

09;07.3

## Мощный перестраиваемый квантово-каскадный лазер

© В.В. Дюделев<sup>1</sup>, Е.Д. Черотченко<sup>1</sup>, И.И. Врубель<sup>1</sup>, Д.А. Михайлов<sup>1</sup>, Д.В. Чистяков<sup>1</sup>, С.Н. Лосев<sup>1</sup>, А.В. Бабичев<sup>1</sup>, А.В. Лютецкий<sup>1</sup>, С.О. Слипченко<sup>1</sup>, Н.А. Пихтин<sup>1</sup>, А.Г. Гладышев<sup>2</sup>, К.А. Подгаецкий<sup>3</sup>, А.Ю. Андреев<sup>3</sup>, И.В. Яроцкая<sup>3</sup>, М.А. Ладугин<sup>3</sup>, А.А. Мармалюк<sup>3</sup>, И.И. Новиков<sup>2,4</sup>, Д.С. Папылев<sup>4</sup>, С.А. Чахлов<sup>5-7</sup>, В.И. Кучинский<sup>1</sup>, Л.Я. Карачинский<sup>2,4</sup>, А.Ю. Егоров<sup>2</sup>, Г.С. Соколовский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> АО „НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия

<sup>4</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>6</sup> Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в г. Саров, Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>7</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

E-mail: v.dudelev@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 24 сентября 2024 г.

Принято к публикации 24 сентября 2024 г.

Проведены исследования квантово-каскадного лазера с внешним резонатором в схеме Литтрова с выходной мощностью до 1.5 W. Показано, что использованная схема построения резонатора позволяет получить одночастотную генерацию с непрерывной перестройкой более  $100 \text{ cm}^{-1}$  без просветления зеркал квантово-каскадного лазера.

**Ключевые слова:** интегральная оптика, квантово-каскадный лазер.

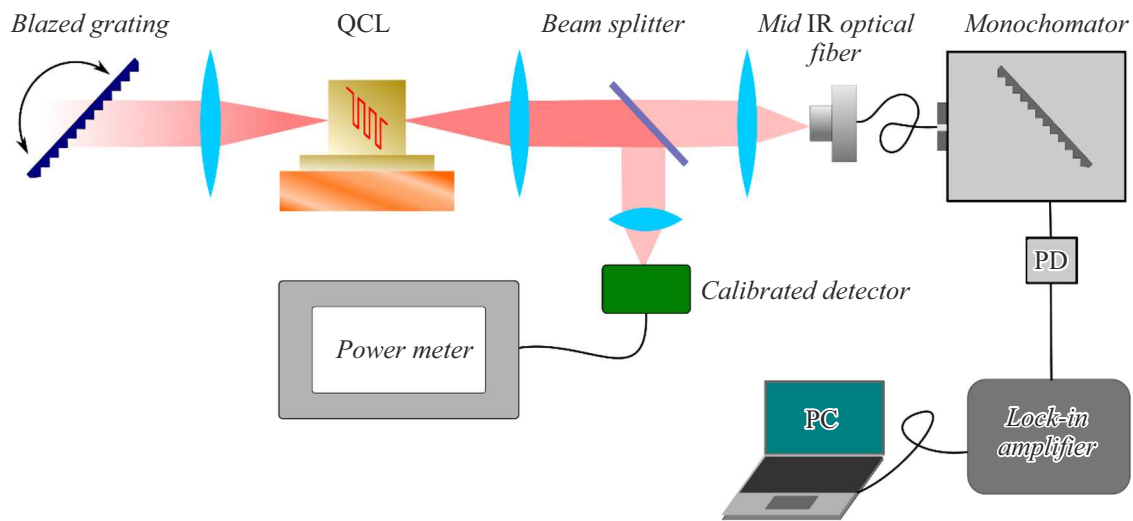
DOI: 10.61011/PJTF.2024.22.59140.20116

Развитие методов газового анализа в среднем инфракрасном диапазоне является ключевым фактором дальнейших исследований и совершенствования квантово-каскадных лазеров (ККЛ), предложенных как концепция еще в 1971 г. Сурисом и Казариновым [1] и впервые реализованных на практике в 1994 г. Капассо с коллегами [2]. К настоящему времени достигнут существенный прогресс в их технологии. В частности, для спектрального диапазона 4–5  $\mu\text{m}$  получены выходные импульсные мощности свыше 200 W [3], а для непрерывного режима продемонстрирована эффективность свыше 20% при выходной мощности свыше 5 W [4]. Для длинноволновых ККЛ с длиной волны генерации более 7  $\mu\text{m}$  прогресс также очевиден: к настоящему моменту продемонстрированы импульсные мощности свыше 15 W [5,6] и эффективность свыше 10% при выходной мощности более 1 W в непрерывном режиме [7].

Однако для многих приложений ККЛ, связанных с детектированием веществ в среднем инфракрасном диапазоне, требуется узкий спектр генерации для обнаружения требуемой спектральной линии [8] при близком расположении линий поглощения различных веществ. Кроме того, задачи удаленного мониторинга химических веществ и гиперспектральной визуализации требуют спектральной перестройки в значительном диапазоне [9]. Хотя некоторые приложения не накладывают строгих требований на спектр генерации перестраиваемых ККЛ [10], для большинства задач и, в частности, для гиперспектральной визуализации [11] требуется

одночастотная генерация перестраиваемых ККЛ для обеспечения необходимого спектрального разрешения измерений. В то же время для обеспечения достаточной чувствительности систем удаленного мониторинга химических веществ и систем промышленной безопасности необходимы одночастотные перестраиваемые ККЛ, имеющие сравнительно высокую выходную мощность для компенсации потерь, связанных с дифракционной расходимостью и рассеянием при прохождении излучением значительного расстояния в атмосфере.

В настоящее время основным подходом для реализации мощных перестраиваемых ККЛ в широком спектральном диапазоне является применение внешнего резонатора, содержащего спектрально-селективный элемент. Это могут быть как резонаторы с решеткой, построенные по схемам Литтрова и Литтмана, так и резонаторы на акустооптических модуляторах [12]. ККЛ с внешним резонатором по схеме Литтрова продемонстрировали максимальную спектральную перестройку в диапазоне 900–1300  $\text{cm}^{-1}$  при выходной пиковой мощности до 0.75 W [13]. Также в этой схеме были получены максимальные мощности в непрерывном режиме генерации [14]. Недостатком примененной в этих работах классической схемы Литтрова является расположение дифракционной решетки на переднем просветленном выходном зеркале. При этом вывод излучения осуществляется в нулевом порядке дифракции, что приводит к изменению направления распространения выводимого



**Рис. 1.** Схематическое изображение установки для исследования характеристик перестраиваемого ККЛ с внешним резонатором по схеме Литтрова.

излучения при перестройке резонатора, осуществляемой поворотом решеток.

В настоящей работе представлены исследования ККЛ с внешним резонатором, расположенным на заднем выходном зеркале ККЛ, построенным по схеме Литтрова. Чипы ККЛ, используемые во внешнем резонаторе, были изготовлены из структуры с напряженно-сбалансированной активной областью на основе трех типов твердых растворов:  $\text{Al}_{0.63}\text{In}_{0.37}\text{As}/\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  [6,15]. Выбор гетероструктуры был обусловлен тем, что она обладает широким спектром усиления, что хорошо видно на спектрах генерации четырехсклоотых образцов [15], демонстрирующих генерацию в широком спектральном диапазоне от 6.9 до 8.1  $\mu\text{m}$ . Гетероструктура подвергалась стандартной постростовой обработке [16]. Гребневые волноводы ККЛ были образованы травлением двух мезоканавок сквозь активную область. Подробнее процедура постростовой обработки описана в [17]. Ширина полосков используемых чипов ККЛ составляла 16  $\mu\text{m}$ , а длина — 5 mm, что соответствовало длине теплоотвода и обеспечивало полный доступ к выходным зеркалам. Выходные зеркала были образованы сколами по кристаллографическим осям и никак не обрабатывались. Чип монтировался на первичный медный теплоотвод эпитаксиальным слоем вниз, что обеспечивало лучший отвод тепла от активной области. Температура ККЛ стабилизировалась на 298 K с помощью термоэлектрического охладителя. Исследования характеристик ККЛ проводились в импульсном режиме. Длительность импульсов накачки составляла 100 ns при частоте следования импульсов 48 kHz.

Излучение, выходящее с заднего выходного зеркала ККЛ, собиралось асферической линзой с числовой апертурой 0.75, изготовленной из германиевого сплава, и коллимировалось на дифракционную решетку обратной

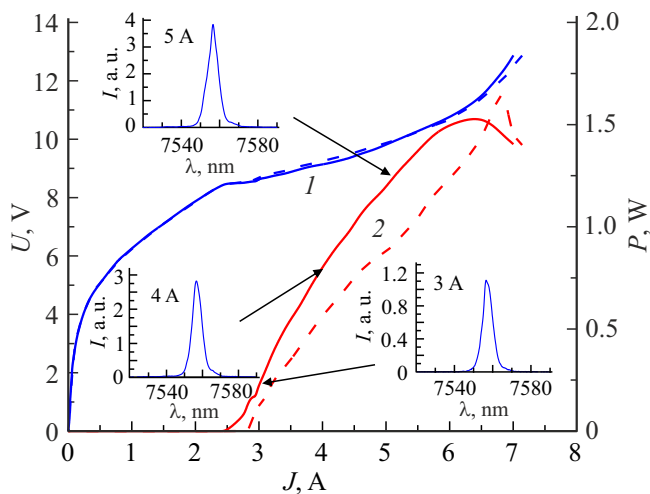
связи с углом блеска в первом порядке дифракции и шагом решетки  $150\text{ mm}^{-1}$ . Рабочие поверхности коллимирующей линзы были покрыты антиотражающим покрытием. Коэффициент отражения от поверхностей линзы в рабочей спектральной области перестраиваемого ККЛ составлял менее 1%. Коэффициент отражения в первом порядке дифракции составлял  $\sim 90\%$ . Достоинством примененной схемы было расположение вращающейся решетки обратной связи на заднем торце резонатора, что обеспечивает хорошую эффективность устройства, одновременно открывая легкий доступ к переднему зеркалу ККЛ. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Излучение с переднего торца ККЛ коллимировалось такой же асферической линзой и направлялось на делитель пучка, разделяющий выходное излучение в пропорции 20/80. Большая часть излучения направлялась на калиброванный детектор для измерения выходной оптической мощности, а меньшая вводилась в оптическое волокно для среднего инфракрасного диапазона на основе бромида серебра с диаметром сердцевины 200  $\mu\text{m}$  и использовалась для измерения спектра генерации перестраиваемого ККЛ. Другой конец оптического волокна стыковался с входной щелью монохроматора. На выходе монохроматора был установлен КРТ-фотодетектор (КРТ — кадмий—ртуть—теллур) с четырехстадийным охлаждением, подключенный к синхронному усилителю, что обеспечивало высокую чувствительность измерительной системы.

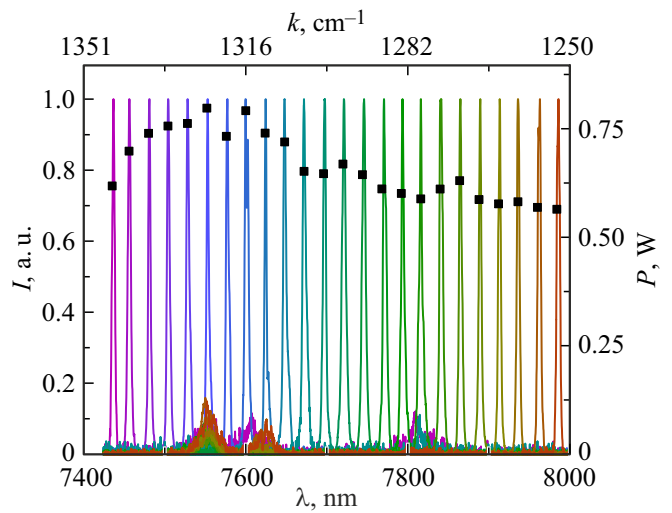
Сначала были проведены исследования ватт-амперных и вольт-амперных характеристик ККЛ с внешним резонатором и без него. Результаты исследований представлены на рис. 2. Хорошо видно снижение порога генерации ККЛ более чем на 0.5 A при работе во внешнем резонаторе, что связано со значительным снижением потерь на выход, так как решетка обеспечивает хорошее

отражение назад в первом порядке, а вся оптическая система обратной связи — хороший коэффициент ввода излучения в волновод ККЛ. Максимальные мощности в обоих режимах составили около 1.5 W. Измерения ватт-амперной характеристики во внешнем резонаторе проводились на пике кривой усиления. На вставках к рис. 2 приведены спектры генерации ККЛ с внешним резонатором при токах накачки 3, 4 и 5 А. Хорошо видно сужение спектра генерации до нескольких нанометров, что соответствует разрешению монохроматора. Столь узкий спектр генерации указывает на одномодовый режим генерации. Наилучшее подавление боковых мод наблюдалось при токе накачки 4 А. При этом величина подавления боковых мод составляла около 10 dB. Дальнейшее повышение величины подавления боковых мод требует улучшения постростового процесса обработки пластин ККЛ, направленной на лучшее подавление возможной генерации латеральных волноводных мод высшего порядка. Данное направление имеет два технологических подхода. Первый состоит в обеспечении селективного зарастивания фосфидом индия канавок, формирующих гребневый полосок ККЛ, а второй предполагает уменьшение ширины сердцевин волновода за счет травления узких полосков с вертикальными стенками. Оба эти подхода будут предметом наших дальнейших исследований.

Амплитуда тока накачки 4 А была выбрана для исследований спектральной перестройки излучения ККЛ за счет поворота дифракционной решетки. На рис. 3 представлены спектры генерации, записанные через равные спектральные промежутки. Для каждой точки фиксировалась выходная мощность. Общий диапазон спектральной перестройки составил более 600 nm (или более  $100 \text{ cm}^{-1}$ ). Выходная мощность была около 0.75 W на пике усиления и снижалась до 0.5 W на длинновол-



**Рис. 2.** Вольт-амперные (1) и ватт-амперные (2) характеристики ККЛ с внешним резонатором (сплошные линии) и без внешнего резонатора (штриховые линии). На вставках показаны спектры при генерации во внешнем резонаторе для токов накачки 3, 4 и 5 А.



**Рис. 3.** Спектр перестройки ККЛ во внешнем резонаторе по схеме Литтрова. Темными квадратами указана мощность для каждой спектральной точки.

вом краю генерации. Кроме того, величина подавления боковых мод вблизи краев спектра усиления резко уменьшалась, и в спектре генерации наблюдались линии, связанные с резонатором Фабри–Перо, образованным сколотыми зеркалами. Подавление данной паразитной генерации возможно при просветлении выходной грани чипа, через которую осуществляется обратная связь во внешнем резонаторе. Малая величина спектральной перестройки в коротковолновую сторону по сравнению с наблюдаемой для спектра генерации в работе [15] связана, по-видимому, с ростом внутренних потерь из-за поглощения в диэлектрике и рассеяния на боковых гранях в гребневом волноводе для коротковолновой части спектра.

Таким образом, нами проведено исследование перестраиваемого ККЛ с внешним резонатором по схеме Литтрова с выходной мощностью одночастотной генерации до 1.5 W. Диапазон непрерывной перестройки составил более 600 nm (или более  $100 \text{ cm}^{-1}$ ). Для дальнейшего расширения спектра перестройки необходимо использование просветляющего покрытия ККЛ. Дальнейшее повышение величины подавления боковых мод требует совершенствования постростовой обработки пластин ККЛ для подавления возможной генерации латеральных волноводных мод высшего порядка.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект „Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023–2025“) и при поддержке Минобрнауки РФ (контракт FSWR-2024-0004).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис, ФТП, **5** (4), 797 (1971). [R. Kazarinov, R. Suris, Sov. Phys. Semicond., **5** (4), 707 (1971)].
- [2] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho, Science, **264** (5158), 553 (1994). DOI: 10.1126/science.264.5158.553
- [3] D. Heydari, Y. Bai, N. Bandyopadhyay, S. Slivken, M. Razeghi, Appl. Phys. Lett., **106** (9), 091105 (2015). DOI: 10.1063/1.4914477
- [4] F. Wang, S. Slivken, D.H. Wu, M. Razeghi, Opt. Express, **28** (12), 17532 (2020). DOI: 10.1364/OE.394916
- [5] E. Cherotchenko, V. Dudelev, D. Mikhailov, G. Savchenko, D. Chistyakov, S. Losev, A. Babichev, A. Gladyshev, I. Novikov, A. Lutetskiy, D. Veselov, S. Slipchenko, D. Denisov, A. Andreev, I. Yarotskaya, K. Podgaetskiy, M. Ladugin, A. Marmalyuk, N. Pikhtin, L. Karachinsky, V. Kuchinskii, A. Egorov, G. Sokolovskii, Nanomaterials, **12** (22), 3971 (2022). DOI: 10.3390/nano12223971
- [6] В.В. Дюделев, Е.Д. Черотченко, И.И. Врубель, Д.А. Михайлов, Д.В. Чистяков, В.Ю. Мыльников, С.Н. Лосев, Е.А. Когновицкая, А.В. Бабичев, А.В. Лютецкий, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, А.В. Абрамов, А.Г. Гладышев, К.А. Подгаецкий, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, И.И. Новиков, В.И. Кучинский, Л.Я. Карачинский, А.Ю. Егоров, Г.С. Соколовский, УФН, **194** (1), 98 (2024). DOI: 10.3367/UFN.2023.05.039543 [V.V. Dudelev, E.D. Cherotchenko, I.I. Vrubel, D.A. Mikhailov, D.V. Chistyakov, V.Yu. Mylnikov, S.N. Losev, E.A. Kognovitskaya, A.V. Babichev, A.V. Lutetskiy, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, A.V. Abramov, A.G. Gladyshev, K.A. Podgaetskiy, A.Yu. Andreev, I.V. Yarotskaya, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, I.I. Novikov, V.I. Kuchinskii, L.Ya. Karachinsky, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii, Phys. Usp., **67** (1), 92 (2024). DOI: 10.3367/UFNe.2023.05.039543].
- [7] W. Zhou, Q.-Y. Lu, D.-H. Wu, S. Slivken, M. Razeghi, Opt. Express, **27** (11), 15776 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.015776
- [8] K.K. Schwarm, C.L. Strand, V.A. Miller, R.M. Spearrin, Appl. Phys. B, **126** (1), 9 (2020). DOI: 10.1007/s00340-019-7358-x
- [9] P. Bassan, M.J. Weida, J. Rowlette, P. Gardner, Analyst, **139** (16), 3856 (2014). DOI: 10.1039/c4an00638k
- [10] Д.Р. Анфимов, И.С. Голяк, П.П. Демкин, Е.Н. Задорожный, И.Б. Винтайкин, А.Н. Морозов, И.Л. Фуфурин, ЖТФ, **94** (3), 482 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.03.57388.19-24 [D.R. Anfimov, I.S. Golyak, P.P. Demkin, E.N. Zadorozhny, I.B. Vintaykin, A.N. Morozov, I.L. Fufurin, Tech. Phys., **69** (3), 456 (2024)].
- [11] M.C. Phillips, N. Hô, Opt. Express, **16** (3), 1836 (2008). DOI: 10.1364/OE.16.001836
- [12] Y. Ma, K. Ding, L. Wei, X. Li, J. Shi, Z. Li, Y. Qu, L. Li, Z. Qiao, G. Liu, L. Zeng, D. Xu, Crystals, **12** (11), 1564 (2022). DOI: 10.3390/cryst12111564
- [13] A. Hugi, R. Terazzi, Y. Bonetti, A. Wittmann, M. Fischer, M. Beck, J. Faist, E. Gini, Appl. Phys. Lett., **95** (6), 061103 (2009). DOI: 10.1063/1.3193539
- [14] S. Niu, P. Yang, R.X. Huang, F.M. Cheng, R.X. Sun, X.Y. Lu, F.Q. Liu, Q.Y. Lu, N. Zhuo, J.C. Zhang, Opt. Express, **31** (25), 41252 (2023). DOI: 10.1364/OE.505349
- [15] A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.Yu. Andreev, I.V. Yarotskaya, K.A. Podgaetskiy, A.A. Marmalyuk, A.A. Padalitsa, M.A. Ladugin, N.A. Pikhtin, G.S. Sokolovskii, A.Yu. Egorov, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **87** (6), 839 (2023). DOI: 10.3103/S1062873823702088
- [16] В.В. Дюделев, Д.А. Михайлов, А.В. Бабичев, А.Д. Андреев, С.Н. Лосев, Е.А. Когновицкая, Ю.К. Бобрецова, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, А.Г. Гладышев, Д.В. Денисов, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, В.И. Кучинский, А.Ю. Егоров, Г.С. Соколовский, Квантовая электроника, **50** (2), 141 (2020). [V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, A.V. Babichev, A.D. Andreev, S.N. Losev, E.A. Kognovitskaya, Yu.K. Bobretsova, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kuchinskii, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii, Quantum Electron., **50** (2), 141 (2020). DOI: 10.1070/QEL17168].
- [17] В.В. Дюделев, Д.А. Михайлов, А.В. Бабичев, Г.М. Савченко, С.Н. Лосев, Е.А. Когновицкая, А.В. Лютецкий, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, А.Г. Гладышев, Д.В. Денисов, И.И. Новиков, Л.Я. Карачинский, В.И. Кучинский, А.Ю. Егоров, Г.С. Соколовский, Квантовая электроника, **50** (11), 989 (2020). [V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, A.V. Babichev, G.M. Savchenko, S.N. Losev, E.A. Kognovitskaya, A.V. Lyutetskii, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kuchinskii, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii, Quantum Electron., **50** (11), 989 (2020). DOI: 10.1070/QEL17396].