

07.2

Квантово-каскадные лазеры с распределенным брэгговским отражателем, сформированным методом ионно-лучевого травления

© А.В. Бабичев¹, Д.А. Пашнев^{2,3}, А.Г. Гладышев⁴, Д.В. Денисов⁵, Г.В. Вознюк¹, Л.Я. Карачинский^{1,4,6}, И.И. Новиков^{1,4,6}, М.И. Митрофанов¹, В.П. Евтихийев¹, Д.А. Фирсов², Л.Е. Воробьев², Н.А. Пихтин¹, А.Ю. Егоров⁶

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³ Center for Physical Sciences and Technology, Vilnius, Lithuania

⁴ ООО „Коннектор Оптикс“, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступило в Редакцию 29 ноября 2019 г.

В окончательной редакции 24 декабря 2019 г.

Принято к публикации 25 декабря 2019 г.

Продемонстрирована одночастотная лазерная генерация квантово-каскадных лазеров с распределенным брэгговским отражателем, сформированным методом ионно-лучевого травления в слоях верхней обкладки волновода. Активная область сформирована на основе гетеропары твердых растворов $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ с двухфононным опустошением нижнего уровня в каскаде. Одночастотная генерация при температуре 280 К соответствовала длине волны излучения $7.74 \mu\text{m}$, коэффициент подавления боковых мод составил 24 dB.

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

DOI: 10.21883/PJTF.2020.07.49211.18135

К настоящему времени представлен ряд подходов по формированию одночастотных квантово-каскадных лазеров (ККЛ). Формирование решетки на поверхности волновода, обеспечивающей распределенную обратную связь (РОС), позволило впервые реализовать одночастотный режим генерации в ККЛ [1]. Конструкция внешнего резонатора дала возможность реализовать перестройку длины волны излучения в широком диапазоне [2]. Альтернативные подходы по селекции оптических мод высшего порядка основаны на использовании фотонных кристаллов [3], интерферометров Маха-Цендера, кольцевых [4], связанных [5,6], а также монолитно связанных резонаторов [7–9].

Формирование РОС-лазеров обеспечивает высокий коэффициент подавления боковых мод (SMSR). В свою очередь невозможность точного задания длины резонатора при скальвании зеркал приводит к непреднамеренному сдвигу фазы. Как следствие, в спектре генерации возникают дополнительные моды, что снижает процент выхода годных приборов [10]. Использование распределенных брэгговских отражателей (РБО) [11–14] исключает эффект пространственного выжигания дыр („spatial hole burning“), наблюдаемый в длинных РОС-лазерах. Ранее одночастотный режим генерации в ККЛ с РБО был реализован в спектральном диапазоне $4.5\text{--}5.0 \mu\text{m}$ [11,13].

В настоящей работе представлены результаты по формированию и исследованию ККЛ с РБО спектрального диапазона $7.5\text{--}8.0 \mu\text{m}$, работающих при комнатной

температуре. Гетероструктура ККЛ была выращена на подложке InP с ориентацией (001) компанией „Коннектор Оптикс“ на промышленной установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber 49 [15,16]. Использована конструкция волновода с тонкой верхней обкладкой толщиной 750 nm на основе фосфида индия. Активная область сформирована на основе гетеропары твердых растворов $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ с двухфононным опустошением нижнего уровня в каскаде [17].

Формирование кристалла ККЛ проводилось по методике, аналогичной описанной ранее [18]. Использована конструкция глубокой мезы с затравом в подложку. Ширина полоска вблизи поверхности гетероструктуры составила $20 \mu\text{m}$, длина лазерного резонатора $L = 1.5 \text{ mm}$. Отражающее и антиотражающее покрытия на сколотые грани лазера не наносились. Монтаж кристалла производился подложкой на медный теплоотвод при помощи индиевого припоя. Травление решетки РБО вблизи заднего зеркала лазера (рис. 1) проведено в сверхвысоком вакууме фокусированным пучком ионов галлия с энергией 30 keV (рабочий ток 450 pA), сфокусированным в пятно диаметром 40 nm ; величина шероховатости травленной поверхности не превышала 2 nm [19]. Доза облучения области РБО при травлении составляла 1.75 pC/cm^2 . Период решетки РБО был равен $1.14 \mu\text{m}$. Сквозность решетки была выбрана равной 50% [20]. При ширине штриха решетки $0.57 \mu\text{m}$ длина штриха в перпендикулярном направлении составила $10 \mu\text{m}$. Было нанесено 176 штрихов с суммарной длиной области решетки РБО,

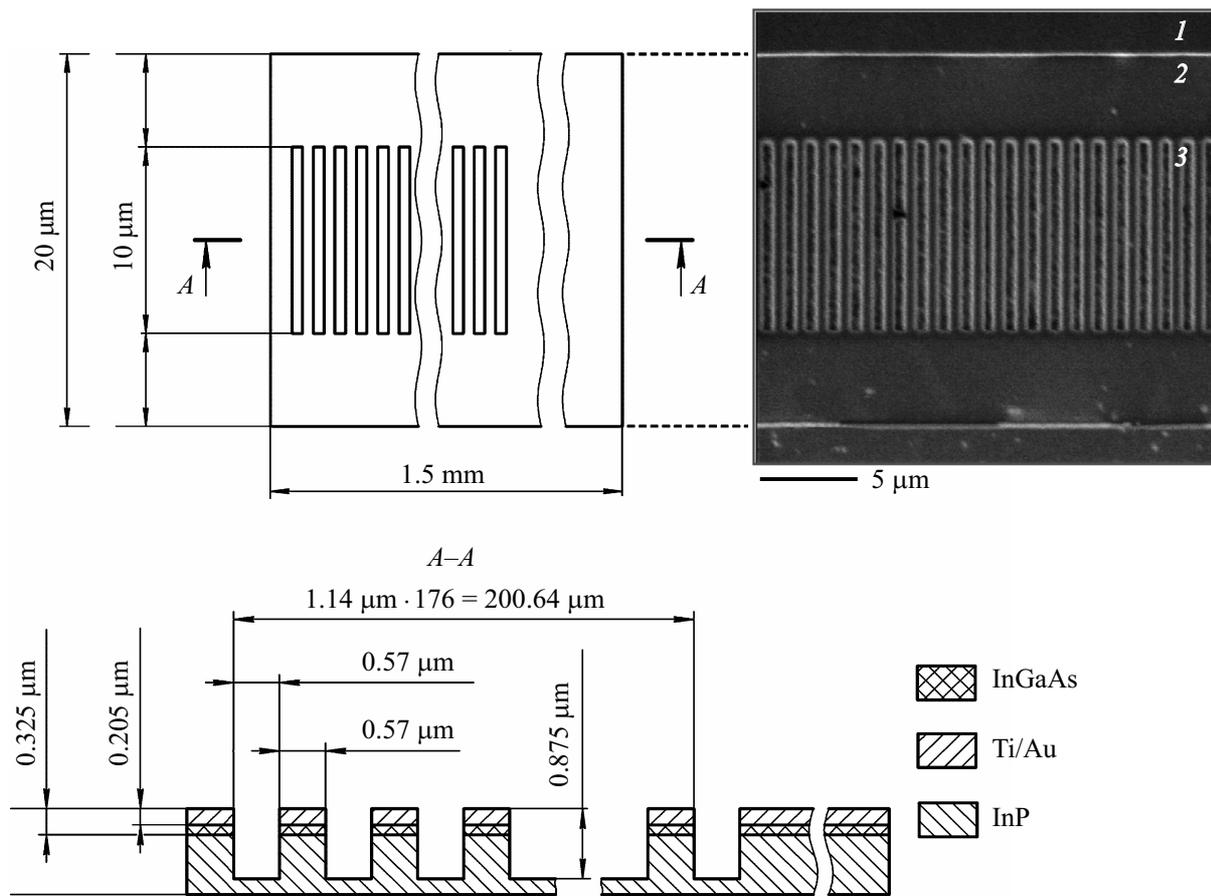


Рис. 1. Схематический вид области РВО (вид сверху и вид сбоку), а также СЭМ-изображение области РВО (вид сверху). 1 — область вблизи края полоска, покрытая диэлектриком, с последующим нанесением металлизации на ее поверхность, 2 — область токовой накачки лазера, 3 — область решетки РВО.

равной $200.64 \mu\text{m}$. В области решетки РВО проведено удаление верхней металлизации толщиной 205 nm , контактного слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 120 nm , а также части верхней обкладки волновода на глубину 550 nm . Суммарная глубина при травлении РВО составила порядка 875 nm . Изображение сформированной решетки РВО, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), представлено на рис. 1.

Вольт-амперные характеристики измерялись при пропускании импульсов тока длительностью 125 ns с частотой следований 15 kHz . Типичный вид вольт-амперной и ватт-амперной характеристик ККЛ с РВО, измеренных при 280 K , представлен на рис. 2. Пороговый ток и плотность порогового тока составили 2.65 A и 8.6 kA/cm^2 соответственно. Пороговый ток лазера до вытравливания решетки РВО был равен 1.7 A . Таким образом, формирование решетки РВО привело к увеличению порогового тока на 55% , что может быть связано не только с оптическими потерями, вносимыми РВО, но и с радиационными дефектами при бомбардировке поверхности ионами галлия во время процесса травления РВО.

Спектры стимулированного излучения ККЛ измерялись с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v .

Спектральное разрешение составляло 0.2 cm^{-1} . Детектирование оптического сигнала проводилось с помощью охлаждаемого фотоприемника HgCdTe (быстродействие порядка 10 ns). Сигнал с фотодетектора измерялся внешним аналого-цифровым преобразователем каждые 10 s с синхронизацией по импульсам тока и усреднялся по 20 измерениям [21]. Длительность и частота повторения импульсов составили 125 ns и 15 kHz соответственно.

На рис. 3 представлены спектры лазерного излучения, измеренные при 280 K . При токе накачки 2.65 A в спектре генерации вблизи $7.74 \mu\text{m}$ наблюдаются три продольные оптические моды, отстоящие друг от друга на расстояние $5.4\text{--}5.8 \text{ nm}$, что соответствует межмодовому расстоянию резонатора Фабри–Перо длиной 1.5 mm . Коэффициент подавления боковых мод составил 7 dB . Ширина линий на полувысоте (FWHM) равнялась 1.7 nm . Повышение уровня токовой накачки до 2.73 A приводит к подавлению боковых мод и возникновению одночастотной генерации с SMSR на уровне 24 dB (рис. 3). Значение FWHM составило 1.7 nm . Увеличение тока до 2.8 A приводит к снижению величины SMSR до 15 dB . При токе накачки 3 A и выше в спектре генерации

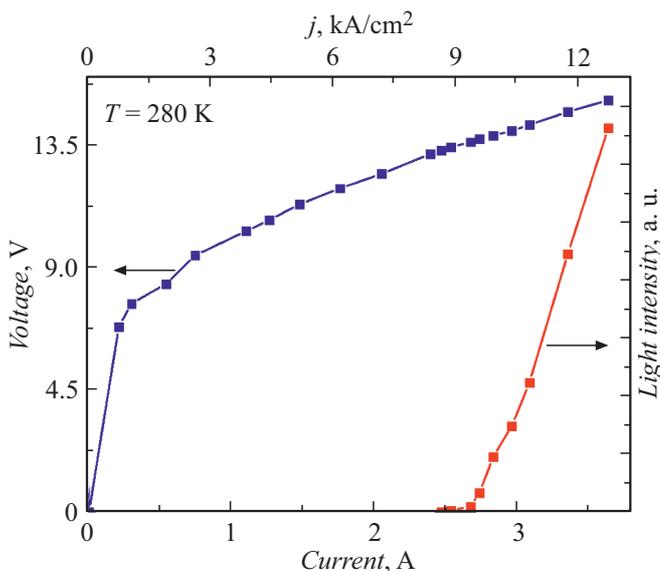


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ККЛ с РБО (левая ось) и ватт-амперная характеристика ККЛ с РБО (правая ось).

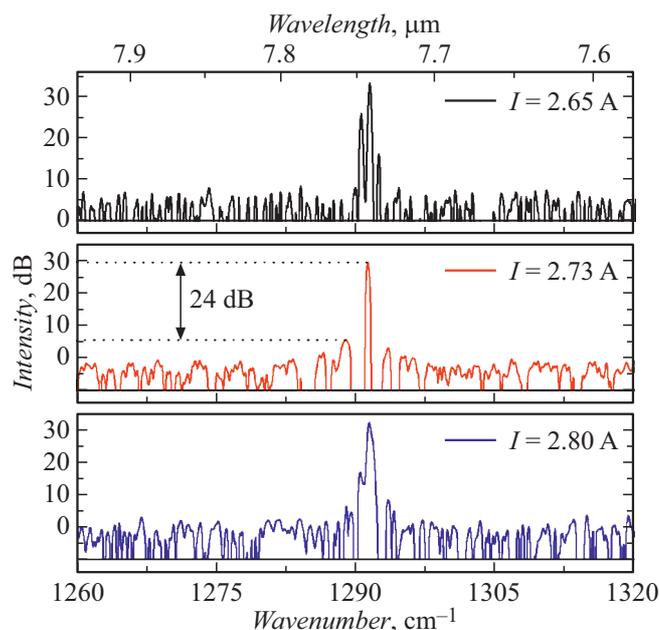


Рис. 3. Спектры генерации ККЛ с РБО при различном уровне токовой накачки.

наблюдаются дополнительные оптические моды вблизи $7.77 \mu\text{m}$.

Таким образом, представлены результаты по формированию и исследованию параметров ККЛ с решеткой РБО спектрального диапазона $7.5\text{--}8.0 \mu\text{m}$. Продемонстрирована одночастотная генерация при температуре 280 К на длине волны излучения $7.74 \mu\text{m}$. Максимально достигнутый коэффициент подавления боковых мод составил 24 dB. Ширина линии на полувысоте в спектре лазерной генерации составила 0.3 cm^{-1} , что обеспечивает

возможность изготовления перестраиваемых источников лазерного излучения среднего инфракрасного диапазона на основе линейки одночастотных ККЛ с решетками РБО, которые требуются в спектроскопии и газоанализе.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-29-03289. Д.А. Фирсов, Л.Е. Воробьев благодарят за частичную поддержку исследований Минобрнауки России (государственное задание № 3.933.2017/4.6).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Faist J., Gmachl C., Capasso F., Sirtori C., Sivco D.L., Baillargeon J.N., Cho A.Y. // *Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 70. P. 2670–2672.
- [2] Luo G.P., Peng C., Le H.Q., Pei S.S., Hwang W.-Y., Ishaug B., Um J., Baillargeon J.N., Lin C.-H. // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. P. 2834–2836.
- [3] Semmel J., Nähle L., Höfling S., Forchel A. // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 071104.
- [4] Wu D.H., Razeghi M. // *APL Mater.* 2017. V. 5. P. 035505.
- [5] Wakayama Y., Iwamoto S., Arakawa Y. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 171104.
- [6] Liu P.Q., Wang X., Gmachl C.F. // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. P. 161115.
- [7] Zheng M.C., Zhang Y.M., Liu P.Q., Wang X., Fan J.-Y., Troccoli M., Gmachl C.F. // *Opt. Eng.* 2017. V. 57. P. 011001.
- [8] 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., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пухтин Н.А., Егоров А.Ю. // *Письма в ЖТФ.* 2019. Т. 45. В. 8. С. 31–33.
- [9] Бабичев А.В., Пашнев Д.А., Денисов Д.В., Гладышев А.Г., Бобрецова Ю.К., Слипченко С.О., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Пухтин Н.А., Егоров А.Ю. // *Оптика и спектроскопия.* В печати.
- [10] Liu Y., Zhang J., Yan F., Jia Z., Liu F., Liang P., Zhuo N., Zhai S.-Q., Wang L.-J., Liu J.-Q., Liu S.-M., Wang Z. // *Opt. Express.* 2016. V. 24. P. 19545.
- [11] Bismuto A., Bidaux Y., Blaser S., Terazzi R., Gresch T., Rochat M., Muller A., Bonzon C., Faist J. // *Opt. Express.* 2016. V. 24. P. 10694.
- [12] Song S., Howard S.S., Liu Z., Dirisu A.O., Gmachl C.F., Arnold C.B. // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 041115.
- [13] Sadeghi A., Liu P.Q., Wang X., Fan J., Troccoli M., Gmachl C.F. // *Opt. Express.* 2013. V. 21. P. 31012.
- [14] Sergachev I., Maulini R., Gresch T., Blaser S., Bismuto A., Müller A., Bidaux Y., Südmeyer T., Schilt S. // *Opt. Express.* 2017. V. 25. P. 11027.

- [15] *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.
- [16] *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.
- [17] *Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Денисов Д.В., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Boulley L., Bousseksou A., Пихтин Н.А., Егоров А.Ю.* // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. В. 2. С. 278–282.
- [18] *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.
- [19] *Pozina G., Ivanov K.A., Mitrofanov M.I., Kaliteevski M.A., Morozov K.M., Levitskii I.V., Voznyuk G.V., Evtikhiev V.P., Rodin S.N.* // Phys. Status Solidi B. 2019. V. 256. P. 1800631.
- [20] *Bousseksou A., Moreau V., Colombelli R., Sirtori C., Patriarche G., Mauguin O., Largeau L., Beaudoin G., Sagnes I.* // Electron. Lett. 2008. V. 44. P. 807–808.
- [21] *Бабичев А.В., Пашнев Д.А., Гладышев А.Г., Курочкин А.С., Колодезный Е.С., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Денисов Д.В., Boulley L., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Пихтин Н.А., Bousseksou A., Егоров А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 22. С. 21–23.