# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Центр физики наногетероструктур Лаборатория Интегральной оптики на гетероструктурах

На правах рукописи

# КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Научный доклад Михайлова Дмитрия Андреевича

Специальность 1.3.11 Физика полупроводников

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор РАН, зав.лаб. интегральной оптики на гетероструктурах Соколовский Г.С.

Санкт-Петербург 2024 Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор РАН, главный научный сотрудник, зав. лаб. Интегральной оптики на гетероструктурах, ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Соколовский Григорий Семенович

Рецензенты:

д.ф.-м.н., профессор кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Устинов Алексей Борисович

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаб. Физики полупроводниковых гетероструктур, ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Паюсов Алексей Сергеевич

### Общая характеристика научно-квалификацонной работы

#### Введение

Средний инфракрасный диапазон, содержащий в себе интенсивные линии поглощения различных веществ, а также два окна прозрачности атмосферы, является весьма привлекательным для систем газоанализа [1], мониторинга окружающей среды, удалённого неразрушающего контроля, систем безопасности, беспроводной оптической связи [2] и для многих других применений. ККЛ среднего инфракрасного диапазона активно применяются для решения этих задач, включая дистанционную спектроскопию газов, биомедицинскую диагностику и многие другие применения [3].

ККЛ имеют значительные отличия от инжекционных полупроводниковых лазеров. Главное отличие заключается в том, что ККЛ основаны не на переходах электронов между зоной проводимости и валентной зоной, а на оптических переходах между электронными связанными состояниями (подзонами размерного квантования), которые образуются в ультратонких полупроводниковых структурах типа квантовых ям за счет пространственного ограничения. Длиной волны, испускаемой ККЛ, можно управлять, путем изменения толщины структуры квантовых ям и барьеров в активной области. Таким образом, устраняется зависимость длины волны от ширины запрещенной зоны.

За исключением широкого выбора, в плане спектрального диапазона, при имеющихся достаточно хорошо освоенных и доступных материалах, использование внутренних минизонных переходов предопределяют и другие ключевые преимущества данного типа лазеров. В ККЛ каждый электрон проходит последовательность нескольких идентичных каскадов и способен испустить более одного фотона. Эта уникальная особенность приводит к значениям внутренней квантовой эффективности больше единицы и к

3

потенциальной возможности получения высокой мощности, кроме того, внутренние минизонные переходы характеризуются сверхбыстрой динамикой носителей, что делает возможным быстрое «включение» ККЛ в импульсном режиме.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований структур ККЛ, работающих в импульсном режиме при комнатной температуре, с различной конфигурацией резонатора: четырехсколотого, полоскового и составного. А также разработана методика измерения спектров ККЛ с временным разрешением, и на ее основе получен метод определения скорости нагрева активной области ККЛ, что позволяет более эффективно проводить оптимизацию конструкции ККЛ.

### Используемые методы исследования

Импульсный режим накачки ККЛ реализуется следующим образом: источник постоянного питания подает электрическое смещение на стокисток транзистора, генератор импульсов И1-14 подает запускающий импульс на затвор транзистора, после чего происходит сток накопленного заряда через ККЛ. Минимальная длительность импульсов тока на половине амплитуды от максимума в такой конфигурации источника тока составляет 60 нс. Итоговый электрический импульс, проходящий через схему и через структуру ККЛ, регистрируется осциллографом «Infiniium Agilent 54854А».



Рисунок 1 – схема подключения ККЛ при измерениях.

Поддержание комнатной температуры осуществляется с помощью двухуровневой системы охлаждения, состоящей из термоэлектрического модуля Пельтье и водяного охлаждения. Контакт двух систем охлаждения производится через медный теплоотвод. Температура ККЛ контролировалась с помощью терморезистора, установленного на теплоотводе, с известной калибровочной кривой.

Методика измерений Ватт-амперных характеристик заключается в детектировании выходной оптической мощности с помощью откалиброванного термоэлектрического преобразователя (Thorlabs S401). Излучение коллимируется и фокусируется системой линз, после чего попадает на чувствительный элемент фотоприемника рисунок 2. Все измерения были проведены при температуре 15°C [4].



Рисунок 2 – Принципиальная схема регистрации мощности излучения.

При измерении спектральных характеристик выходное излучение лазера проходит через фокусирующую систему линз и попадает на щель монохроматора МДР-23, после прохождения через монохроматор, излучение регистрируется охлаждаемым фотоприемником Vigo PVI-4TE-10.6, с использованием техники синхронного детектирования и синхронного усилителя Unipan Lock-in Nanovoltmeter type 232B [4].



Рисунок 3 – Принципиальная схема для измерения спектральных характеристик.

Для регистрации спектров лазеров, генерирующих излучение в спектральной области 4.6 мкм в монохроматоре МДР-23 использовалась дифракционная решётка 150 мм<sup>-1</sup>. Для регистрации спектров лазеров, генерирующих излучение в спектральной области 8 мкм в монохроматоре МДР 23 использовалась дифракционная решётка 75 мм<sup>-1</sup>.

Методика измерения спектральных характеристик с временным разрешением заключается В следующем: выходное излучение ККЛ собирается оптической системой и фокусируется на входную щель монохроматора МДР-23, после прохождения через монохроматор, излучение регистрируется охлаждаемым фотоприемником Vigo PVI-4TE-10.6, результирующая осциллограмма, описывающая распределение интенсивности в спектральном диапазоне, определяемом разрешением монохроматора, записывается при помощи осциллографа Infiniium Agilent 54854А с полосой пропускания 1 ГГц. После регистрации осциллограммы происходит поворот решётки монохроматора и регистрация следующей осциллограммы. Осциллограммы регистрируются на всём спектральном диапазоне соответствующем спектру генерации с шагом на как минимум на порядок меньше межмодового расстояния. Все записанные осциллограммы собираются в матрицу значений, позволяющую получить изменение спектра генерации за время импульса накачки [5].



Рисунок 4 – Принципиальная схема регистрации динамических характеристик ККЛ

Методика измерения распределения интенсивности излучения в ближнем поле заключается в следующем: Излучение ККЛ коллимируется с помощью короткофокусной линзы C093TME-F с просветляющим покрытием на 8 мкм или с помощью короткофокусной линзы C093TME-E с просветляющим покрытием на 4.6 мкм, затем сколлимированное излучение попадает на экран очень чувствительной болометрической камеры DataRay WinCamD-IR-BB.

Методика измерения распределения интенсивности излучения в дальнем поле принципиально отличается от методики измерения распределения интенсивности излучения в ближнем поле отсутствием линзы и положением фотоприемного устройства в непосредственной близости от источника излучения.

Параметр качества луча M<sup>2</sup> определяется как отношение расходимости реального луча к теоретической, ограниченной дифракцией расходимости «идеального» гауссова пучка с тем же диаметром перетяжки.

$$M^2 = \frac{\Theta}{\theta},\tag{1}$$

Где Θ — измеренная расходимость реального луча в дальней зоне, а θ — теоретическая расходимость в дальнем поле «идеального» гауссова луча который имеет тот же диаметр перетяжки, что и измеренный луч.



Рисунок 5 – Принципиальная схема измерения распределения интенсивности излучения в ближнем поле ККЛ

### Исследование мощностных характеристик ККЛ

Ватт-амперные характеристики пропускании измерялись при импульсов тока с длительностью 100 нс и частотой повторения 11.5 кГц. мощность Выходная оптическая детектировалась с помощью откалиброванного термоэлектрического преобразователя (Thorlabs S401). Все были проведены температуре 20°C. Примеры измерения при Ватт-Амперных экспериментальных характеристик представлены на рисунках 6-9.

Порог генерации определяется путём аппроксимации линейного участка Ватт-амперной характеристики рисунок 6. Пороговая плотность тока рассчитывается как отношение порогового тока к площади полоска ККЛ.



Рисунок 6 – Типичная Ватт-Амперная характеристика ККЛ в импульсном режиме генерации с длиной полоска 0.77 мм и шириной 40 мкм, при температуре 20°С; вставка – определение порога генерации

Дифференциальная эффективность и внутренние потери определялись экспериментально через угол наклона Ватт-Амперной характеристики на линейном участке для нескольких образцов с различной длиной резонатора, типичный график определения дифференциальной квантовой эффективности на рисунке 7. Наклон аппроксимации экспериментальных данных определяет внутренние потери, а пересечение с осью ординат, при нулевой длине, определяет значение внутреннего квантового выхода.

Для определения характеристической температуры порога генерации проводился анализ температурной зависимости порогового тока (рисунок 8).

Анализ экспериментальной зависимости порогового тока от температуры показал, что в широком температурном диапазоне 15°C - 70°C



Рисунок 7 – Определение дифференциальной эффективности ККЛ



Рисунок 8 – Температурная зависимость порогового тока для ККЛ, излучающего вблизи 8 мкм

значение характеристической температуры составило  $T_0=128\pm 3$  К. Полученные результаты можно расценивать как признак высокого совершенства гетероструктур созданных квантово-каскадных лазеров. Так же следует отметить, что пороговый ток имеет сравнительно низкую скорость роста при высоких температурах.

Для определения эффективности ККЛ было проведено исследование Ватт-Вольт-Амперных характеристик. Расчёт эффективности производился по формуле:

$$\eta = \frac{P}{I * U} * 100\%,$$
 (2)



Рисунок 9 – Ватт-Вольт-Амперная характеристика ККЛ, излучающего вблизи 8 мкм

### Исследование пространственных характеристик излучения ККЛ

Пространственное распределение интенсивности измерялось В импульсном режиме генерации ККЛ с частотой повторения импульсов от 50 кГц до 1 кГц, посредством накопления сигнала матричным фотоприемным устройством болометрической камерой DataRay WinCamD-IR-BB. Типичное распределение интенсивности излучения в ближнем поле представлено на рисунке 10. Распределение интенсивности излучения в дальнем поле представлено на рисунке 11.



Рисунок 10 – Распределение интенсивности излучения в ближнем поле полоскового ККЛ с шириной полоска 50 мкм и длиной 3 мм а) 1.01I<sub>th</sub>, б)1.5I<sub>th</sub> в)3.5I<sub>th</sub>

Типичные результаты исследования параметра качества луча (M<sup>2</sup>) для полоскового ККЛ с шириной полоска 50 мкм и длиной 3 мм представлены на рисунках 12, 13.

Так же в работе представлены результаты экспериментов по вводу излучения ККЛ в поликристаллическое оптическое волокно AgCl/AgBr с сердцевиной/оболочкой, диаметр сердцевины 240 мкм, NA =  $0,30 \pm 0,03$  (Арт Фотоника 2STL) рисунок 14, и через полое оптическое волокно диаметром 500 мкм NA =  $0,05 \pm 0,01$  (Арт Фотоника 2SXR) рисунок 15.



Рисунок 11 – Распределение интенсивности излучения в дальнем поле полоскового ККЛ с шириной полоска 50 мкм и длиной 3 мм а) 1.01I<sub>th</sub>, б)1.5I<sub>th</sub> в)3.5I<sub>th</sub>



Рисунок 12 – Пример определения параметра луча M<sup>2</sup> при различных токах накачки полоскового ККЛ с шириной 50 мкм и длиной 3 мм



Рисунок 13 – Зависимость параметра луча М<sup>2</sup> и распределения интенсивности в ближнем поле от тока накачки ККЛ с шириной полоска 50 мкм и длиной 3 мм



Рисунок 14 – Зависимость коэффициента ввода излучения ККЛ в оптическое волокно 2STL(AgCl/AgBr) от тока накачки.



Рисунок 15 – Зависимость коэффициента ввода излучения ККЛ в полое оптическое волокно 2SXR от тока накачки.

### Исследование спектральных характеристик излучения ККЛ

Спектральные характеристики измерялись при пропускании импульсов тока с длительностью 100 нс и частотой повторения 11.5 кГц. Выходная оптическая мощность детектировалась с помощью фотоприемника Vigo PVI-4TE-10.6. Типичный график спектральных характеристик ККЛ, излучающего вблизи 8 мкм представлен на рисунке 16.



Рисунок 16 – Типичная спектральная характеристика ККЛ с длиной полоска 3 мм и шириной 40 мкм, в импульсном режиме генерации при температуре 20°С

Для оценки изменения температуры активной области были проведены исследования температурных зависимостей спектра генерации ККЛ с резонатором Фабри-Перо. Определение показателя преломления было осуществлено исходя из выражения:

$$n = \frac{\lambda^2}{2L\Delta} , \qquad (3)$$

где λ – длина волны максисума интенсивности, L – длина резонатора Фабри-Перо, Δ – среднее межмодовое расстояние гребенчатого спектра.

Для определения коэффициента термического изменения показателя преломления были проведены измерения усреднённых спектров ККЛ при двух температурах 288К и 308 К. Определив из данных спектров межмодовое расстояние и зная точно длину резонатора (2.95 мм) по формуле 3 были определены коэффициенты преломления для температур 288 К и 308 К которые составили 3,22 и 3,26, соответственно.

Определение линейной частотной модуляции скорости изменения длины волны излучения со временем (чирпа) были проведены путем исследования динамики спектров ККЛ с различным током накачки (рисунки 17, 18).

Скорость нагрева активной области ККЛ с резонатором Фабри-Перо может быть оценена с помощью уравнения:

$$T' = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t} \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^{-1} = \frac{n}{\lambda_m} \frac{\partial \lambda_m}{\partial t} \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^{-1},\tag{4}$$

где  $\partial \lambda_m / \partial t$  – чирп мод резонатора Фабри-Перо, а  $\partial n / \partial T$  – коэффициент термического изменения показателя преломления,  $\lambda_m$  – дина волны генерации моды резонатора Фабри-Перо, n – показатель преломления активной области ККЛ. Данная методика определения скорости нагрева активной области легла в основу запатентованного «способа отбраковки квантово-каскадных лазеров», номер патента #№2744397 от 9 марта 2021 г.



Рисунок 17 – Динамика спектра полоскового ККЛ, излучающего в близи 8 мкм при комнатной температуре. Ток накачки 4 А



Рисунок 18 – Динамика пектра полоскового ККЛ, излучающего в близи 8 мкм при комнатной температуре. Ток накачки 9 А

### Выводы

В ходе выполнения работы были созданы и исследованы образцы ККЛ для спектральной области 8 мкм и получены важные результаты, имеющие высокое научное и практическое значение:

- Получены мощные импульсные ККЛ, работающие при комнатной температуре с выходной мощностью, превышающей 20 Вт, что для спектрального диапазона 8 мкм является мировым рекордом.

- Разработана методика измерения спектров ККЛ с временным разрешением, что позволило определить величину чирпа одночастотных ККЛ.

- На основе методики измерения спектров ККЛ с временным разрешением получен и запатентован метод определения скорости нагрева активной области ККЛ.

- По результатам исследований опубликованы 45 научных работ (индексируемых WoS и Scopus), в том числе в журналахы из квартиля Q1, а так же сделаны докладына 21 международной конференции.

# Список литературы

- N. Bandyopadhaya, S. Slivken, Y. Bai, and M. Razeghi, «High power, continuous wave, room temperature operation of λ ~ 3.4 μ m and λ ~ 3.55 μ m InP-based quantum cascade lasers» Appl. Phys. Lett.100, 212104 (2012).
- A. Evans, J. S. Yu, S. Slivken, and M. Razeghi «Continuous-wave operation of quantum-cascade lasersat room temperature» Cite as: Appl. Phys. Lett. 85, 2166 (2004).
- 3) A. Lyakh, R. Maulini, A. Tsekoun, R. Go, S. Von der Porten, C. Pflugl, L. Diehl, F. Capasso, and C. K. N. Patel «High-performance continuous-wave room temperature 4.0- μ m quantum cascade lasers with single-facet optical emission exceeding 2 W» Proc. Natl. Acad. Sci. USA 107, 18799–18802 (2010).
- 4) 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
  «High-power (above 1 W) room-temperature quantum cascade lasers for the longwavelength IR range»
  QUANTUM ELECTRON, 2020, 50 (2), 141–142
- 5) В.В. Дюделев, Д.А. Михайлов, А.В. Бабичев, 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 «Динамика спектров квантово-каскадных лазеров, генерирующих частотные гребенки в длинноволновом инфракрасном диапазоне» Журнал технической физики, 2020, том 90, вып. 8
- 6) N. Bandyopadhaya, S. Slivken, Y. Bai, and M. Razeghi,
  "High power, continuous wave, room temperature operation of λ ~ 3.4 µm and λ ~ 3.55 µm InP-based quantum cascade lasers,"
  Appl. Phys. Lett.100, 212104 (2012).
- 7) N. Bandyopadhaya, Y. Bai, B. Gokden, A. Myzaferi, S. Tsao, S. Slivken, and M. Razeghi,
  "Watt level performance of quantum cascade lasers in room temperature continuous wave operation at λ ~ 3.76 µm," Appl. Phys. Lett. 10097, 131117 (2010).
- A. Lyakh, R. Maulini, A. Tsekoun, R. Go, S. Von der Porten, C. Pflugl, L. Diehl, F. Capasso, and C. K. N. Patel, "High-performance continuous-wave room temperature 4.0-µm quantum"

cascade lasers with single-facet optical emission exceeding 2 W," Proc. Natl. Acad. Sci. USA 107, 18799–18802 (2010).

- A. Lyakh, R. Maulini, A. Tsekoun, R. Go, and C. K. N. Patel, "Tapered 4.7 μm quantum cascade lasers with highly strained active region composition delivering over 4.5 Watts of continuous wave optical power," Opt. Express 20, 4382–4388 (2012).
- 10) Y. Yao, X. Wang, J.-Y. Fan, and C. Gmachl, "High performance continuum-to-continuum' quantum cascade lasers with a broad gain bandwidth of over 400 cm-1," Appl. Phys. Lett. 97, 081115 (2010).
- 11) Y. Bai, N. Bandyopadhyay, S. Tsao, S. Slivken, and M. Razeghi,"Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency," Appl. Phys. Lett. 98, 181102 (2011).
- 12) A. Lyakh, M. Suttinger, R. Go, P. Figueiredo, and A. Todi,
  "5.6 µm quantum cascade lasers based on a two-material active region composition with a room temperature wall-plug efficiency exceeding 28%," Appl. Phys. Lett. 109, 121109 (2016).
- 13) R. Maulini, A. Lyakh, A. Tsekoun, and C. K. N. Patel,
  "λ ~ 7.1 µm quantum cascade lasers with 19% wall-plug efficiency at room temperature,"
  Opt. Express 19, 17203–17211 (2011).
- 14) A. Lyakh, R. Maulini, A. Tsekoun, R. Go, and C. K. N. Patel,
  "Multiwatt long wavelength quantum cascade lasers based om high strain composition with 70% injection efficiency,"
  Opt. Express 20, 24272–24279 (2012).
- 15) F. Xie, C. Caneau, H. Leblanc, D. Caffey, L. Hughes, T. Day, and C. Zah, "Watt-level room temperature continuous-wave operation of quantum cascade lasers with  $\lambda > 10 \ \mu m$ ," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 19, 1200508 (2013).
- 16) A. Evans and M. Razeghi,
  "Reliability of strain-balanced GaInAs/AlInAs/InP quantum cascade lasers under continuous-wave roomtemperature operation," Appl. Phys. Lett. 88, 261106 (2006).
- 17) A. Lyakh, R. Maulini, A. Tsekoun, and C. K. N. Patel, "Progress in high-performance quantum cascade lasers," Opt. Eng. 49, 111105(2010).

- 18) S. Lee, F. Banit, W. Worner, and A. Wacker,
  "Quantum mechanical wavepacket transport in quantum cascade laser structures,"
  Phys.Rev. B 73, 245320 (2006).
- 19) T. Kubis, C. Yeh, and P. Vogl,

"Quantum theory of transport and optical gain in quantum cascade lasers," Phys. Stat. Solidi C 5, 232–235 (2008).

- 20) R. Kazarinov and R. Suris,"Electric and electromagnetic properties of semiconductors with a superlattice,"Sov. Phys. Semicond. 6, 120 (1972).
- 21) J. Khurgin, Y. Dikmelik, P. Liu, A. Hoffman, M. Escarra, K. Franz, and C. Gmachl,

"Role of interface roughness in the transport and lasing characteristics of quantum cascade lasers,"

Appl. Phys. Lett. 94, 091101 (2009).

## Перечень публикаций результатов исследования

- А1) Врубель,ИИ; Черотченко,ЕД; Михайлов,ДА; Новиков,ИИ; Папылев,ДС; Чистяков,ДВ; Мыльников,ВЮ; Абдулразак,СХ; Дюделев,ВВ; Соколовский,ГС
  «Нагрев квантового каскадного лазера при импульсной накачке: теория и эксперимент»
  Письма в ЖТФ, т.50, 7, 2024, с. 3 7
- А2) Курицын,ДИ; Антонов,АВ; Морозов,СВ; Анфертьев,ВА; Черняева,МБ; Вакс,ВЛ; Дюделев,ВВ; Михайлов,ДА; Чистяков,ДВ; Слипченко,СО; Лютецкий,АВ; Гладышев,АГ; Бабичев,АВ; Карачинский,ЛЯ; Новиков,ИИ; Пихтин,НА; Егоров,АЮ; Соколовский,ГС; Гавриленко,ВИ «Перестройка частоты излучения арочных квантово-каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона» Письма в ЖТФ, т.50, 5, 2024, с. 23 27
- А3) Дюделев, ВВ; Черотченко, ЕД; Врубель, ИИ; Михайлов, ДА; Чистяков, ДВ; Мыльников, ВЮ; Лосев, СН; Когновицкая, ЕА; Бабичев, АВ; Лютецкий, АВ; Слипченко, СО; Пихтин, НА; Абрамов, АВ; Гладышев, АГ; Подгаецкий, КА; Андреев, АЮ; Яроцкая, ИВ; Ладугин, МА; Мармалюк, АА; Новиков, ИИ; Кучинский, ВИ; Карачинский, ЛЯ; Егоров, АЮ; Соколовский, ГС «Квантово-каскадные лазеры для спектрального диапазона 8 мкм: технология, дизайн и анализ» УФН, т. 194, 1, 2024, с. 98 105.
- А4) Дюделев, ВВ; Черотченко, ЕД; Михайлов, ДА; Чистяков, ДВ; Слипченко, СО; Лютецкий, АВ; Гладышев, АГ; Бабичев, АВ; Карачинский, ЛЯ; Новиков, ИИ; Пихтин, НА; Егоров, АЮ; Кондрашов, АВ; Семенов, АА; Соколовский, ГС; Устинов, АБ
  «Генерация случайных последовательностей за счет переключения поперечных мод в квантовом каскадном лазере.» Письма ЖТФ, т.49, 22, 2023, с. 35 38
- A5) Vrubel,II; Cherotchenko,ED; Mikhailov,DA; Chistyakov,DV; Abramov,AV; Dudelev,VV; Sokolovskii,GS
   «Active Region Overheating in Pulsed Quantum Cascade Lasers: Effects of Nonequilibrium Heat Dissipation on Laser Performance.» Nanomaterials, v.13, 23, 2023, ArtNo: #2994
- А6) Подгаецкий, КА; Лобинцов, АВ; Данилов, АИ; Иванов, АВ; Ладугин, МА; Мармалюк, АА; Дюделев, ВВ; Михайлов, ДА; Чистяков, ДВ; Бабичев, АВ;

Савченко,ГМ; Лютецкий,АВ; Слипченко,СО; Пихтин,НА; Гладышев,АГ; Новиков,ИИ; Карачинский,ЛЯ; Егоров,АЮ; Соколовский,ГС «Диэлектрические высокоотражающие зеркальные покрытия для квантовых каскадных лазеров с длиной волны излучения 4-5 мкм.» Квант. электрон., т.53, 5, 2023, с. 370 – 373

- А7) Подгаецкий,КА; Лобинцов,АВ; Данилов,АИ; Иванов,АВ; Ладугин,МА; Мармалюк,АА; Кузнецов,ЕВ; Дюделев,ВВ; Михайлов,ДА; Чистяков,ДВ; Бабичев,АВ; Когновицкая,ЕА; Лютецкий,АВ; Слипченко,СО; Пихтин,НА; Гладышев,АГ; Новиков,ИИ; Карачинский,ЛЯ; Егоров,АЮ; Соколовский,ГС
  «Металлодиэлектрические зеркальные покрытия для квантовых каскадных лазеров с длиной волны излучения 4-5 мкм.»
  Квант. электрон., т.53, 8, 2023, с. 641 644
- А8) Дюделев, ВВ; Черотченко, ЕД; Бабичев, АВ; Михайлов, ДА; Чистяков, ДВ; Лосев, СН; Савченко, ГМ; Лютецкий, АВ; Слипченко, СО; Кучинский, ВИ; Веселов, ДВ; Пихтин, НА; Соколовский, ГС «Квантово-каскадные лазеры среднего инфракрасного диапазона».
  В книге (сборнике): ФТИ им. А.Ф. Иоффе 105 лет, 2023, с. 23 26 ISBN: 978-5-93634-073-4
- A9) Babichev,AV; Gladyshev,AG; Denisov,DV; Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Slipchenko,SO; Lyutetskii,AV; Karachinsky,LYa; Novikov,II; Andreev,AYu; Yarotskaya,IV; Podgaetskiy,KA; Marmalyuk,AA; Padalitsa,AA; Ladugin,MA; Pikhtin,NA; Sokolovskii,GS; Egorov,AYu «Heterostructures of Quantum-Cascade Lasers Based on Composite Active Regions» Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., 2023, v.87
- A10) Cherotchenko,E; Dudelev,V; Mikhailov,D; Savchenko,G; Chistyakov,D; Losev,S; Babichev,A; Gladyshev,A; Novikov,I; Lutetskiy,A; Veselov,D; Slipchenko,S; Denisov,D; Andreev,A; Yarotskaya,I; Podgaetskiy,K; Ladugin,M; Marmalyuk,A; Pikhtin,N; Karachinsky,L; Kuchinskii,V; Egorov,A; Sokolovskii,G
  «High-Power Quantum Cascade Lasers Emitting at 8 mum: Technology and Analysis», Nanomaterials, 2022, v.12, 22
- А11) Бабичев, АВ; Михайлов, ДА; Колодезный, ЕС; Гладышев, АГ; Вознюк, ГВ;Митрофанов, МИ; Денисов, ДВ; Слипченко, СО; Лютецкий, АВ;

Дюделев, ВВ; Евтихиев, ВП; Карачинский, ЛЯ; Новиков, ИИ; Соколовский, ГС; Пихтин, НА; Егоров, АЮ «Поверхностно-излучающие квантово-каскадные лазеры с дифракционной решеткой, сформированной методом прямой ионной литографии» ФТП, 2022, т.56, 9

- А12) Бабичев,АВ; Михайлов,ДА; Чистяков,ДВ; Колодезный,ЕС; Гладышев,АГ; Вознюк,ГВ; Митрофанов,МИ; Денисов,ДВ; Слипченко,СО; Лютецкий,АВ; Дюделев,ВВ; Евтихиев,ВП; Карачинский,ЛЯ; Новиков,ИИ; Пихтин,НА; Егоров,АЮ; Соколовский,ГС «Исследование пространственных характеристик излучения поверхностноизлучающих квантово-каскадных лазеров с кольцевым резонатором» ФТП, 2022, т.56, 6
- A13) Cherotchenko,E; Mikhailov,D; Dudelev,V; Losev,S; Babichev,AB; Gladyshev,AG; Novikov,II; Lutetskiy,A; Veselov,D; Slipchenko,S; Pikhtin,N; Karachinsky,LY; Denisov,D; Kuchinskii,V; Kognovitskaya,E; Egorov,AY; Tessier,R; Baranov,AN; Sokolovskii,G
  «Observation of Long Turn-on Delay in Pulsed Quantum Cascade Lasers» J. Lightwave Technology, 2022, v.40, 7
- А14) Бабичев,АВ; Колодезный,ЕС; Гладышев,АГ; Денисов,ДВ; Вознюк,ГВ; Митрофанов,МИ; Михайлов,ДА; Чистяков,ДВ; Курицын,ДИ; Дюделев,ВВ; Слипченко,СО; Лютецкий,АВ; Евтихиев,ВП; Карачинский,ЛЯ; Новиков,ИИ; Морозов,СВ; Соколовский,ГС; Пихтин,НА; Егоров,АЮ «Квантово-каскадный лазер с выводом излучения через текстурированный слой»
  ФТП, 2021, т.55, 11
- А15) Бабичев,АВ; Гладышев,АГ; Денисов,ДВ; Дюделев,ВВ; Михайлов,ДА; Слипченко,СО; Лютецкий,АВ; Карачинский,ЛЯ; Новиков,ИИ; Андреев,АЮ; Яроцкая,ИВ;Подгаецкий,КА; Мармалюк,АА; Падалица,АА; Ладугин,МА; Пихтин,НА; Соколовский,ГС; Егоров,АЮ «Гетероструктуры квантово-каскадных лазеров с неселективным заращиванием методом газофазной эпитаксии» Письма ЖТФ, 2021, т.47, 24
- А16) Дюделев, ВВ; Михайлов, ДА; Бабичев, АВ; Андреев, АД; Лосев, СН; Когновицкая, ЕА; Бобрецова, ЮК; Слипченко, СО; Пихтин, НА; Гладышев, АГ; Денисов, ДВ; Новиков, ИИ; Карачинский, ЛЯ; Кучинский, ВИ; Егоров, АЮ; Соколовский, ГС

«Мощные (более 1 Вт) квантовые каскадные лазеры для длинноволнового ИК диапазона при комнатной температуре» Квант. электрон., 2020, т.50, 2

- A17) Дюделев, BB; Михайлов,ДА; Бабичев,АВ; Савченко, ГМ; Лосев,СН; Когновицкая.ЕА: Лютецкий, АВ; Слипченко,СО; Пихтин,НА; Гладышев,АГ; Денисов, ДВ; Новиков,ИИ: Карачинский,ЛЯ; Кучинский, ВИ; Егоров, АЮ; Соколовский, ГС «Разработка и исследование мощных квантово-каскадных лазеров для спектрального диапазона 4.5–4.6 мкм» Квант. электрон., 2020, т. 50, 11
- А18) Дюделев, ВВ; Михайлов, ДА; Бабичев, АВ; Лосев, СН; Когновицкая, ЕА; Лютецкий, АВ; Слипченко, СО; Пихтин, НА; Гладышев, АГ; Денисов, ДВ; Новиков, ИИ; Карачинский, ЛЯ; Кучинский, ВИ; Егоров, АЮ; Соколовский, ГС
  «Квантово-каскадные лазеры мощностью 10 Вт для спектральной области 4.6 мкм»
  КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, 2020, т. 50, 8
- А19) Дюделев, ВВ; Михайлов, ДА; Бабичев, АВ; Лосев, СН; Когновицкая, ЕА; Лютецкий, АВ; Слипченко, СО; Пихтин, НА; Гладышев, АГ; Денисов, ДВ; Новиков, ИИ; Карачинский, ЛЯ; Кучинский, ВИ; Егоров, АЮ; Соколовский, ГС
  «Динамика спектров квантово-каскадных лазеров, генерирующих частотные гребенки в длинноволновом инфракрасном диапазоне» Журнал Технической Физики, 2020, т.90, 8
- А20) В.В. Дюделев, Д.А. Михайлов, В.Ю. Мыльников, А.В. Бабичев, С.Н. Лосев, Е.А. Когновицкая, А.Г. Гладышев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Д.В. Денисов, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, В.И. Кучинский, А.Ю. Егоров, Г.С. Соколовский «Исследование пространственных характеристик излучения квантовыхкаскадных лазеров для спектрального диапазона 8 µm» Письма в ЖТФ, 2020, т. 46, в. 22
- A21) Vladislav V. Dudelev, Andrey V. Babichev, Dmitriy A. Mikhailov, Andrey G. Gladyshev, Sergey N. Losev, Elena A. Kognovitskaya, Innokenty I. Novikov, Andrey V. Lyuretskiy, Sergey O. Slipchenko, Nikita A. Pikhtin, Leonid Ya. Karachinsky, Anton Yu. Egorov, Grigorii S. Sokolovskii, «Generation of Frequency Combs by Quantum Cascade Lasers Emitting in the 8-μm Wavelength Range»

Technical Physics Letters Volume 45, Issue 10, 2019, Pages 1027-1030

- A22) V. Babichev, V. V. Dudelev, A. G. Gladyshev, D. A. Mikhailov, A. S. Kurochkin, E. S. Kolodeznyi, V. E. Bougrov, V. N. Nevedomskiy, L. Ya. Karachinsky, I. I. Novikov, D. V. Denisov, A. S. Ionov, S. O. Slipchenko, A. V. Lutetskiy, N. A. Pikhtin, G. S. Sokolovskii, and A. Yu. Egorov «High-Power Quantum-Cascade Lasers Emitting in the 8-µm Wavelength Range» Technical Physics Letters Volume 45, Issue 7, 2019, Pages 735-738.
- A23) V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, A.D. Andreev, E.A. Kognovitskaya, A.V. Lyutetskiy, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, A.S. Ionov, A.V. Babichev, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinskii, V.I. Kuchinskii, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii
  «Tunable single-frequency source based on a DFB laser array for the spectral region of 1.55 mm»
  QUANTUM ELECTRON 49 (12), 1158–1162, 2019.
- A24) Dudelev, V.V., Mikhailov, D.A, Chistyakov, D.V., Kognovitskaya, E.A., Lyutetskiy, A.V., Slipchenko, S.O., Pikhtin, N.A., Gladyshev, A.G., Denisov, D.V., Voropaev, K.O., Ionov, A.S., Babichev, A.V., Novikov, I.I., Karachinskii, L.Y., Kuchinskii, V.I., Egorov, A.Y. Sokolovskii, G.S. «High-coupling distributed feedback lasers for the 1.55 μm spectral region» Quantum Electronics, 49 (9), pp. 801-803, 2019.
- A25) Cherotchenko,E; Dudelev,V; Mikhailov,D; Savchenko,G; Chistyakov,D; Losev,S; Babichev,A; Gladyshev,A; Novikov,I; Lutetskiy,A; Veselov,D; Slipchenko,S; Denisov,D; Andreev,A; Yarotskaya,I; Podgaetskiy,K; Ladugin,M; Marmalyuk,A; Pikhtin,N; Karachinsky,L; Kuchinskii,V; Egorov,A; Sokolovskii,G
  «High-Power Quantum Cascade Lasers for 8 μm Spectral Range» 2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC; Munich, Germany; 26-30 June 2023

A26) Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Babichev,AV; Cherochenko,ED; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Sakharova,TV; Artyushenko,VG; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS «Influence of spatial characteristics of high-power quantum-cascade laser beams on the fiber-coupling efficiency» 2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022; St. Petersburg, Russia; 20 June 2022 through 24 June 2022

- A27) Mylnikov,VYu; Mikhailov,DA; Dudelev,VV; Cherotchenko,ED; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Losev,SN; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Novikov,II; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS
  «Transverse Mode Structure of Mid-Infrared Quantum-Cascade Lasers: Experiment and Numerical Simulations»
  2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022; St. Petersburg, Russia; 20 June 2022 through 24 June 2022
- A28) Dudelev,VV; Cherotchenko,ED; Mikhailov,DA; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Andreev,AYu; Yarotskaya,IV; Podgaetskiy,KA; Marmalyuk,AA; Padalitsa,AA; Ladugin,MA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS «Efficiency of 8 mum-emitting quantum cascade lasers with various upper cladding compositions»
  2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022; St. Petersburg, Russia; 20 June 2022 through 24 June 2022
- A29) Cherotchenko,ED; Mylnikov,VYu; Fedorova,KA; Mikhailov,DA; Kuznetsov,IA; Dudelev,VV; Chistyakov,DV; Losev,SN; Averkiev,NS; Rafailov,EU; Sokolovskii,GS
  «Second Harmonic Generation with Half-Order Periodically Poled LiNbO3 Crystal»
  2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022; St. Petersburg, Russia; 20 June 2022 through 24 June 2022
- A30) Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Babichev,AV; Cherotchenko,ED; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Andreev,AYu; Yarotskaya,IV; Podgaetskiy,KA; Marmalyuk,AA; Padalitsa,AA; Ladugin,MA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS «High-power 4.5-mum Quantum Cascade Lasers with Two-Stage Epitaxial Growth»
  2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022; St. Petersburg, Russia; 20 June 2022 through 24 June 2022
- A31) Babichev,AV; Mikhailov,DA; Kolodeznyi,ES; Gladyshev,AG; Voznyuk,GV; Mitrofanov,MI; Slipchenko,SO; Lyutetskii,AV; Dudelev,VV; Evtikhiev,VP; Karachinsky,LYa; Novikov,II; Sokolovskii,GS; Pikhtin,NA; Egorov,Ayu «Surface Emitting Ring Quantum-cascade Lasers made by Focused Ion Beam Milling»

2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022; St. Petersburg, Russia; 20 June 2022 through 24 June 2022

- A32) Dudelev,VV; Cherotchenko,ED; Mikhailov,DA; Savchenko,GM; Losev,SN; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS «Free Carrier Absorption Measurement in Mid-Infrared Quantum Cascade Lasers»
  2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022; St. Petersburg, Russia; 20 June 2022 through 24 June 2022
- A33) Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Cherotchenko,ED; Chistyakov,DV; Babichev,AV; Mylnikov,VYu; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS «High-power quantum-cascade lasers for 8 mum spectral region» Novel Optical Materials and Applications - 2022; Maastricht, Limburg, Netherlands; 24-28 July 2022
- A34) Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Chistyakov,DV; Babichev,AV; Mylnikov,VY; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LY; Egorov,AY; Sokolovskii,GS «Heating Dynamics of Pulse-Pumped Quantum-Cascade Lasers»
  2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2021; Munich, Germany, virtual; 21-25 June 2021
- A35) Cherotchenko,ED; Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Losev,SN; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Novikov,II; Lutetskiy,AV; Veselov,DA; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LY; Denisov,DV; Kuchinskii,VI; Kognovitskaya,EA; Egorov,AY; Teissier,R; Baranov,AN; Sokolovskii,GS
  «Observation of the Turn-on Delay in InAs- And InP-based Quantum Cascade Lasers under Pulsed Pumping with Non-zero Rise-time»
  2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2021; Online, Munich, Germany; 21-25 June 2021
- A36) Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Cherotchenko,ED; Chistyakov,DV; Babichev,AV; Mylnikov,VYu; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS «Dynamics and lateral distribution of heating in the quantum-cascade laser cavity under pulsed pumping»

Novel Optical Materials and Applications, NOMA 2021 - Part of OSA Advanced Photonics Congress 2021; Online, Washington, DC, USA; 26-29 July 2021

- A37) Cherotchenko,ED; Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Losev,SN; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Novikov,II; Lutetskiy,AV; Veselov,DA; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LY; Denisov,DV; Kuchinskii,VI; Kognovitskaya,EA; Egorov,AY; Teissier,R; Baranov,AN; Sokolovskii,GS

  « Turn-on delay in the mid-infrared quantum-cascade lasers: Experiment and numerical simulations»
  2021 Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2021; Online, San Jose, CA, USA; 9-14 May 2021
- A38) Dudelev,VV; Savchenko,GM; Mikhailov,DA; Cherotchenko,ED; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Denisov,DV; Kuchinskii,VI; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS
  «High-Power (13 W) Quantum-Cascade Lasers for Long Wavelength Infrared Range»
  Novel Optical Materials and Applications, NOMA 2020; Washington, USA; 13-16 July 2020
- A39) Cherotchenko,ED; Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Losev,SN; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Novikov,II; Lutetskiy,AV; Veselov,DA; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LYa; Denisov,DV; Kuchinskii,VI; Kognovitskaya,EA; Egorov,AYu; Teissier,R; Baranov,AN; Sokolovskii,GS « Observation of the increase in turn-on delay of quantum cascade lasers under pulsed electrical pumping with finite rise time» International Conference PhysicA.SPb/2020; St.Petersburg, Russian Federation; 19–23 October 2020
- A40) Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS «High Power Quantum-Cascade Lasers for 8 mu m Spectral Region» International Conference Laser Optics 2020 (ICLO 2020); St. Petersburg, Russia; 2-6 November, 2020
- A41) Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Babichev,AV; Mylnikov,VYu; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS «The Technique for QCLs Heating Dynamics Mesurements»

International Conference Laser Optics 2020 (ICLO 2020); St. Petersburg, Russia; 2-6 November, 2020

- A42) Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Losev,SN; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Sokolovskii,GS «Dynamics of Frequency Combs Generation by QCLs in 8 mu m Wavelength Range» International Conference Laser Optics 2020 (ICLO 2020); St. Petersburg, Russia; 2-6 November, 2020
- A43) Cherotchenko,ED; Dudelev,VV; Mikhailov,DA; Babichev,AV; Gladyshev,AG; Novikov,II; Lyutetskiy,AV; Slipchenko,SO; Pikhtin,NA; Karachinsky,LYa; Egorov,AYu; Baranov,AN; Sokolovskii,GS «Turn-on Delay of Quantum Cascade Lasers under Pulsed Pumping with Nonzero Rise-time» International Conference Laser Optics 2020 (ICLO 2020); St. Petersburg, Russia; 2-6 November, 2020
- A44) Dudelev, V.V., Mikhailov, D.A., Babichev, A.V., Andreev, A.D., Kognovitskaya, E.A., Bobretsova, Y.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. «High-power  $\lambda = 8 \ \mu m$  quantum-cascade lasers at room temperature» Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1400(6), 066048.
- A45) Vladislav V. Dudelev, Andrey V. Babichev, Dmitriy A. Mikhailov, Andrey G. Gladyshev, Sergey N. Losev, Elena A. Kognovitskaya, Innokenty I. Novikov, Andrey V. Lyuretskiy, Sergey O. Slipchenko, Nikita A. Pikhtin, Leonid Ya. Karachinsky, Anton Yu. Egorov, Grigorii S. Sokolovskii «Quantum-cascade lasers with U-shaped resonator: Single frequency generation at room temperature»
  THE EUROPEAN CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (Wavelength control of QCLs), CLEO\_EUROPE\_2019