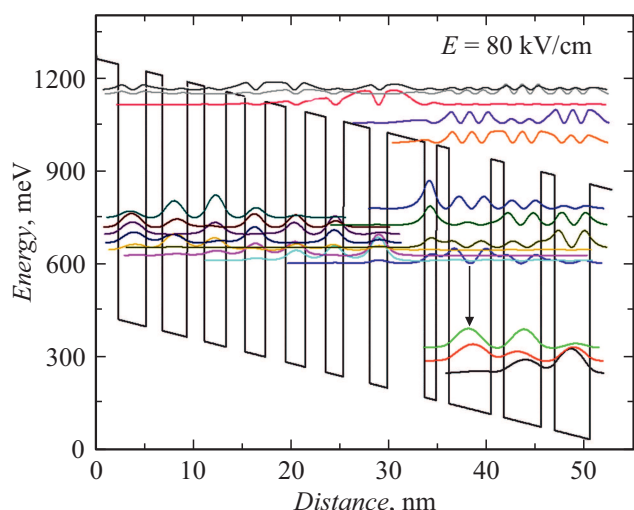
Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) спектрального диапазона  $3.5\text{--}4.8 \mu\text{m}$  попадают в первое окно прозрачности атмосферы, что обуславливает важность их использования для ряда приложений, таких как спектроскопия, газоанализ, медицинская диагностика и хирургия. Ввиду наличия полосы поглощения  $\text{CO}_2$  в диапазоне длин волн  $4.2\text{--}4.4 \mu\text{m}$  окно прозрачности атмосферы подразделяется на два спектральных поддиапазона:  $3.5\text{--}4.2$  и  $4.4\text{--}4.8 \mu\text{m}$ . Созданные системы на основе ККЛ спектрального диапазона  $4.4\text{--}4.8 \mu\text{m}$  демонстрируют большую надежность, компактный размер и меньшую стоимость [1] по сравнению с системами на основе газовых и твердотельных лазеров.

Одной из причин, ограничивающих эффективность ККЛ спектрального диапазона  $4.4\text{--}4.8 \mu\text{m}$ , является тепловой выброс носителей заряда с верхнего уровня размерного квантования в непрерывный спектр („континуум“), обусловленный недостаточным разрывом зоны проводимости на гетерогранице  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  [1]. Для решения данной проблемы применяются механически напряженные гетеропары [2,3], конструкции активных областей с дополнительными слоями  $\text{AlAs}$  [4], а также слои с переменной высотой потенциальных барьеров [5]. Два последних подхода в случае использования метода молекулярно-пучковой эпитаксии требуют использования дополнительных источников металлов во время эпитаксиального процесса.

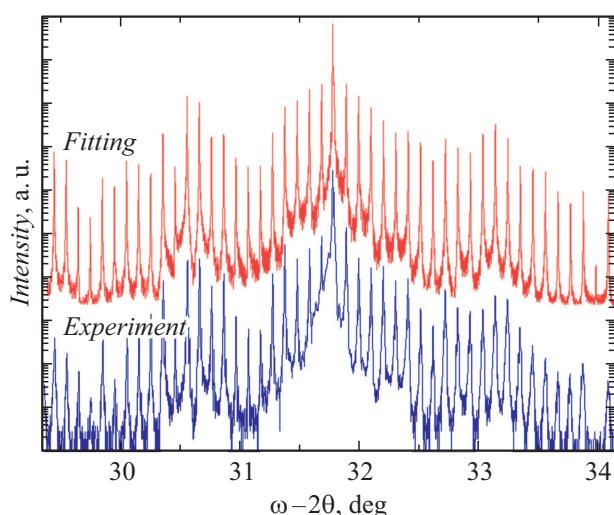
В настоящей работе представлены результаты реализации упругосбалансированных гетероструктур ККЛ спектрального диапазона  $4.6 \mu\text{m}$ , выращенных ме-

тодом молекулярно-пучковой эпитаксии, с активной областью, построенной на базе гетеропары  $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$ , а также ККЛ на их основе.

Гетероструктура ККЛ была выращена компанией „Коннектор Оптик“ на промышленной установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber 49, оснащенной твердотельным источником мышьяка, фосфора крекерного типа и источниками марки ABI 1000 для создания потоков галлия и индия [6–8]. В качестве подложки использовались пластины  $\text{InP}$  с ориентацией (001), легированные серой до уровня  $n = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Слой фосфида индия толщиной  $3 \mu\text{m}$ , легированный кремнием до уровня  $n = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , выполнял функцию нижней обкладки волновода. Активная область включала 30 каскадов на основе гетеропары твердых растворов  $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$ . Согласно теоретической оценке, за счет использования механически напряженной гетеропары  $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$  удастся повысить разрыв зоны проводимости на гетерогранице на  $310\text{--}330 \text{ meV}$  (до  $800\text{--}820 \text{ meV}$ ) по сравнению со случаем использования механически ненапряженной гетеропары  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  [6], что позволяет уменьшить „надбарьерный“ выброс носителей заряда. Толщина слоев  $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$  выбиралась с учетом соображений компенсации механического напряжения слоев в каскаде для формирования упругосбалансированной гетероструктуры. Конструкция каскада активной области представлена на рис. 1. Наряду с профилем зоны проводимости приведены квадраты волновых функций в слоях каскада расчетной конструкции с двухфононным резонансным рассеянием носителей



**Рис. 1.** Результаты численного расчета профиля зоны проводимости, а также квадратов волновых функций в слоях каскада активной области при напряженности электрического поля 80 kV/cm.



**Рис. 2.** Рентгенодифракционная кривая гетероструктуры ККЛ (нижняя кривая), а также результат численного расчета (верхняя кривая).

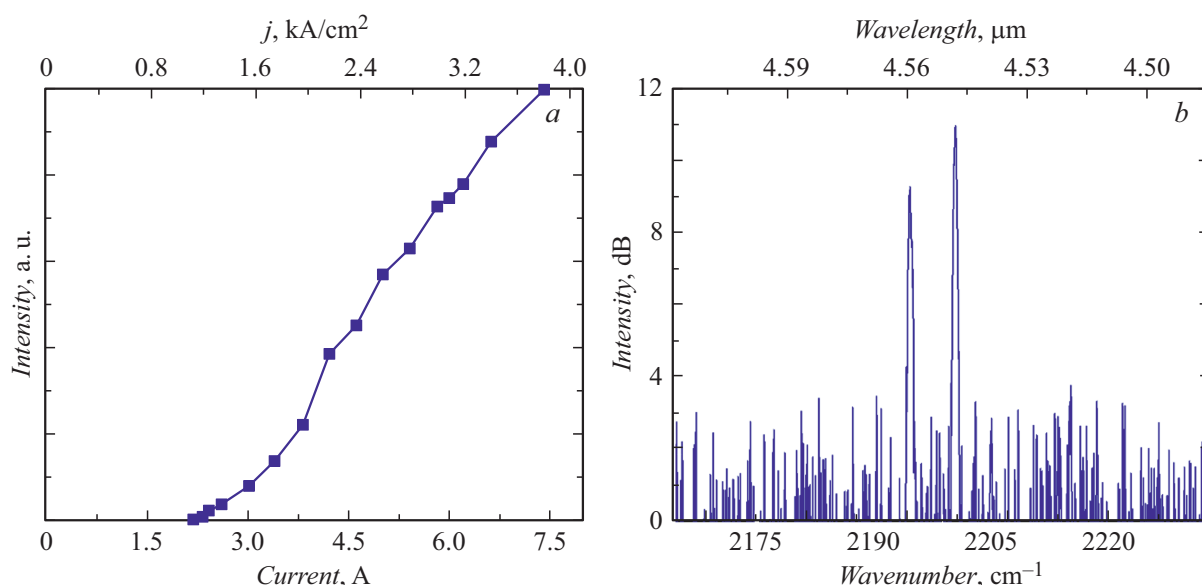
заряда [9]. Стрелкой на рис. 1 отмечен излучательный переход с энергией кванта 271 meV, что соответствует длине волны  $4.57 \mu\text{m}$ . Суммарная толщина слоев в одном каскаде составила 50.4 nm. Верхняя обкладка волновода была сформирована на основе слоев фосфида индия толщиной 2 и  $1 \mu\text{m}$  с уровнем легирования  $1 \cdot 10^{17}$  и  $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  соответственно. В качестве контактного слоя использован слой  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  толщиной 200 nm с уровнем легирования  $2.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Структурное качество гетероструктуры, а также толщина слоев в каскадах оценивались методом рентгеновской дифрактометрии. Измерения спектров рентгеновской дифракции были проведены вблизи симметрич-

ного рефлекса (004) InP на дифрактометре PANalytical X'PertPro в параллельной геометрии пучка рентгеновского излучения [3,10]. На рис. 2 представлена экспериментальная кривая качания, измеренная в центре пластины (нижняя кривая), вместе с результатами численного моделирования. На рентгенодифракционной кривой наблюдается полное совпадение нулевого пика сателлитной структуры с положением пика от подложки InP. Данный факт свидетельствует о точном соответствии химического состава эпитаксиальных слоев заданным значениям, приведенным в ростовой спецификации. На кривой качания наблюдается наличие 49 пиков-сателлитов, характерных для периодической структуры каскадов. Анализ кривой дает довольно малое значение средней ширины на полувысоте (FWHM) пиков-сателлитов ( $16 \pm 2''$ ) по сравнению с ранее представленными результатами ( $29-40''$ ) [11-13], что свидетельствует о высокой однородности состава и толщин различных каскадов в полученной гетероструктуре. На основании положения 24 пиков-сателлитов была проведена оценка средней толщины каскада, которая составила  $50.4 \pm 0.6 \text{ nm}$ . Проведено измерение рентгенодифракционных кривых на удалении в 14 mm от центра подложки. Согласно результатам моделирования, отклонение средней толщины каскадов не превышает 0.4% в сравнении с центром подложки, что свидетельствует о высокой однородности слоев по поверхности гетероструктуры. Таким образом, данные рентгенодифракционного анализа свидетельствуют о высоком структурном совершенстве созданной гетероструктуры и полном соответствии толщин и составов слоев в каскадах заданным в ростовой спецификации.

Для исследования электролюминесцентных свойств были сформированы ККЛ с четырьмя сколотыми гранями и сплошным металлическим контактом с размерами  $(390 \times 500) \pm 18 \mu\text{m}$  [3]. Монтаж образцов осуществлялся эпитаксиальной поверхностью на медный теплоотвод. Спектральные характеристики ККЛ исследовались при накачке импульсами тока длительностью  $\sim 75 \text{ ns}$  с частотой повторения 48 kHz при помощи монохроматора МДР-23 с дифракционной решеткой  $150 \text{ mm}^{-1}$ . Температура теплоотвода была стабилизирована на уровне  $15^\circ\text{C}$ . Излучение регистрировалось охлаждаемым фотоприемником Vigo PVI-4TE-10.6 с использованием техники синхронного детектирования [14]. Проведенные спектральные измерения показали наличие генерации вблизи  $4.6 \mu\text{m}$  (рис. 3). В спектре генерации присутствуют две оптические моды. Межмодовое расстояние составило 11.4 nm. Зависимость интегральной интенсивности излучения при накачке импульсами тока длительностью  $\sim 75 \text{ ns}$  с частотой повторения 48 kHz представлена на рис. 3. Пороговое значение тока составило 2.2 A, что соответствует низкой плотности порогового тока ( $1.1 \text{ kA/cm}^2$ ). Пороговое напряжение в лазерах составило 6 V.

Как показано ранее, высокое модальное усиление (на уровне  $3 \text{ cm/kA}$  [15]) позволяет реализовать генерацию



**Рис. 3.** Зависимость интегральной интенсивности излучения от тока накачки (а), а также спектр генерации (б) ККЛ с четырьмя сколотыми гранями.

в ККЛ с четырьмя сколотыми гранями при комнатной температуре [16], а также высокую выходную оптическую мощность в лазерах полосковой конструкции на уровне 1 W с одного зеркала [17].

Достигнутая в рамках работы генерация ККЛ с четырьмя сколотыми гранями при комнатной температуре с малой величиной плотности порогового тока по сравнению с данными [16] свидетельствует о высоком модалном усилении активной области созданной гетероструктуры и перспективе использования данного класса гетероструктур на основе механически напряженной гетеропары  $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$  для реализации непрерывной генерации ККЛ спектрального диапазона 4.6  $\mu\text{m}$ .

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0318).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Lyakh A., Maulini R., Tsekoun A., Go R., Von der Porten S., Pflugl C., Diehl L., Capasso F., Patel C.K.N. // Proc. Natl. Acad. Sci. 2010. V. 107. N 44. P. 18799–18802. DOI: 10.1073/pnas.1013250107
- [2] Suttinger M., Kaspi R., Lyakh A. High-brightness quantum cascade lasers // Mid-infrared optoelectronics: materials, devices, and applications. Cambridge, UK: Woodhead Publ., 2020. P. 181–205. DOI: 10.1016/b978-0-08-102709-7.00005-x
- [3] Егоров А.Ю., Бабичев А.В., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Никитина Е.В., Tchernycheva M., Софронов А.Н., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Пухтин Н.А., Тарасов И.С. // ФТП. 2015. Т. 49. В. 11. С. 1574–1577. [Пер. версия: 10.1134/s106378261511007x].
- [4] Razeghi M., Zhou W., Slivken S., Lu Q.-Y., Wu D., McClintock R. // Appl. Opt. 2017. V. 56. N 31. P. H30–H44. DOI: 10.1364/ao.56.000h30
- [5] Botez D., Kirch J.D., Boyle C., Oresick K.M., Sigler C., Kim H., Knipfer B.B., Ryu J.H., Lindberg D., Earles T., Mawst L.J., Flores Y.V. // Opt. Mater. Express. 2018. V. 8. N 5. P. 1378–1398. DOI: 10.1364/ome.8.001378
- [6] 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. DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49371.18243 [Пер. версия: 10.1134/s1063782618080031].
- [7] 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., Денисов Д.В. // ФТП. 2018. Т. 52. В. 6. С. 597–602. DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49371.18243 [Пер. версия: 10.1134/s1063782618060039].
- [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. 1559–1563. DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49371.18243 [Пер. версия: 10.1134/s1063784218100043].
- [9] Hofstetter D., Beck M., Aellen T., Faist J. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. N 4. P. 396–398. DOI: 10.1063/1.1340865
- [10] Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Денисов Д.В., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Bouley L., Bousseksou A., Пухтин Н.А., Егоров А.Ю. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. В. 2. P. 278–282. DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49371.18243 [Пер. версия: 10.1134/s0030400x19080058].

- [11] *Slivken S., Matlis A., Jelen C., Rybaltowski A., Diaz J., Razeghi M.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. N 2. P. 173–175. DOI: 10.1063/1.123284
- [12] *Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Филимонов А.В., Неведомский В.Н., Курочкин А.С., Колодезний 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. DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49371.18243 [Пер. версия: 10.1134/s1063785017070173].
- [13] *Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Курочкин А.С., Колодезний Е.С., Неведомский В.Н., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Софронов А.Н., Егоров А.Ю.* // ФТП. 2019. Т. 53. В. 3. С. 365–369. DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49371.18243 [Пер. версия: 10.1134/s1063782619030023].
- [14] *Дюделев В.В., Лосев С.Н., Мыльников 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. 3. С. 387–390. DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49371.18243 [Пер. версия: 10.1134/s0030400x18090096].
- [15] *Бабичев А.В., Пашиев Д.А., Гладышев А.Г., Курочкин А.С., Колодезний Е.С., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Денисов Д.В., Дюделев В.В., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Егоров А.Ю.* // Оптика и спектроскопия. В печати.
- [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., Nevedomsky V.N., Slipchenko S.O., Lutetskiy A.V., Sofronov A.N., Firsov D.A., Vorobjev L.E., Pikhtin N.A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1124. N 4. P. 041029. DOI: 10.1088/1742-6596/1124/4/041029
- [17] *Dudelev V.V., Mikhailov D.A., Babichev A.V., Andreev A.D., Losev S.N., Kognovitskaya E.A., Bobretsova Yu.K., Slipchenko S.O., Pikhtin N.A., Gladyshev A.G., Denisov D.V., Novikov I.I., Karachinsky L.Ya., Kuchinskii V.I., Egorov A.Yu., Sokolovskii G.S.* // Quantum Electron. 2020. V. 50. N 2. P. 141–142. DOI: 10.1070/QEL17168