

09

Влияние длительности импульса накачки и фактора заполнения на мощностные характеристики квантово-каскадных лазеров

© В.В. Дюделев¹, Е.Д. Черотченко¹, И.И. Врубель¹, Д.А. Михайлов¹, Д.В. Чистяков¹, С.Н. Лосев¹, А.В. Бабичев¹, Е.А. Когновицкая¹, А.В. Лютецкий¹, С.О. Слипченко¹, Н.А. Пихтин¹, А.Г. Гладышев², И.И. Новиков^{2,3}, В.И. Кучинский¹, Д.С. Папылев³, Л.Я. Карачинский^{2,3}, А.Ю. Егоров², Г.С. Соколовский¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: v.dudelev@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 13 ноября 2024 г.

Принято к публикации 13 ноября 2024 г.

Экспериментально и теоретически исследованы характеристики квантово-каскадных лазеров при различных факторах заполнения и различных частотах следования импульсов накачки. Теоретически и экспериментально показано, что для получения высокой средней мощности при сохранении значений пиковой мощности следует использовать короткоимпульсную накачку. Экспериментально продемонстрирована максимальная средняя выходная мощность более 100 мВт. Дальнейшее повышение средней мощности требует обеспечения лучшего отвода тепла от активной области.

Ключевые слова: интегральная оптика, квантово-каскадный лазер.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59846.20177

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) являются динамично развивающимся классом когерентных излучателей для среднего инфракрасного диапазона. Их высокая выходная мощность и эффективность во многом зависят от температурной стабильности выходных характеристик, в первую очередь от температурной стабильности порогового тока. Связано это в основном с тем, что высокие рабочие напряжения и низкая теплопроводность материалов активной области приводят к ее сильному разогреву даже при накачке короткими импульсами тока [1].

Отдельным направлением исследований является использование ККЛ для генерации и передачи информации. Это включает в себя исследования генерации случайных чисел на основе каскадных лазеров [2,3], а также разработку систем беспроводной оптической связи в среднем инфракрасном диапазоне [4]. Эти и многие другие приложения требуют температурной устойчивости ККЛ при работе в непрерывном или импульсном режиме с высоким фактором заполнения. Поэтому усилия исследователей направлены на разработку новых дизайнов активной области, обеспечивающих высокую температурную стабильность ККЛ. В работе [5] для ККЛ спектрального диапазона 4–5 μm продемонстрирована характеристическая температура $T_0 \sim 380$ К, что позволило на основе данного дизайна достичь эффективности свыше 30% в импульсном режиме [6] и более 20% в непрерывном режиме генерации [7]. Также для более длинноволновых ККЛ продемонстрированы T_0 свыше 170 К при эффективности $\sim 20\%$ [8] и даже более 240 К при эффективности более 10% [9]. Во всех случаях

подходом к улучшению пороговых свойств ККЛ является разработка дизайнов активной области на основе напряженно-сбалансированных слоев яма/барьер, обеспечивающих большой энергетический разрыв на гетерогранице, позволяющий снизить тепловой выброс носителей заряда с верхнего лазерного уровня в континуум.

В настоящей работе исследованы импульсные режимы работы ККЛ при различных факторах заполнения. В эксперименте использовались ККЛ спектрального диапазона 8 μm с активной областью на основе согласованной по параметру решетки с подложкой InP пары яма/барьер InGaAs/InAlAs с пятьюдесятью квантовыми каскадами. Подробное описание структуры представлено в работе [10].

Полоски ККЛ формировались травлением двух глубоких канавок глубиной $\sim 9 \mu\text{m}$. Ширина сформированного полоска по верхнему краю составляла $\sim 10 \mu\text{m}$. Подробнее процесс постростовой обработки описан в работе [11]. После постростовой обработки пластина разделялась на чипы длиной 3 мм, которые монтировались эпитаксиальным слоем вниз для лучшего отвода тепла от активной области.

На рис. 1 представлены зависимости максимальной пиковой и максимальной средней мощности от фактора заполнения. Исследования ККЛ проводились в импульсном режиме при различных значениях фактора заполнения при частоте повторения импульсов 10 kHz. Излучение ККЛ коллимировалось асферической линзой из сплава германия с эффективным фокусным расстоянием 0.7 мм и числовой апертурой 0.85. Рабочие поверхности

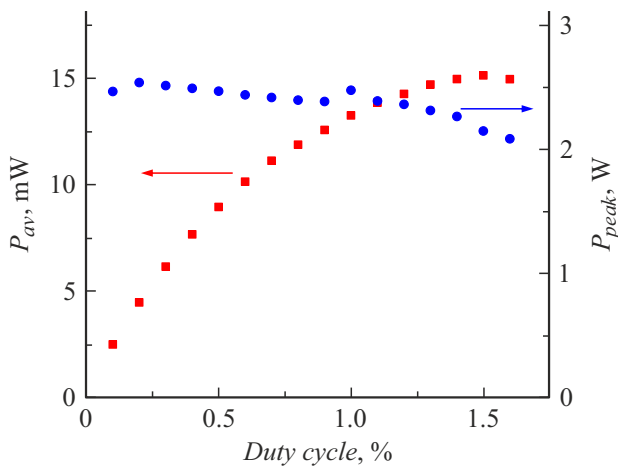


Рис. 1. Зависимость пиковой мощности (кружки) и средней мощности (квадраты) от фактора заполнения. Здесь и далее приводится мощность с двух зеркал ККЛ.

линзы были покрыты широкополосным просветляющим покрытием, обеспечивающим потери на френелевское отражение менее 1%. Сколлимированный пучок делился в соотношении 1/9 при помощи пластины ВаF₂. Меньшая часть излучения направлялась на быстродействующий КРТ-фотодетектор (КРТ — кадмий—ртуть—теллур) с четырехстадийным охлаждением. Данный фотодетектор, подключенный к осциллографу, позволял регистрировать точную форму оптического импульса. Средняя мощность P_{av} регистрировалась при помощи поверенного измерителя мощности Thorlabs PM100D с термоэлектрическим детектором S401C. В показаниях средней мощности учитывалось отделение 10% мощности на КРТ-фотодетектор. Пиковая мощность P_{peak} вычислялась при помощи простого выражения

$$P_{peak} = \frac{A_m P_{av}}{S f}, \quad (1)$$

где A_m — максимальная амплитуда оптического импульса, S — площадь осциллограммы оптического импульса [V·s], f — частота следования импульсов [Hz]. Хотя максимальная величина фактора заполнения невелика и составляет не более 1.6%, полученные результаты явно указывают на перегрев ККЛ после увеличения фактора заполнения более 0.3%. Именно после этой величины наблюдается уменьшение пиковой мощности, а также отклонение от линейной зависимости значения средней мощности. Полученные результаты показывают, что необходимо правильно подбирать режимы импульсной накачки для уменьшения влияния перегрева активной области ККЛ для достижения оптимального баланса между импульсной и средней мощностью выходного излучения.

Для анализа влияния режима накачки лазера на его параметры было использовано численное решение неравновесного уравнения теплопроводности в квадрате

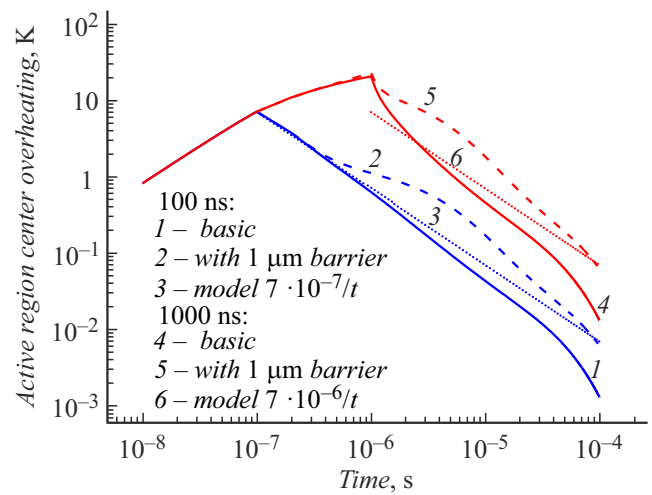


Рис. 2. Временная динамика температуры центра активной зоны ККЛ, рассчитанная с помощью решения двумерного нестационарного уравнения теплопроводности, построенная в двойном логарифмическом масштабе. Линии 1–3 показывают эволюцию температуры центра активной зоны при накачке импульсом длительностью 100 ns, линии 4–6 — 1000 ns. Сплошные линии 1, 4 — результаты модели с рабочим медным теплоотводом, штриховые линии 2, 5 — с изолированным теплоотводом, пунктирные линии 3, 6 — аппроксимирующие функции вида t^{-1} (t — время). Амплитуда тока накачки $I = 2$ А. Для параметров данного расчета значения равновесного перегрева в приближении линейного отклика равны $T_{eq}(1000 \text{ ns}) = 1.1$ К, $T_{eq}(100 \text{ ns}) = 1.3$ К, тогда как средний импульсный перегрев для этих случаев равен $\langle T_{imp} \rangle(1000 \text{ ns}) = 14$ К и $\langle T_{imp} \rangle(100 \text{ ns}) = 3$ К соответственно.

0.2×0.2 mm с теплотехническими параметрами элементов конструкции лазера, указанными в работе [1]. Нами рассмотрены два предельных случая эффективности теплоотвода. В первом случае в модели массивный медный радиатор имел полный контакт с лазерным чипом, а в другом случае был фактически изолирован. Ширина структуры была выбрана равной $20 \mu\text{m}$, что соответствовало ширине основания полоска исследуемых в эксперименте образцов. Нами рассматривались длительности импульсов накачки 100 и 1000 ns. Динамика изменения температуры центра активной области на интервале $100 \mu\text{s}$ в двойном логарифмическом масштабе для четырех комбинаций теплоотвода и длительности импульса приведена на рис. 2. Можно видеть, что при подаче импульса тока величиной 2 А и длительностью 100 и 1000 ns центр активной зоны лазера перегревается на 7 и 20 К соответственно. Затем, после выключения импульса накачки, температура спадает по сложному закону, подчиняющемуся неравновесному уравнению теплопроводности без внутренних источников теплоты. Малый размер и фактор заполнения позволяют считать активную зону мгновенным точечным источником теплоты для всей конструкции ККЛ. В случае двумерной геометрии структуры временная и пространственная эволюция выделившейся энергии, или функция Грина

мгновенного источника теплоты, имеет следующий вид:

$$T(\rho, t) = \frac{\Theta(t)}{4\pi kt} e^{-\frac{\rho^2}{4kt}}, \quad (2)$$

где ρ — удаленность от точки мгновенного тепловыделения, k — коэффициент диффузии, $[\text{cm}^2/\text{s}]$, $\Theta(t)$ — функция Хевисайда. Поскольку площадь сечения ККЛ много меньше, чем у теплоотода, после выключения накачки в пределе $\rho \rightarrow 0$ температура активной зоны будет изменяться со временем по закону

$$T_{AR}(t) \sim t^{-1}. \quad (3)$$

Отображение аналитического закона на рис. 2 показывает, что это приближение адекватно описывает диффузию тепла в конструкции ККЛ. Видно, что отличие в длительности импульсов на порядок приводит к практически пропорциональному остаточному перегреву, при том что наибольший перегрев отличается примерно в 3 раза.

В предположении справедливости приближения линейного отклика, когда распределение температуры от предыдущих импульсов не влияет на динамику теплопереноса текущего импульса, температура активной зоны будет определяться сверткой динамики охлаждения активной зоны и модулированного сигнала накачки

$$T_{eq}(t) = \int_{-\infty}^t Pump[x]Response[t-x]dx. \quad (4)$$

Особенностью рассматриваемой задачи является тот факт, что функция вида t^{-1} не интегрируема на бесконечности, т.е. аналитический расчет истинного равновесного значения температуры активной зоны на бесконечной временной шкале невозможен. Однако специфика задачи допускает достаточно точную количественную оценку. С учетом того, что энергия подается в активную зону порциями с известной частотой, заменим истинное равновесное значение температуры активной зоны на экспериментально наблюдаемое, формирующееся через некоторое время, соизмеримое с длительностью проведения эксперимента:

$$T_{eq} \approx T' f \tau_p \ln(f \tau_{obs}), \quad (5)$$

где T' — температурная константа, пропорциональная энерговыделению за один импульс, f — частота подачи импульсов, τ_{obs} — длительность проведения эксперимента, τ_p — длительность импульса накачки. Логарифмическая функция получается в результате суммирования вкладов от остаточного нагрева, заданного выражением (3), обусловленного всеми импульсами, поданными к моменту наблюдения. Для расчетов взято время эксперимента $t \sim 10^3$ с. Используя выражение (5) для различных длительностей импульса в условиях неизменного фактора заполнения, в приближении линейного отклика можно получить, что для длительностей, различающихся

на порядок, значение равновесной температуры будет различаться на доли градусов Кельвина. В частности, для длительностей 100 и 1000 ns и фактора заполнения 1% отношение $\frac{T_{eq}(1000 \text{ ns})}{T_{eq}(100 \text{ ns})} = 0.85$ ($T_{eq}(1000 \text{ ns}) = 1.1$ К и $T_{eq}(100 \text{ ns}) = 1.3$ К), т.е. остаточный перегрев активной зоны при подаче импульсов накачки с постоянным фактором заполнения, но при различной длительности импульса (100 и 1000 ns) фактически одинаков.

Временная динамика разогрева во время подачи импульса на рис. 2 может быть аппроксимирована следующей функцией:

$$T_{imp}(t) = T_a \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}}\right) = 20 \left(1 - e^{-\frac{t}{300 \text{ ns}}}\right), \quad (6)$$

где T_a и τ_r — параметры подгонки, обозначающие эффективную амплитуду температуры импульсного нагрева и характеристическую постоянную времени ее достижения соответственно. Таким образом, средний импульсный нагрев, добавочный (аддитивный) к установившемуся равновесному значению, выведенному в уравнении (5), будет равен

$$\langle T_{imp} \rangle(\tau_p) = \frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} T_{imp}(t) dt = T_a \left(1 - \frac{\tau_r}{\tau_p} \left(1 - e^{-\frac{\tau_p}{\tau_r}}\right)\right). \quad (7)$$

Подставляя соответствующие значения, можно получить, что $\frac{\langle T_{imp} \rangle(1000 \text{ ns})}{\langle T_{imp} \rangle(100 \text{ ns})} = 4.6$ ($\langle T_{imp} \rangle(1000 \text{ ns}) = 14$ К и $\langle T_{imp} \rangle(100 \text{ ns}) = 3$ К). В итоге средний добавочный нагрев для длинных импульсов значительно превышает таковой для коротких импульсов. При этом следует еще раз отметить, что равновесный перегрев для обоих случаев одинаков.

Таким образом, результаты моделирования с учетом конкретных параметров наглядно показали, что наличие быстрого локального перегрева активной области, который не компенсируется полным остыванием активной области ККЛ за время паузы между импульсами, может приводить к спаду интенсивности после длительностей импульса 100 ns. Результаты моделирования хорошо подтверждают данные рис. 3, а, на котором приведена экспериментальная зависимость средней мощности выходного излучения ККЛ от фактора заполнения и частоты следования импульсов. Для получения данной зависимости были измерены множественные ватт-амперные характеристики для каждой из частот повторения с увеличением длительности импульса от минимального значения 100 ns, которое дает минимальное значение фактора заполнения для каждой частоты, до максимального значения, определяемого наблюдаемым снижением максимальной выходной средней оптической мощности. Из рисунка видно, что с увеличением фактора заполнения за счет увеличения частоты следования и снижения длительности импульсов накачки достигается наивысшая средняя мощность. Это связано с тем, что при уменьшении длительности

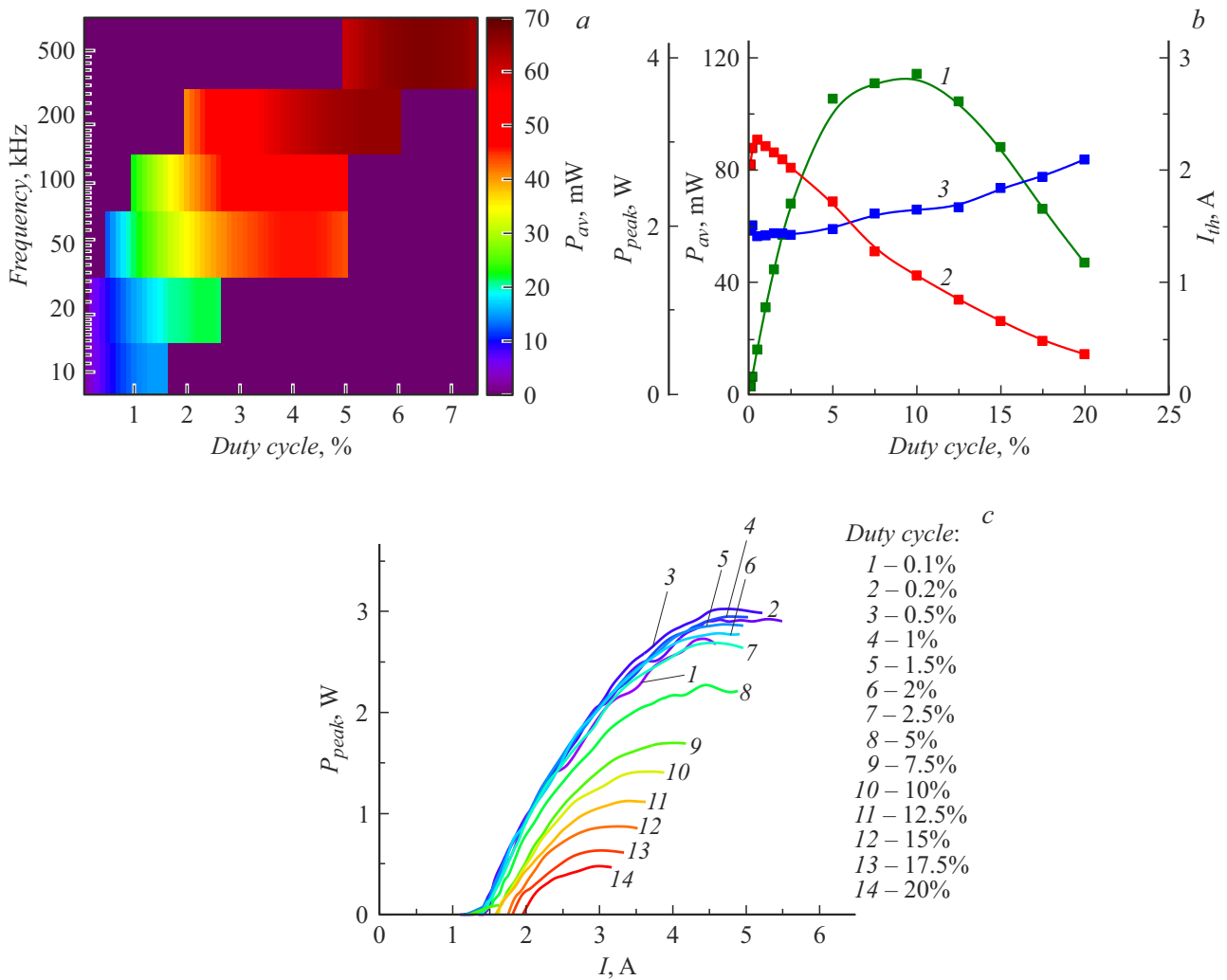


Рис. 3. *a* — зависимость средней выходной мощности ККЛ от фактора заполнения и частоты. *b* — зависимость средней мощности (1), пиковой мощности (2) и порогового тока (3) от фактора заполнения. *c* — ватт-амперные характеристики ККЛ для различных значений фактора заполнения. Длительность импульса токовой накачки на фрагментах *b* и *c* составляла 100 ns. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

импульса накачки в активной области ККЛ выделяется меньше добавочного тепла, что позволяет увеличивать фактор заполнения с увеличением выходной средней мощности.

Нами были проведены экспериментальные исследования зависимости мощностных и пороговых характеристик ККЛ от фактора заполнения при накачке ККЛ импульсами тока с длительностью 100 ns. На рис. 3, *b* представлены зависимости средней мощности, пиковой мощности и порогового тока ККЛ от фактора заполнения. Хорошо видно, что насыщение максимальной средней мощности наступает при факторе заполнения 5%, а спад наступает после фактора заполнения 10%. При этом максимальная пиковая мощность начинает уменьшаться уже после фактора заполнения 0.3%, а пороговый ток существенно не меняется вплоть до фактора заполнения 2.5%. Из рис. 3, *c*, где приведены ватт-амперные характеристики ККЛ для различных фак-

торов заполнения, хорошо видно, что снижение дифференциальной эффективности не наблюдается вплоть до фактора заполнения 2.5% и амплитуды тока накачки 3 А, после чего тепловой загиб ватт-амперных характеристик становится тем сильнее, чем выше фактор заполнения. Таким образом, при рабочем напряжении ~ 12 В для тока накачки 3 А общая потребляемая мощность составляет ~ 36 W, что при факторе заполнения 2.5% показывает, что при использованном дизайне чипа эффективно без перегрева активной области ККЛ может быть отведено около 1 W тепловой мощности. Дальнейшее повышение рабочего тока ведет к повышению потребляемой мощности и, следовательно, к перегреву ККЛ. Данное обстоятельство показывает, что дальнейшее повышение средней выходной мощности требует совершенствования подходов к постростовой обработке структур.

Проведенные исследования показывают, что для получения высокой средней мощности и повышения фактора

заполнения при сохранении высокой пиковой мощности следует снижать длительность импульсов токовой накачки. В проведенных исследованиях минимальная длительность токовой накачки составляла 100 ns. В то же время, как показано в работе [12], время задержки включения ККЛ при накачке импульсами с ненулевым фронтом может превышать 5 ns. Поэтому при модуляции ККЛ импульсами тока большой амплитуды с ненулевым передним фронтом оптимальным представляется диапазон с длительностью импульсов накачки 20–100 ns. Более точное определение оптимума длительности импульса накачки требует дополнительных исследований, выходящих за рамки настоящей работы.

Таким образом, экспериментально и теоретически исследованы характеристики ККЛ при различных факторах заполнения и различных частотах следования импульсов накачки. Экспериментально продемонстрирована максимальная средняя выходная мощность более 100 mW. Дальнейшее повышение средней мощности требует обеспечения лучшего отвода тепла от активной области.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект „Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023–2025“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I.I. Vruble, E.D. Cherotchenko, D.A. Mikhailov, D.V. Chistyakov, A.V. Abramov, V.V. Dudelev, G.S. Sokolovskii, *Nanomaterials*, **13** (23), 2994 (2023). DOI: 10.3390/nano13232994
- [2] В.В. Дюделев, Е.Д. Черотченко, Д.А. Михайлов, Д.В. Чистяков, С.О. Слипенченко, А.В. Лютецкий, А.Г. Гладышев, А.В. Бабичев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров, А.В. Кондрашов, А.А. Семенов, Г.С. Соколовский, А.Б. Устинов, *Письма в ЖТФ*, **49** (22), 35 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2023.22.56598.19729 [V.V. Dudelev, E.D. Cherotchenko, D.A. Mikhailov, D.V. Chistyakov, S.O. Slipchenko, A.V. Lutetskii, A.G. Gladyshev, A.V. Babichev, L.Ya. Karachinskii, I.I. Novikov, N.A. Pikhtin, A.Yu. Egorov, A.V. Kondrashov, A.A. Semenov, G.S. Sokolovskii, A.B. Ustinov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (11), 71 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59846.20177].
- [3] Y. Deng, Z.F. Fan, B.B. Zhao, X.G. Wang, S. Zhao, J. Wu, F. Grillot, C. Wang, *Light Sci. Appl.*, **11** (1), 7 (2022). DOI: 10.1038/s41377-021-00697-1
- [4] 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. Lourduodoss, S. Popov, A. Vasanelli, O. Ozolins, C. Sirtori, J. Lightwave Technol., **41** (4), 1087 (2023). DOI: 10.1109/JLT.2022.3207010
- [5] Y. Bai, N. Bandyopadhyay, S. Tsao, E. Selcuk, S. Slivken, M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.*, **97** (25), 251104 (2010). DOI: 10.1063/1.3529449
- [6] F. Wang, S. Slivken, D.H. Wu, M. Razeghi, *AIP Adv.*, **10** (7), 075012 (2020). DOI: 10.1063/5.0012925
- [7] F. Wang, S. Slivken, D.H. Wu, M. Razeghi, *Opt. Express*, **28** (12), 17532 (2020). DOI: 10.1364/OE.394916
- [8] W. Zhou, Q.-Y. Lu, D.-H. Wu, S. Slivken, M. Razeghi, *Opt. Express*, **27** (11), 15776 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.015776
- [9] 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. Слипенченко, 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. Vruble, 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/UFNr.2023.05.039543].
- [10] 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
- [11] 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
- [12] E.D. Cherotchenko, V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, S.N. Losev, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, I.I. Novikov, A.V. Lutetskiy, D.A. Veselov, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, L.Ya. Karachinsky, D.V. Denisov, V.I. Kuchinskii, E.A. Kognovitskaya, A.Yu. Egorov, R. Teissier, A.N. Baranov, *J. Lightwave Technol.*, **40** (7), 2104 (2022). DOI: 10.1109/JLT.2021.3134837