09

Квантово-каскадные детекторы для спектрального диапазона 8 μm

© В.В. Дюделев[1], Д.В. Чистяков[1], В.В. Подопригора[1,2], А.А. Никитин[1,2], Д.А. Михайлов[1], Е.Д. Черотченко[1], И.И. Врубель[1], В.Ю. Мыльников[1], С.Н. Лосев[1], Н.Г. Дерягин[1], С.Х. Абдулразак[1], А.Д. Андреев[1], А.Г. Дерягин[1], А.В. Бабичев[1], А.В. Лютецкий[1], С.О. Слипченко[1], Н.А. Пихтин[1], А.Г. Гладышев[3], К.А. Подгаецкий[4], А.Ю. Андреев[4], И.В. Яроцкая[4], М.А. Ладугин[4], А.А. Мармалюк[4], Д.С. Папылев[5], И.И. Новиков[3,5], Е.А. Когновицкая[1,6], В.И. Кучинский[1], Л.Я. Карачинский[3,5], А.Ю. Егоров[3], Г.С. Соколовский[1]

[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия
[3] ООО „Коннектор Оптикс“, Санкт-Петербург, Россия
[4] АО „НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха“, Москва, Россия
[5] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
[6] Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: v.dudelev@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2025 г.
В окончательной редакции 9 декабря 2025 г.
Принято к публикации 9 декабря 2025 г.

Квантово-каскадные детекторы (ККД), работающие при комнатной температуре и нулевом смещении, обладающие чрезвычайно низким темновым током, являются перспективной платформой для создания быстродействующих детекторов в длинноволновом инфракрасном диапазоне для систем беспроводной оптической связи. Формирование ККД из гетероструктур квантово-каскадных лазеров (ККЛ) открывает возможности для интеграции источников и детекторов на одной пластине. Нами продемонстрирована максимальная чувствительность ККД более 70 mA/W в области 8 μm и реализована концепция интеграции ККД на одном теплоотводе с ККЛ для создания фотодетектора обратной связи. Предварительные исследования быстродействия показали, что полоса пропускания ККД превышает 1 GHz и может быть существенно увеличена при оптимизации емкостных характеристик.

Ключевые слова: квантово-каскадный детектор, квантово-каскадный лазер, фотоприемник обратной связи, быстродействие.

DOI: 10.21883/0000000000

Фотоника среднего инфракрасного (ИК) диапазона привлекает повышенное внимание из-за наличия большого количества интенсивных линий поглощения различных веществ в среднем ИК-диапазоне, а также окон прозрачности атмосферы. Эти уникальные свойства среднего ИК-диапазона имеют огромное прикладное значение, так как открывают серьезные перспективы для развития различных приложений, связанных со спектроскопией, а также для разработки помехозащищенных беспроводных оптических линий связи.

Для развития прикладных направлений фотоники среднего ИК-диапазона требуется создание как эффективных излучателей, так и фотоприемников. В настоящее время наиболее эффективными лазерными излучателями для среднего ИК-диапазона являются квантово-каскадные лазеры (ККЛ), излучающие ватты оптической мощности при комнатной температуре [1,2] и успешно применяемые как в спектроскопии для детектирования различных веществ [3], в том числе для биомедицинских приложений [4], так и для передачи информации по беспроводным оптическим линиям связи [5].

В то же время помимо источников света для функционирования подобных систем необходимы эффективные, а в случае применения в системах связи и быстродействующие детекторы. Традиционные подходы состоят в применении фотодетекторов на основе соединений кадмий–ртуть–теллур (КРТ) [6], детекторов на сверхрешетках второго рода InAs/InAsSb (англ. T2SL) [7], а также детекторов на сверхрешетках GaAs/AlGaAs (англ. QWIP) [8]. КРТ-детекторы показывают довольно высокую чувствительность, но требуют дополнительного охлаждения, что существенно снижает их компактность и увеличивает энергопотребление. Кроме того, быстродействие современных КРТ-детекторов ограничено 1 GHz. T2SL-детекторы демонстрируют быстродействие свыше 10 GHz на длине волны 4.5 μm при комнатной температуре [7]. К их недостаткам можно отнести ограниченный спектральный диапазон, доступный этим детекторам ($< 6\,\mu$m), и высокий темновой ток при комнатной температуре, что снижает возможности детектирования относительно слабых сигналов. Для QWIP-детекторов продемонстрировано очень высокое быстродействие свыше 100 GHz для длины волны $\sim 10\,\mu$m при комнатной температуре [8], однако без охлаждения QWIP-детекторы имеют очень высокие токи утечки, что снижает обнаружительную способность таких приборов.

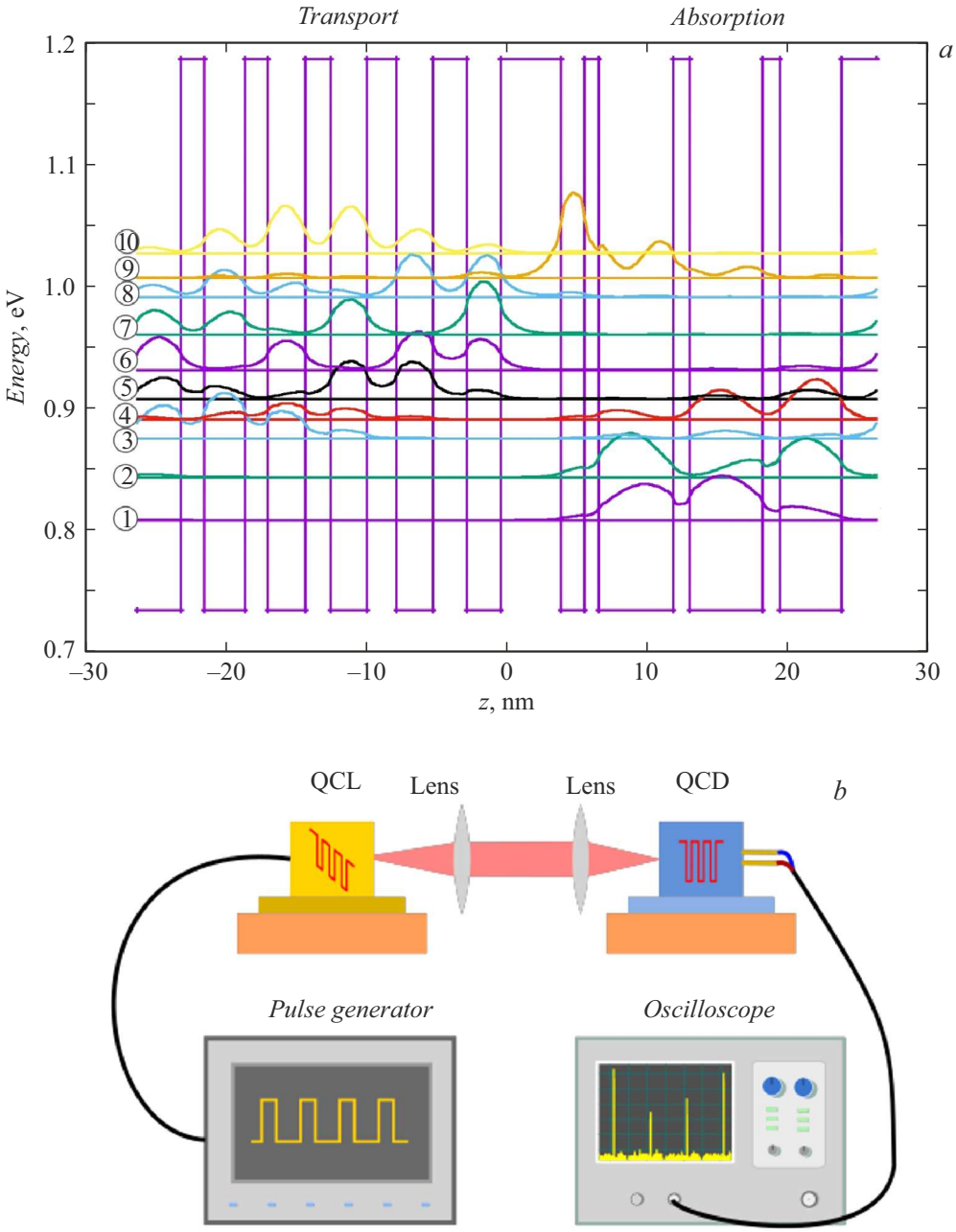

Рис. 1. *a* — зонная диаграмма ККД; *b* — схематическое изображение установки для исследования характеристик ККД.

Альтернативным подходом является применение квантово-каскадных детекторов (ККД). ККД — это униполярный прибор, работающий на переходах электронов между квантовыми уровнями в зоне проводимости, а не на межзонных переходах, как, например, фотодиоды. Структура ККД аналогично ККЛ состоит из десятков квантовых каскадов, в каждом из которых происходит поглощение фотона, что обеспечивает возбуждение электрона с нижнего уровня на верхний и последовательную диагональную релаксацию вниз по энергии между уровнями соседних квантовых ям в зоне переноса. Таким образом, электрон переходит из одного каскада в другой (рис. 1). В настоящее время созданы ККД для спектрального диапазона 4.5 μm с частотой отсечки более 20 GHz [9] и теоретически показано, что частота отсечки может превышать 100 GHz [10]. Кроме того, продемонстрирована регистрация фемтосекундных импульсов [11]. Возможности создания быстродействующих ККД с полосой пропускания > 20 GHz для длинноволнового инфракрасного диапазона были продемонстрированы в конструкции с антенным усилителем [12]. Также преимуществом ККД является возможность их интеграции с ККЛ, что было наглядно показано в [13]. Данное обстоятельство является одним из главных преимуществ ККД, так как открывает возможности создания фотонных интегральных схем для практических

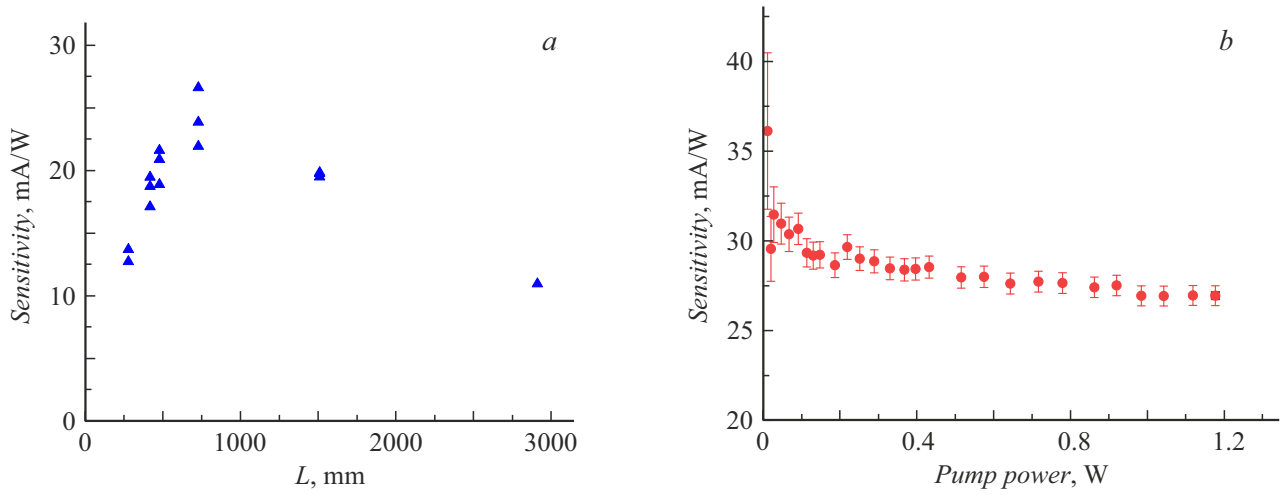

Рис. 2. Результаты исследований зависимости чувствительности ККД от длины чипа при детектируемой мощности более 1.5 W (*a*) и от мощности накачки для ККД длиной 700 μm (*b*).

приложений, включающих в себя не только оптическую связь, но и гетеродинное детектирование, а также спектроскопию в среднем ИК-диапазоне. При этом для успешной интеграции ККЛ и ККД на одной платформе предпочтительно, чтобы оба прибора были изготовлены на основе одной гетероструктуры для гомогенной интеграции либо имели одинаковую толщину сердцевины волновода и верхней волноводной обкладки для гетерогенной интеграции. Целью настоящей работы являются разработка и создание быстродействующих детекторов для длинноволнового ИК-диапазона для систем беспроводной оптической связи и газоанализа, обладающих возможностью интеграции с квантово-каскадными лазерами на общей платформе.

В настоящей работе проведены исследования ККД в классической волноводной геометрии для регистрации излучения вблизи 8 μm. На рис. 1, *a* приведена энергетическая диаграмма квантового каскада ККД, на которой отмечены зоны поглощения и переноса. ККД были изготовлены на основе гетероструктур ККЛ с 50 квантовыми каскадами в активной области, описанных в работах [1,2]. Толщина активной области, состоящей из согласованных с InP-подложкой слоев InGaAs/InAlAs, составляла 2.5 μm, а общая толщина сердцевины волновода, включающая активную область и нижний буферный слой InGaAs толщиной 100 nm, составила 2.6 μm. Волноводные обкладки состояли из фосфида индия. Для исследований использовались как полосковые ККД с шириной полоска 40 μm, так и четырехсколотые образцы площадью $\sim 0.1\,\mathrm{mm}^2$. Входные грани у всех образцов были получены скалыванием вдоль кристаллографических осей. Антиотражающее покрытие не наносилось. Полосковые ККД изготавливались аналогично ККЛ по технологии постростовой обработки, описанной в работе [14].

Для исследований зависимости чувствительности ККД от длины чипа был использован ряд образцов с длинами от 0.25 до 3 mm. Накачка осуществлялась при помощи ККЛ с длиной волны генерации $\sim 7.6\,\mu$m. ККЛ работал в импульсном режиме генерации при накачке импульсами тока длительностью ~ 100 ns с частотой повторения 10 kHz. Импульсная мощность накачки составляла 1.75 W.

На рис. 1, *b* представлено схематическое изображение экспериментальной установки. Излучение ККЛ собиралось асферической линзой с широкополосным антиотражающим покрытием. Коэффициент отражения на поверхностях линзы был менее 1 %. Числовая апертура линзы NA = 0.56. Излучение ККЛ вводилось в волновод ККД при помощи идентичной линзы. ККД, ККЛ и линзы были установлены на высокоточные позиционеры с дифференциальными микрометрическими винтами. Расстояние между ККЛ и ККД составляло ~ 30 cm. Результаты исследования зависимости чувствительности ККД от длины чипа представлены на рис. 2, *a*. Максимальная чувствительность была получена у ККД длиной 0.7 mm и составила ~ 27 mA/W. В оценке данного значения чувствительности учтены френелевские потери на отражение от входной грани ККД, но не учтены потери на ввод излучения в волновод ККД. Фактически представлена приборная чувствительность при конфигурации оптической системы, пригодной для практического применения. Размер фокусного пятна для идеального гауссова пучка по уровню $1/e$ для применяемой линзы с числовой апертурой NA = 0.56 составляет $w_0 = \lambda/(\pi \cdot \mathrm{NA}) \approx 4.5\,\mu$m. При этом реалистичное значение параметра распространения луча M^2 для ККЛ по быстрой оси составляет не менее 1.2. Влияние M^2 сводится к пропорциональному увеличению размера фокусного пятна $w_0 \to M^2 w_0$. Тогда, пренебрегая расходимостью по медленной оси, получаем, что доля излучения, вводимая в волновод используемой оптической системой, составляет не более 50 %, что

следует учитывать при расчете максимальной чувствительности.

Исследования чувствительности ККД показали, что при мощностях накачки в диапазоне 0.1 W и выше чувствительность остается практически постоянной. При дальнейшем снижении детектируемой мощности наблюдается рост чувствительности (рис. 2, *b*). Из данных, представленных в работе [13], видно, что при повышении детектируемой мощности также наблюдается насыщение чувствительности ККД. Для исследуемых нами ККД величина детектируемой мощности вблизи 0.1 W, по-видимому, является мощностью насыщения. Поэтому для мощностей излучения ниже данного значения наблюдается заметное повышение чувствительности. При нормировке экспериментально полученной чувствительности на отношение толщины активной области к размеру фокусного пятна и при оптимальной длине чипа максимальная чувствительность превышает 50 mA/W при ваттном уровне детектируемой мощности и 70 mA/W при детектируемой мощности порядка 10 mW. При уменьшении детектируемой мощности до микроваттного уровня и нормировке на толщину одного квантового каскада аналогично [15] можно ожидать дальнейшего повышения максимальной чувствительности ККД.

Немонотонная зависимость чувствительности ККД от длины чипа на рис. 2, *a* связана с ее повышением за счет увеличения доли поглощенного излучения при малых длинах и снижением за счет шунтирования сигнала из-за уменьшения внутреннего сопротивления при длинах чипа, заметно превышающих длину поглощения:

$$S = S_0 \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{1 + RWL/\rho}, \qquad (1)$$

где S_0 — максимальная чувствительность, L — длина чипа, W — ширина чипа, R — внешнее сопротивление, ρ — удельное сопротивление чипа, α — коэффициент поглощения.

Следует подчеркнуть, что продемонстрированная чувствительность вполне достаточна для решения прикладных задач. Одним из возможных решений является применение ККД в качестве фотоприемника обратной связи для ККЛ. Использование ККД, изготовленных из той же структуры, что и ККЛ, позволяет избежать проблем с юстировкой по высоте при монтаже. Монтируя ККД на расстоянии 30–100 μm от ККЛ, можно получить достаточный коэффициент ввода для калибровки выходной мощности лазера. Нами были изготовлены образцы ККЛ, смонтированные на одном теплоотводе с ККД, который имел четырехсколотую конфигурацию размером $\sim 200 \times 500$ μm. Так как лазер имел размер полоска 20 μm, выбор такой конфигурации позволял избежать точной юстировки и по вертикали, и в плоскости теплоотвода. И ККД, и ККЛ монтировались эпитаксиальным слоем вниз, что обеспечивало автоматическую юстировку по быстрой оси. Фотография смонтированной пары ККЛ–ККД обратной связи показана на вставке к рис. 3, *b*. Видно, что ККД располагается на расстоянии существенно менее 100 μm от заднего зеркала ККЛ (ширина чипа ККЛ 400 μm).

На рис. 3, *a* показаны вольт-амперная характеристика ККЛ (кривая *1*) и ватт-амперные характеристики, измеренные при помощи внешнего фотоприемника (кривая *2*) и ККД, интегрированного с ККЛ на общем теплоотводе (точки). Видно хорошее совпадение формы обеих ватт-амперных характеристик. Общая чувствительность ККД обратной связи немного меньше 3 mA/W (рис. 3, *b*), что связано с уменьшением внутреннего сопротивления чипа из-за увеличения ширины активной области (1), но вполне достаточно для контроля мощности ККЛ по его показаниям.

Как уже было отмечено, ККД для длинноволнового ИК-диапазона важны для систем беспроводной оптической связи. На рис. 4, *a* показан трек зарегистрированных с помощью ККД импульсов длительностью менее 20 ns и с частотой следования 10 MHz. Хорошо видно, что в дан-

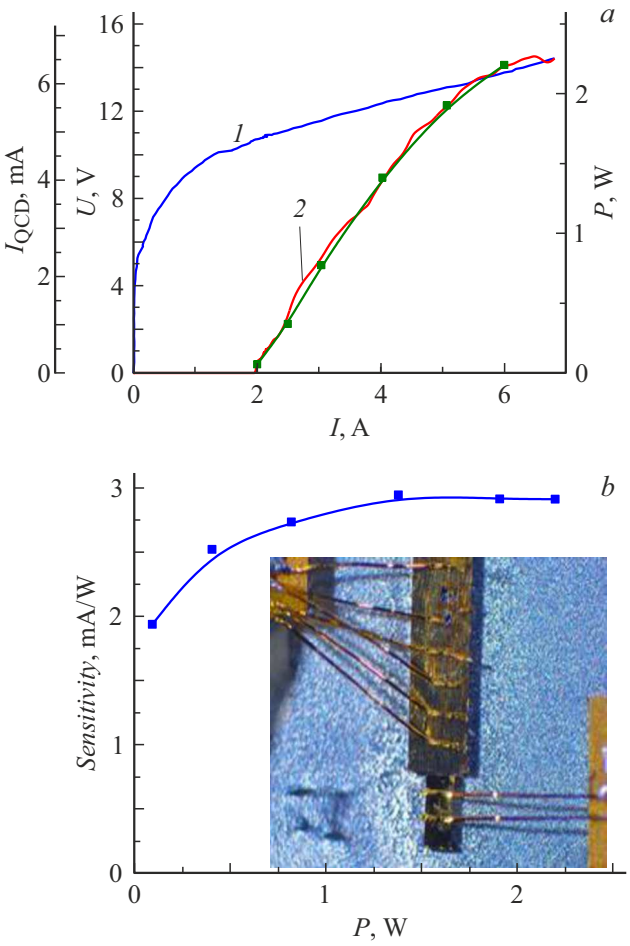

Рис. 3. *a* — вольт-амперная (кривая *1*) и ватт-амперные характеристики ККЛ. Кривая *2* — ватт-амперная характеристика, измеренная на автоматизированной установке. Точки — измерения, проведенные при помощи ККД обратной связи (ось I_{QCD}). *b* — зависимость чувствительности ККД обратной связи от мощности ККЛ. На вставке — фотография пары ККЛ–ККД обратной связи.

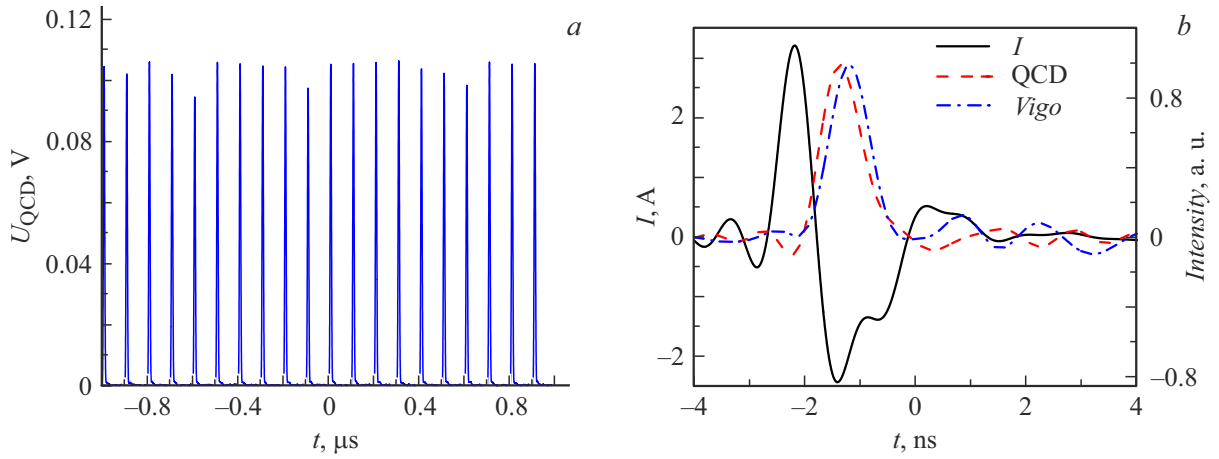

Рис. 4. *a* — трек импульсов, излучаемых ККЛ с частотой повторения 10 MHz и зарегистрированных ККД. *b* — результаты измерений излучения ККЛ, накачиваемого субнаносекундными импульсами тока. Сплошная кривая — ток через лазер, штриховая — излучение, зарегистрированное ККД, штрихпунктирная — излучение, зарегистрированное КРТ-фотоприемником.

ной конфигурации может быть реализована устойчивая беспроводная оптическая связь со скоростью передачи данных 10 Mb/s, ограниченной лишь возможностями электрической схемы накачки ККЛ.

Для уточнения предельного быстродействия исследуемых ККД были проведены исследования по регистрации с помощью ККД размером $300 \times 300\,\mu$m оптического излучения ККЛ, накачиваемого импульсами тока субнаносекундной длительности. Пучок излучения ККЛ делился на две части в соотношении 9:1 между ККД и быстродействующим КРТ-фотоприемником Vigo PVI-4TE-10.6-1x1 с четырехстадийным охлаждением и полосой пропускания 1 GHz. Оба фотоприемника подключались к осциллографу реального времени Rigol DS70504 с полосой пропускания 5 GHz.

Как видно из рис. 4, *b*, длительность импульса фотоответа, зарегистрированного ККД, не уступает быстродействующему КРТ-фотоприемнику и составляет не более ~ 0.8 ns. При этом следует отметить, что чувствительность референсного КРТ-приемника существенно выше, чем у исследуемых ККД, в том числе за счет использования быстродействующего усилителя. В то же время достигнутый результат показывает, что даже без оптимизации конструкции ККД и подходов к монтажу для снижения емкости и индуктивности прибора полоса пропускания ККД превышает 1 GHz. Это позволяет рассчитывать на применение подобных фотоприемников для систем беспроводной оптической связи со скоростью 1 Gb/s и выше.

Таким образом, в работе представлены результаты исследования ККД спектрального диапазона $8\,\mu$m. Продемонстрировано, что максимальная чувствительность ККД превышает 70 mA/W в области $8\,\mu$m, и показана потенциальная возможность реализовать беспроводные оптические линии передачи данных со скоростью порядка 1 Gb/s. Дальнейшие исследования ККД будут направлены как на повышение их быстродействия за счет оптимизации конструкции чипа ККД и его монтажа для снижения его электрической емкости, так и на развитие идей интеграции ККЛ и ККД на одной платформе для расширения спектра их возможного применения.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-30020-П (https://rscf.ru/project/21-72-30020/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] 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**, 3971 (2022). DOI: 10.3390/nano12223971

[2] 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/UFNr.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].

[3] F. D'Amato, M. Barucci, G. Bianchini, S. Viciani, Opt. Express, **33** (11), 22745 (2025). DOI: 10.1364/OE.558437
[4] 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
[5] M. Joharifar, H. Dely, X. Pang, R. Schatz, D. Gacemi, T. Salgals, A. Udalcovs, Y.-T. Sun, Y. Fan, L. Zhang, E. Rodriguez, S. Spolitis, V. Bobrovs, X. Yu, S. Lourdudoss, S. Popov, A. Vasanelli, O. Ozolins, C. Sirtori, J. Lightwave Technol., **41** (4), 1087 (2023). DOI: 10.1109/JLT.2022.3207010
[6] O. Spitz, P. Didier, L. Durupt, D.A. Díaz-Thomas, A.N. Baranov, L. Cerutti, F. Grillot, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **28**, 1200109 (2022). DOI: 10.1109/JSTQE.2021.3096316
[7] J. Huang, Z. Shen, Z. Wang, Z. Zhou, Z. Wang, B. Peng, W. Liu, Y. Chen, B. Chen, IEEE Electron. Dev. Lett., **43** (5), 745 (2022). DOI: 10.1109/LED.2022.3163660
[8] Q. Lin, M. Hakl, S. Lepillet, H. Li, J.-F. Lampin, E. Peytavit, S. Barbieri, Optica, **10**, 1700 (2023). DOI: 10.1364/OPTICA.505745
[9] T. Dougakiuchi, N. Akikusa, Sensors, **21**, 5706 (2021). DOI: 10.3390/s21175706
[10] T. Dougakiuchi, A. Ito, M. Hitaka, K. Fujita, M. Yamanishi, Appl. Phys. Lett., **118**, 041101 (2021). DOI: 10.1063/5.0038147
[11] J. Hillbrand, L.M. Krüger, S.D. Cin, H. Knötig, J. Heidrich, A.M. Andrews, G. Strasser, U. Keller, B. Schwarz, Opt. Express, **29**, 5774 (2021). DOI: 10.1364/OE.417976
[12] G. Quinchard, C. Mismer, M. Hakl, J. Pereira, Q. Lin, S. Lepillet, V. Trinité, A. Evirgen, E. Peytavit, J.L. Reverchon, J.F. Lampin, S. Barbieri, A. Delga, Appl. Phys. Lett., **120** (9), 091108 (2022). DOI: 10.1063/5.0078861
[13] B. Schwarz, C.A. Wang, L. Missaggia, T.S. Mansuripur, P. Chevalier, M.K. Connors, D. McNulty, J. Cederberg, G. Strasser, F. Capasso, ACS Photonics, **4**, 1225 (2017). DOI: 10.1021/acsphotonics.7b00133
[14] 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, 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].
[15] G. Marschick, M. David, E. Arigliani, N. Opacak, B. Schwarz, M. Giparakis, A. Delga, M. Lagree, T. Poletti, V. Trinite, A. Evirgen, B. Gerard, G. Ramer, R. Maulini, J. Butet, S. Blaser, A.M. Andrews, G. Strasser, B. Hinkov, Opt. Express, **30**, 40188 (2022). DOI: 10.1364/OE.470615