

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Квантово-каскадные лазеры для спектрального диапазона 8 мкм: технология, дизайн и анализ

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.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

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) привлекают огромное внимание научного сообщества благодаря широким возможностям их применения в самых различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, здравоохранения, охраны окружающей среды и многих других научных и технических областях. В данной статье, помимо обзора основных применений и состояния разработки и исследования мощных ККЛ среднего инфракрасного диапазона, рассмотрены особенности технологии их изготовления, позволяющие получить высокие пиковые мощности, а также обсуждается влияние перегрева активной области на выходную оптическую мощность и спектральные характеристики. Проведено сравнение характеристик ККЛ с одинаковыми параметрами резонатора, но отличающихся активной областью, созданной на основе согласованных с подложкой или напряжённых гетеропар, что обеспечивает различную величину энергетического барьера между верхним лазерным уровнем и континуумом. Показано, что применение напряжённых гетеропар в активной области ККЛ обеспечивает почти двукратный рост характеристической температуры  $T_0$ , а также существенно лучшую эффективность и увеличение максимальной выходной оптической мощности до более чем 21 Вт, что является мировым рекордом для ККЛ спектрального диапазона 8 мкм с одним рабочим полоском.

**Ключевые слова:** квантово-каскадный лазер, гетероструктура, средний инфракрасный диапазон, чирп, теплоотвод

PACS numbers: 42.55.Px, 42.60. – v, 78.67.Pt

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.05.039543>

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

<sup>(1)</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая 26, 194021 Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>(2)</sup> ООО "Коннектор Оптикс", ул. Домостроительная 16Б, 194292 Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>(3)</sup> Научно-исследовательский институт "Полус" им. М.Ф. Стельмаха, ул. Введенского 3, корп. 1, 117342 Москва, Российская Федерация

<sup>(4)</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский просп. 49, 197101 Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>(5)</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алферова РАН, ул. Хлопина 8, корп. 3А, 194021 г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: <sup>(\*)</sup> v.dudelev@mail.ru

Статья поступила 22 мая 2023 г.

### Содержание

1. Введение (98).
  2. Квантово-каскадные лазеры с высокими мощностными характеристиками (100).
  3. Исследование пороговых, вольт- и ватт-амперных характеристик (101).
  4. Исследование влияния температуры на выходные характеристики квантово-каскадных лазеров (102).
  5. Заключение (104).
- Список литературы (104).

### 1. Введение

Квантово-каскадные лазеры — уникальные устройства, позволяющие добиться эффективной генерации излучения в среднем инфракрасном диапазоне, представляющем особый интерес из-за наличия многих интенсивных молекулярных линий поглощения, связанных с колебательными и вращательными степенями свободы, а также из-за двух атмосферных окон прозрачности в областях 4–5 и 8–14 мкм. Совокупность уникальных свойств ККЛ, таких как компактность и эффективность в



Рис. 1. Схематическое изображение различных областей применения ККЛ.

сочетании со спектральными характеристиками, обуславливают возможность их применения в самых различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, здравоохранения, охраны окружающей среды и многих других направлениях, как схематически изображено на рис. 1. Отдельно можно выделить использование ККЛ в решении ряда актуальных задач медицинской диагностики [1], мониторинга окружающей среды [2, 3] и технологических процессов методами газовой спектроскопии [4–6]. Также ведутся разработки использования ККЛ в биомедицине [7, 8], в борьбе с терроризмом [6, 9], создании защищённых помехоустойчивых каналов оптической связи, в первую очередь в окнах прозрачности атмосферы в среднем ИК диапазоне [10–12].

Идея ККЛ впервые была предложена в 1971 г. Казариновым и Сурисом [13], описавшими униполярное устройство, основанное на сверхрешётке и генерирующее излучение за счёт внутризонных электронных переходов в зоне проводимости при приложении к структуре потенциала. В униполярном устройстве один электрон принимает участие в генерации нескольких фотонов за счёт туннелирования в соседний каскад с последующим лазерным переходом. Данный принцип фундаментально отличается от стандартного способа генерации излучения в полупроводниковых лазерах, где рекомбинация электрона зоны проводимости с дыркой в валентной зоне позволяет получить только один фотон.

Несмотря на кажущуюся простоту идеи, практическая реализация ККЛ стала возможна только в 1994 г. [14]. Это связано с особенностями динамики электронов в наноразмерных слоях, при которой скорость фоновой релаксации на гетерограницах значительно превышает скорость излучательных переходов, что требует конструирования сложных гетероструктур, обеспечивающих быстрое опустошение нижнего лазерного уровня для достижения инверсии населённости. Совокупность указанных условий приводит к чрезвычайно высокой технологической сложности гетероструктур, состоящих из ты-

сяч наноразмерных слоёв, объединённых в десятки или даже сотни идентичных каскадов.

Неослабевающий интерес к ККЛ, несмотря на их высочайшую технологическую сложность, во многом связан с тем, что лазерная генерация в среднем инфракрасном диапазоне в обычных межзонных полупроводниковых лазерах при комнатной температуре существенно затруднена из-за особенности зонного строения узкозонных полупроводников, приводящей к быстрому росту безызлучательной оже-рекомбинации с увеличением длины волны генерации, что ограничивает их применение максимальными длинами волн около 4 мкм. Альтернативным и эффективным источником ИК-излучения являются каскадные лазеры на межзонных переходах (МКЛ), в которых носители заряда, рекомбинирующие в активной области каскада, туннелируют от каскада к каскаду за счёт наличия гетеропереходов третьего рода. При этом длина волны излучения в МКЛ, так же как и в диодных лазерах, зависит от ширины запрещённой зоны межзонного перехода, определяемой в конечном счёте химическим составом материала активной области, что ограничивает их рабочий спектральный диапазон. При комнатной температуре, представляющей особый интерес для практических применений, он ограничивается 3–7 мкм [15–17]. Для сравнения, длина волны излучения ККЛ определяется положением уровней размерного квантования в зоне проводимости и регулируется изменением толщины квантовых ям без изменения состава материала внутри гетероструктуры, существенно расширяя возможный спектр генерации. Так, при комнатной температуре в ККЛ можно добиться излучения при длинах волн, приближающихся к 20 мкм [18, 19], и до 25 мкм [20] при небольшом охлаждении (240 К). Отдельным и немаловажным преимуществом структур ККЛ является возможность получать излучение терагерцевого диапазона с длинами волн порядка нескольких сотен микрон [21] со значительной мощностью [22]. Несмотря на то что пока применения ККЛ в данной области в основном

ограничены необходимостью работы при низких температурах, недавние публикации показали как принципиальную возможность использования термоэлектрического охлаждения при температурах 196 К [23] и 210 К [24], так и работу при 250 К [25]. При комнатной температуре генерация ККЛ терагерцевого излучения мощностью до единиц милливольт доступна за счёт внутрирезонаторной генерации разностной частоты при искусственном повышении нелинейности второго порядка в структуре [26, 27].

С 1994 года технология ККЛ претерпела огромные изменения. Текущие значения рабочих характеристик являются результатом постоянного улучшения конструкции, качества материалов и технологии изготовления, что отразилось на рабочих температурах, пороговых токах, выходных мощностях, спектральных и пространственных характеристиках выходного излучения. В данной статье мы рассматриваем особенности технологии изготовления ККЛ, позволяющие получить высокие пиковые мощности, и обсуждаем некоторые фундаментальные факторы, влияющие на режим непрерывной генерации. Для этого нами проведены сравнительные исследования характеристик ККЛ для спектрального диапазона 8 мкм, выращенных на подложке фосфида индия, активная область которых основана на гетеропарах различного химического состава, обеспечивающих различную величину энергетического барьера между верхним лазерным уровнем и континуумом.

## 2. Квантово-каскадные лазеры с высокими мощностными характеристиками

Как и для любого лазера, применимость ККЛ для решения той или иной задачи определяется сразу несколькими параметрами, такими как расходимость луча, эффективность генерации, пороговая плотность тока, мощность и спектральный состав излучения. В зависимости от типа использования, к этим параметрам предъявляются различные требования и, соответственно, конструкция лазера претерпевает соответствующие изменения, отвечающие конечному предназначению. Значительная часть применений требует высоких мощностей излучения. На рисунке 2 приведён график максимальных пиковых мощностей ККЛ в зависимости от длины волны, полученных при комнатной температуре.

Наилучшие результаты достигнуты в диапазоне длин волн 4,5–5 мкм. При этом получение высоких мощностей в указанном спектральном диапазоне требует новых подходов как к конструкции волновода, так и к конструкции активной области. Изначально необходимость приложить высокое напряжение для выстраивания энергетических уровней в системе каскадов до начала работы лазера и высокая плотность тока накачки подразумевают значительный нагрев устройства в процессе генерации, что, в свою очередь, приводит к деградации излучения. В случае применения для конструирования каскада *решёточно-согласованных* (далее — "согласованных") гетеропар InGaAs/InAlAs, в которых параметры решётки ямы и барьера совпадают с InP, энергетический разрыв на гетерогранице составляет 520 мэВ [46], что превышает энергию фотона в рассматриваемом спектральном диапазоне только в 2 раза, а это неизбежно приводит к недостаточной величине барьера на верхнем лазерном уровне и, как следствие, к существенным утечкам носителей

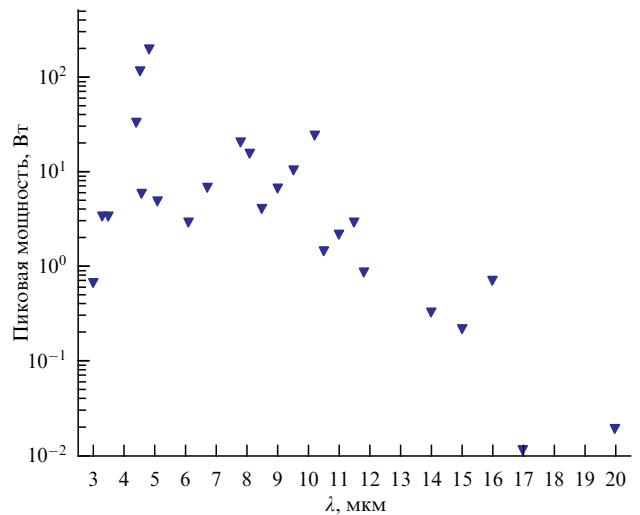


Рис. 2. Пиковые мощности ККЛ в зависимости от длины волны генерации [19, 28–45].

заряда в континуум. Применение *напряжённно-компенсированных* гетеропар, у которых яма и барьер рассогласованы по параметру решётки с InP, однако взаимно компенсируют возникающие напряжения, позволило существенно улучшить характеристики ККЛ для спектрального диапазона 4,5–5 мкм. Так, на основе напряжённно-компенсированных гетеропар были получены ККЛ с улучшенным КПД [47], а также получено свыше 120 Вт в импульсном режиме для ККЛ с шириной полоска 400 мкм [30]. Развитием идеи стало использование *напряжённных* гетеропар для активной области, где яма и барьер рассогласованы с InP и не компенсируют возникающие напряжения, для снятия которых применяются согласованные с подложкой демпфирующие слои. Так, применение напряжённных гетеропар со вставками AlAs позволило создать ККЛ с рекордно низкой температурной зависимостью порогового тока [48], а также получить рекордные эффективность [49] и выходную мощность [31]. Причём в работах [30, 31], наряду с высокой мощностью, ККЛ имеют сравнительно высокую пороговую плотность тока и большую расходимость лазерного луча. В случае, когда в структуре соблюдается баланс пороговых и мощностных характеристик, а также качества луча, пиковые мощности варьируются от десятков ватт до долей ватта с увеличением длины волны. Последнее связано с приближением к зоне фононного поглощения, где достичь лазерной генерации принципиально невозможно. При этом в области второго окна прозрачности наблюдаются значительные успехи — десятки ватт для  $\lambda \sim 8$  мкм и  $\lambda \sim 10$  мкм [35, 39], что в перспективе может использоваться для беспроводной связи.

Для ККЛ спектрального диапазона 8–10 мкм энергия фотона становится в 2–2,5 раза ниже, чем для лазеров диапазона 4,5–5 мкм, что позволяет конструировать мощные ККЛ и с активными областями на основе согласованных гетеропар. В частности, для ККЛ на согласованных гетеропарах были получены рекордные импульсные мощности 16 [35] и 25 Вт [39] для лазеров с ширинами полосков 60 и 95 мкм соответственно. В то же время остаётся существенный интерес к созданию новых активных областей на напряжённных или напряжённно-компенсированных гетеропарах для повышения выход-

ных характеристик ККЛ в данном спектральном диапазоне. Мощностные характеристики ККЛ во многом определяются оптическими потерями, скоростью отвода тепла от активной области и эффективностью токовой накачки. На последнюю влияют два основных определяемых температурой процесса: обратный ток, связанный с тепловым забросом носителей с уровня инжектора на нижний лазерный уровень предыдущего каскада, что снижает инверсию населённости, а также выброс носителей в континуум, приводящий к паразитному току утечки. Так как разогрев активной области увеличивается с током накачки даже в импульсном режиме [35], для мощных ККЛ такая проблема становится особенно актуальной. Как уже было указано выше, разрыв в зоне проводимости для согласованной гетеропары составляет 520 мэВ, что позволяет получить достаточный энергетический зазор  $\sim 130\text{--}160$  мэВ между уровнем инжектора и нижним лазерным уровнем для подавления обратного тока, как было показано в работах [50, 51]. При этом для ККЛ спектрального диапазона 8 мкм энергетический барьер между верхним лазерным уровнем и континуумом составляет порядка 100 мэВ, что не позволяет полностью подавить данный канал утечки. В то же время при аналогичных условиях для подавления обратного тока применение напряжённых гетеропар  $\text{Al}_{0,63}\text{In}_{0,37}\text{As}/\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{As}$  позволяет существенно увеличить энергетический разрыв в зоне проводимости на гетерогранице до 740 мэВ [52, 53], что обеспечивает существенно больший энергетический барьер, препятствующий выбросу носителей в континуум. Таким образом, конструирование активной области ККЛ для спектрального диапазона 8 мкм на основе напряжённых гетеропар потенциально позволяет снизить тепловой ток утечки и повысить эффективность и выходную мощность ККЛ, но эпитаксиальный рост таких лазеров более сложен, так как требует дополнительных слоёв для компенсации напряжений.

### 3. Исследование пороговых, вольт- и ватт-амперных характеристик

Нами разработаны и изготовлены ККЛ с активными областями на основе напряжённых (тип 1) и согласованных (тип 2) с  $\text{InP}$  подложкой гетеропар и исследованы характеристики этих ККЛ для спектрального диапазона  $\lambda \sim 8$  мкм. Эпитаксиальный рост был двухстадийным: активная область выращивалась методом молекулярно-пучковой эпитаксии, а верхняя волноводная обкладка — методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Активная область ККЛ с напряжёнными слоями содержала в себе 40 квантовых каскадов, подробное описание которых приведено в работе [52]. Гетероструктура ККЛ с активной областью на основе согласованной гетеропары состояла из 50 квантовых каскадов. Полное описание данной структуры приведено в работе [35].

Выращенные гетероструктуры были подвергнуты постростовой обработке, включающей в себя следующие операции: нанесение фоторезистивной маски, травление через неё канавок, формирующих полосковый контакт (далее — полосок) в виде гребневого волновода, нанесение диэлектрика, вскрытие контактных окон, напыление верхнего и нижнего контактов. Подробное описание постростового процесса приведено в работе [54].

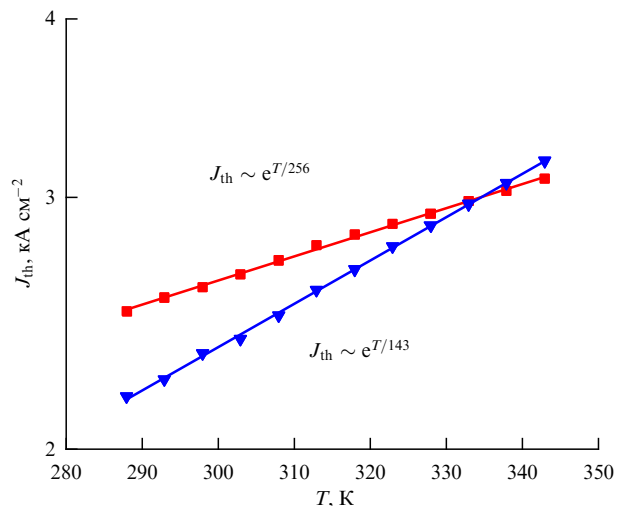


Рис. 3. Зависимость пороговой плотности тока ККЛ от температуры. Зависимость построена в логарифмическом масштабе по шкале плотностей порогового тока. Красная прямая — тип 1, синяя прямая — тип 2.

Далее гетероструктура разделялась на чипы, которые монтировались на медные теплоотводы эпитаксиальным слоем вниз. Для исследований были использованы ККЛ, имеющие ширины полоска 10–50 мкм и длины резонатора  $\sim 3\text{--}5$  мм. Зеркала ККЛ формировались сколами по кристаллографическим осям.

ККЛ исследовались при накачке импульсами тока с длительностью  $\sim 100$  нс и частотой повторения 11,5 кГц. Были исследованы зависимости пороговых плотностей тока ККЛ от температуры в диапазоне 298–343 К. Результаты исследований представлены на рис. 3, где в логарифмическом масштабе построена зависимость плотности порогового тока от температуры. Линейная аппроксимация данной зависимости позволяет найти характеристическую температуру  $T_0$ , определяющую скорость увеличения пороговой плотности тока с температурой в соответствии с эмпирическим выражением:

$$J_{\text{th}} \sim \exp\left(\frac{T}{T_0}\right), \quad (1)$$

где  $J_{\text{th}}$  — пороговая плотность тока,  $T$  — температура. Полученные значения характеристической температуры составили 256 и 143 К для структур типа 1 и типа 2 соответственно, что указывает на снижение тепловых утечек в структурах с напряжёнными слоями.

Результаты исследования вольт- и ватт-амперных характеристик ККЛ с шириной полоска 50 мкм и длиной резонатора 5 мм представлены на рис. 4. Вольт-амперная характеристика ККЛ типа 1 (синяя кривая на рис. 4) показывает снижение рабочего напряжения на  $\sim 20\%$  по сравнению с ККЛ типа 2, что пропорционально уменьшению количества каскадов. Исследования ватт-амперных характеристик (красные кривые) показали, что ККЛ с активной областью на основе напряжённых гетеропар имеют более высокую максимальную выходную оптическую мощность — более 21 Вт (мировой рекорд для данной длины волны) против 14 Вт у ККЛ с согласованной гетеропарой. Как видно из результатов измерений на рис. 4, у ККЛ с одинаковыми геометрическими параметрами применение в активной области напряжённых гетеропар приводит к трёхкратному увеличению диффе-

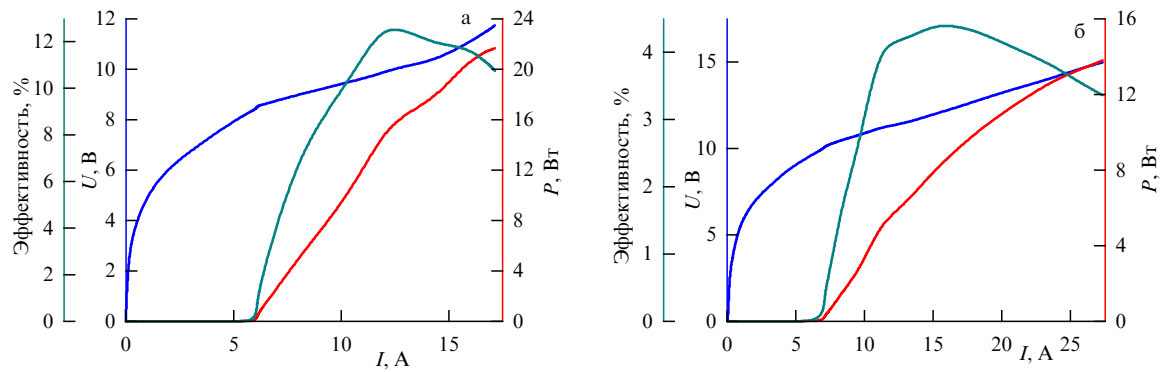


Рис. 4. Эффективность и ватт- и вольт-амперные характеристики лазеров для двух типов структур с шириной полоска 50 мкм и длиной резонатора 5 мм: (а) напряжённые гетеропары (тип 1), (б) согласованные гетеропары (тип 2).

рещиальной эффективности  $\eta$ , определяемой из наклона ватт-амперной характеристики —  $1,2 \text{ Вт А}^{-1}$  против  $0,42 \text{ Вт А}^{-1}$ . Снижение рабочего напряжения, а также увеличение  $\eta$  позволило получить существенное увеличение эффективности лазера: 12,7 % против 4,4 % для устройств типа 1 и типа 2 соответственно.

Таким образом, проведённые исследования показывают, что применение активной области на основе напряжённых гетеропар позволяет повысить выходные характеристики ККЛ, а также уменьшить зависимость порогового тока от температуры.

#### 4. Исследование влияния температуры на выходные характеристики квантово-каскадных лазеров

Как показано в [55], именно нагрев активной области является основным фактором, влияющим на максимальную мощность излучения как для импульсного, так и для постоянного режима накачки. Моделирование с помощью уравнения теплопроводности показывает, что утечка джоулева тепла из активной области в обкладку начинается спустя порядка 100 нс от начала импульса. Процесс нагревания наружных обкладок занимает десятки микросекунд до достижения равновесного теплового распределения в устройстве, что согласуется с экспериментальными данными. Перегрев активной области напрямую связан с её теплопроводностью, зависящей от двух факторов: наличия интерфейсов между слоями гетероструктуры, а также композитного химического состава слоёв, которые в большинстве случаев для ККЛ являются трёхкомпонентными твёрдыми растворами или бинарными соединениями [56]. Указанные особенности активной области лазера характеризуются эффективным замедлением диффузии фононов шероховатостью границы раздела слоёв и наличием рассеивающих изovalентных замещений в решетке твёрдого раствора. Причём именно второй фактор является ключевым в ухудшении теплопроводности [56], а значит, представляет собой фундаментальное ограничение для температурного режима работы ККЛ. В случае, когда перегрев активной области и соответствующий сдвиг пороговых характеристик не приводят к полной деградации лазерного излучения, возможно достигнуть непрерывного режима работы. При этом даже в рамках таких фундаментальных ограничений подходящий дизайн структуры и правильный теплоотвод [57] позволяют получить впечатляющие

результаты — высокие мощностные характеристики при высоком качестве луча.

Первичный нагрев активной области можно исследовать по сдвигу линии генерации в течение развития импульса накачки — это так называемая линейно-частотная модуляция (чирп) [58, 59]. Чирп прямо пропорционален скорости нагрева ККЛ [35]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dn}{dt} \left( \frac{dn}{dT} \right)^{-1} = \frac{n}{\lambda_m} \frac{d\lambda_m}{dt} \left( \frac{dn}{dT} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $T$  — температура,  $t$  — время,  $n$  — показатель преломления,  $dT/dt$  — скорость нагрева активной области,  $d\lambda_m/dt$  — чирп,  $dn/dT$  — скорость изменения показателя преломления с температурой. Измеряя чирп, можно показать, насколько быстро греется ККЛ во время развития импульса накачки. Тут важно отметить, что сопоставление данных измерения чирпа с выражением (2) является не самой тривиальной задачей. Измерение изменения показателя преломления с температурой  $dn/dT$  требует или сверхвысокого разрешения приборов, позволяющего в небольшом диапазоне длин волн измерить изменение длины волны со временем  $d\lambda_m/dt$ , или же необходимы структуры, имеющие в спектре порядка ста мод Фабри–Перо. Аккуратный теоретический анализ выражения (2) позволяет сделать оценки для этого множителя, которые в сочетании с моделированием уравнения теплопроводности приводят к обоснованному вычислению величины перегрева активной области за время импульса.

Мы провели экспериментальные исследования спектров с временным разрешением ККЛ типа 1 и типа 2. Как видно из результатов, приведённых на рис. 5, наблюдается сдвиг линии генерации в процессе развития импульса. Была определена величина чирпа у ККЛ обоих типов для амплитуд токов накачки 10 и 15 А. Если при токе 10 А она составляла  $0,2 \text{ \AA нс}^{-1}$  и  $0,24 \text{ \AA нс}^{-1}$  для ККЛ типа 1 и типа 2 соответственно, то при увеличении тока накачки в 1,5 раза величина чирпа составила уже  $0,31 \text{ \AA нс}^{-1}$  и  $0,41 \text{ \AA нс}^{-1}$ . Данные исследований показывают, что ККЛ с активной областью на основе согласованной гетеропары нагреваются с существенно более высокой скоростью, особенно при токах накачки, превышающих  $1,5 I_{th}$ .

Как показано в работе [57], улучшение отвода тепла от боковых областей гребневого волновода позволяет существенно снизить перегрев структуры. При этом для непрерывного и квазинепрерывного режимов основной

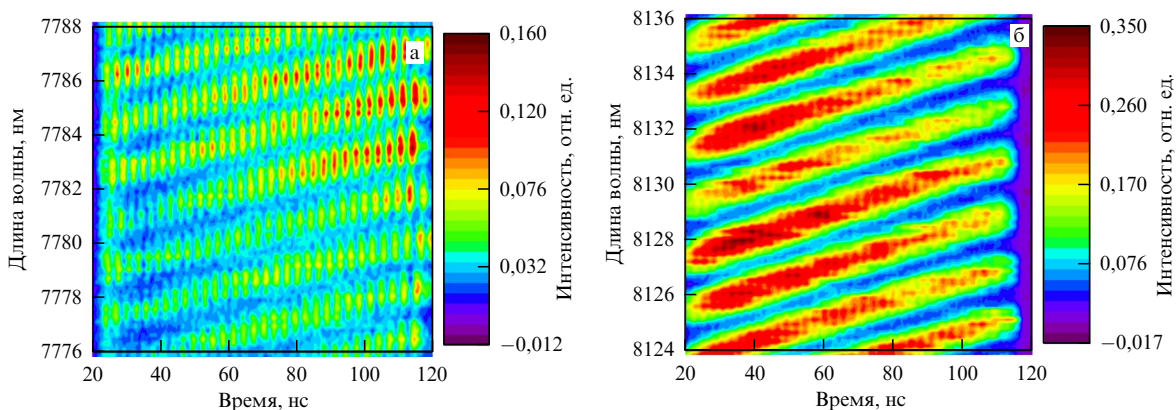


Рис. 5. Спектры ККЛ с временным разрешением при амплитуде тока накачки 15 А: (а) тип 1, (б) тип 2.

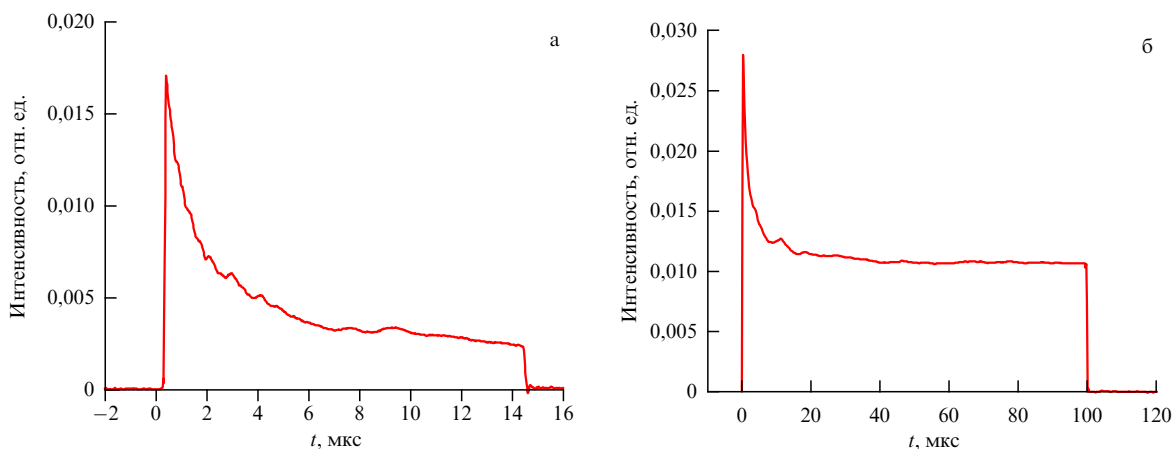


Рис. 6. Осциллограммы импульса излучения ККЛ типа 1 при длительности импульса накачки 14,5 мкс (а) и 100 мкс (б).

перегрев активной области относительно окружающей среды определяется нагревом в первые микросекунды работы лазера, когда генерируемое в активной области тепло не успевает от неё отводиться. Температурная зависимость порогового тока также будет влиять на скорость разогрева активной области ККЛ. То есть реализация подобных режимов генерации требует соответствующей оптимизации, снижающей токи утечки и, соответственно, разогрев активной области, что реализовать на структурах с напряжёнными гетеропарами значительно проще.

На ККЛ типа 1 с оптимизированной конструкцией резонатора, обеспечивающей отвод тепла от боковых стенок активной области, были проведены исследования влияния разогрева активной области на выходную оптическую мощность. Мы исследовали импульсы излучения ККЛ при накачке импульсами тока различной длительности (рис. 6) Видно, что токовый нагрев ККЛ уравновешивается скоростью отвода тепла от активной области только через 40–60 мкс после включения, в зависимости от образца. При этом основной спад интенсивности и, соответственно, рост порогового тока наблюдается в первые 3 мкс импульса.

Были проведены сравнительные исследования выходных характеристик в импульсном (длительность импульса накачки ~ 100 нс, частота повторения 11,5 кГц) и непрерывном (CW) режимах генерации (рис. 7). Наличие перегрева активной области в CW режиме хорошо замет-

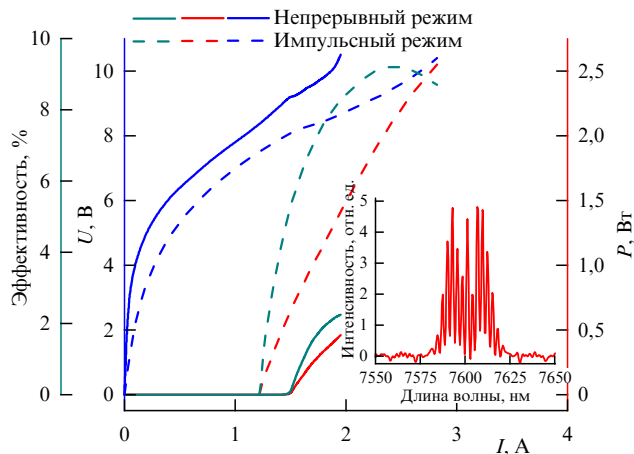


Рис. 7. Характеристики ККЛ, изготовленных из гетероструктуры типа 1 с шириной полоска 10 мкм и улучшенным теплоотводом. Сплошные кривые — непрерывный режим генерации. Штриховые кривые — импульсный режим генерации: время импульса ~ 100 нс, частота повторения 11,5 кГц. Синие кривые — вольт-амперные характеристики, красные кривые — ватт-амперные характеристики, бирюзовые кривые — эффективность. На вставке показан спектр генерации ККЛ в непрерывном режиме при токе накачки 1,6 А.

но по увеличению значения порогового тока. Перегрев активной области на пороге генерации исходя из оценок для характеристической температуры  $T_0$  составляет ~ 70 К и продолжает увеличиваться по мере увеличения

тока накачки, на что указывает быстрый по сравнению с импульсным режимом загиб ватт-амперной характеристики и пятикратное падение выходной мощности и эффективности ККЛ.

## 5. Заключение

Резюмируя полученные результаты, можно сделать несколько основных выводов. Наличие в активной области десятков квантовых каскадов, состоящих из нескольких тысяч наноразмерных слоёв, обуславливает работу ККЛ при повышенных напряжениях (обычно свыше 10 В), а также сравнительно высокое последовательное сопротивление на линейном участке ватт-амперной характеристики. Поэтому принципиальной проблемой ККЛ является джоулево тепло, выделяющееся в активной области, а также медленное его распределение по остальной структуре до достижения равновесия. Нагрев влияет на спад интенсивности излучения и приводит к линейно-частотной модуляции линии генерации. Последнее обстоятельство может использоваться для непрерывного спектрального сканирования, перспективного для применения в одночастотных ККЛ при газоанализе. Данный эффект наглядно продемонстрирован в разработанных на основе структуры типа 2 ККЛ с U-образной формой резонатора, полученной за счёт соединения волноводов в форме полукружности и плоских гребневых волноводов [60]. Однако для большинства других применений ККЛ необходимость быстрого отвода тепла или принципиального уменьшения теплового влияния встаёт особенно остро. Хотя уменьшение температуры активной области фундаментально ограничено теплопроводящими свойствами внутренних слоёв, правильно организованный теплоотвод, в том числе из боковых частей полоска, позволяет достичь термического равновесия и непрерывного режима генерации. Между тем импульсный режим работы при длительностях импульсов порядка 100 нс практически полностью определяется свойствами активной области, из-за того что в столь короткий промежуток времени тепло не успевает выходить за её пределы. Технология измерения скорости нагрева активной области, основанная на измерении чирпа при нагреве, позволяет достаточно аккуратно определять её перегрев в конкретной структуре, что необходимо для дальнейшего анализа и оптимизации параметров. При этом она лишена минусов технологий измерения температуры, основанных на сканировании лазерного зеркала, которые не дают информации о тепловых процессах внутри лазера.

Возможным и эффективным решением проблем, связанных с перегревом активной области, является применение напряжённых слоёв, обеспечивающих существенно больший разрыв в зоне проводимости на гетерогранице яма/барьер. Последнее обеспечивает уменьшение теплового выброса носителей заряда из активной области в континуум и существенное улучшение всех рабочих характеристик ККЛ. Сравнение характеристик ККЛ с одинаковыми параметрами резонатора, но с активной областью на основе согласованных и напряжённых гетеропар показывает, что применение данного решения обеспечивает почти двукратный рост параметра  $T_0$  в зависимости порогового тока от температуры по сравнению с ККЛ на основе гетероструктур с ненапряжёнными слоями, а также 50%-ное увеличение макси-

мальной выходной оптической мощности. В частности, в настоящей работе получена пиковая мощность свыше 21 Вт, что является новым мировым рекордом для спектрального диапазона 8 мкм для устройств с одним рабочим полоском. Также описанная технология улучшает эффективность, что связано с большим усилением в структурах с напряжёнными слоями в активной области, причём данные характеристики достигнуты при меньшем количестве каскадов в активной области. Возможное объединение ростовых технологий, позволяющих добиться улучшения электрической проводимости [35], с технологиями постростовой обработки, уменьшающими нагрев, открывают дальнейшие перспективы по увеличению мощности и эффективности ККЛ.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-30020). Работа авторов из Университета ИТМО в части исследования перегрева активной области ККЛ на пороге генерации выполнена при поддержке федерального проекта "Передовые инженерные школы".

## Список литературы

1. Vaks V L et al. *Proc. SPIE* **9934** 99340E (2016)
2. Cousin P et al., in *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management* (Springer Water, A D Mauro, A Scozzari, F Soldovieri) (Cham: Springer, 2022) pp. 251–277, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_11)
3. Nabiev S S, Palkina L A, in *The Atmosphere and Ionosphere: Elementary Processes, Monitoring, and Ball Lightning* (Physics of Earth and Space Environments, Eds V L Bychkov, G V Golubkov, A I Nikitin) (Cham: Springer, 2014) pp. 113–200, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05239-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05239-7_3)
4. Moravek A et al. *Atmos. Meas. Tech.* **12** 6059 (2019)
5. Kolker D B et al., in *2022 Intern. Conf. Laser Optics, ICLO, 20–24 June 2022, Saint Petersburg, Russian Federation*, <https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9840076>
6. Kumar C, Patel N *Proc. SPIE* **8268** 826802 (2012)
7. Schwarm K K et al. *Appl. Phys. B* **126** 9 (2020)
8. Вакс В Л и др. *УФН* **184** 739 (2014); Vaks V L et al. *Phys. Usp.* **57** 684 (2014)
9. Takeuchi E B et al. *Proc. SPIE* **6741** 674104 (2007)
10. Yang K et al. *Electron. Lett.* **57** 665 (2021)
11. Gopinath S, Ashok P, Ganesh Madhan M *Laser Phys. Lett.* **18** 065301 (2021)
12. Pang X et al. *Phys. Status Solidi A* **218** 3 2000407 (2021)
13. Казаринов Р Ф, Сурис Р А *ФТИ* **5** 797 (1971); Kazarinov R F, Suris R A *Sov. Phys. Semicond.* **5** 707 (1971)
14. Faist J et al. *Science* **264** 553 (1994)
15. Vurgaftman I et al. *J. Phys. D* **48** 123001 (2015)
16. Grillot F et al. *Proc. SPIE* **12430** 1243005 (2023)
17. Meyer J R et al. *Photonics* **7** (3) 75 (2020)
18. Nguyen Van H et al. *Photonics* **6** (1) 31 (2019)
19. Lohgari Z et al. *Appl. Phys. Lett.* **115** 151101 (2019)
20. Lohgari Z et al. *Electron. Lett.* **55** 144 (2019)
21. Wen B, Ban D *Prog. Quantum Electron.* **80** 100363 (2021)
22. Jin Y, Reno J L, Kumar S *Optica* **7** 708 (2020)
23. Kainz M A et al. *Opt. Express* **27** 20688 (2019)
24. Bosco L et al. *Appl. Phys. Lett.* **115** 010601 (2019)
25. Khalatpour A et al. *Nat. Photon.* **15** 16 (2021)
26. Belkin M A et al. *Nat. Photon.* **1** 288 (2007)
27. Lu Q et al. *Nat. Commun.* **10** 2403 (2019)
28. Commin J P et al. *Appl. Phys. Lett.* **97** 3 031108 (2010)
29. Bandyopadhyay N et al. *Appl. Phys. Lett.* **101** 241110 (2012)
30. Bai Y et al. *Appl. Phys. Lett.* **95** 221104 (2009)
31. Heydari D et al. *Appl. Phys. Lett.* **106** 091105 (2015)
32. Slivken S et al. *Appl. Phys. Lett.* **81** 4321 (2002)
33. Bandyopadhyay N et al. *Appl. Phys. Lett.* **105** 071106 (2014)
34. Maulini R et al. *Opt. Express* **19** 17203 (2011)

35. Cherotchenko E et al. *Nanomaterials* **12** 3971 (2022)
36. Xu S et al. *Appl. Phys. Lett.* **121** 171103 (2022)
37. Slivken S et al. *Appl. Phys. Lett.* **80** 4091 (2002)
38. Wang C A et al. *J. Cryst. Growth* **370** 212 (2013)
39. Razeghi M et al. *J. Phys.* **11** 12 125017 (2009)
40. Cristobal E et al. *Appl. Phys. Lett.* **122** 141108 (2023)
41. Wang H et al. *Chinese Phys. B* **30** 124202 (2021)
42. Xie F et al. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **19** 1200407 (2013) <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2240658>
43. Huang X, Charles W O, Gmachl C *Opt. Express* **19** 8297 (2011)
44. Fujita K et al. *Appl. Phys. Lett.* **97** 201109 (2010)
45. Szerling A, Slivken S, Razeghi M *Opto-Electron. Rev.* **25** (3) 205 (2017)
46. Бабичев А В и др. *Письма в ЖТФ* **46** (9) 35 (2020); Babichev A V et al. *Tech. Phys. Lett.* **46** 442 (2020)
47. Evans A et al. *Appl. Phys. Lett.* **91** 071101 (2007)
48. Bai Y et al. *Appl. Phys. Lett.* **97** 251104 (2010)
49. Wang F et al. *Opt. Express* **28** 17532 (2020)
50. Бабичев А В и др. *Физика и техника полупроводников* **52** 954 (2018); Babichev A V et al. *Semiconductors* **52** 1082 (2018)
51. Howard S S et al. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **13** 1054 (2007)
52. Babichev A V et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **87** 839 (2023)
53. Lu Q et al. *Sci. Rep.* **6** 23595 (2016)
54. Дюделев В В и др. *Квантовая электроника* **50** 989 (2020); Dudelev V V et al. *Quantum Electron.* **50** 989 (2020)
55. Vrubel I I et al. "QCL active region overheat in pulsed mode: effects of non-equilibrium heat dissipation on laser performance", arXiv:2308.10013
56. Goryunova N A, Kesamanly F P, Nasledov D N *Semicond. Semimet.* **4** 413 (1968)
57. Lee H K et al. *Phys. Status Solidi A* **206** 356 (2009)
58. Gundogdu S et al. *Opt. Express* **2** 6572 (2018)
59. Dudelev V V et al., in *2020 Intern. Conf. Laser Optics, ICLO, 02–06 November 2020, St. Petersburg, Russia*, <https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285842>
60. Dudelev V V et al., in *2019 Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conf. CLEO/Europe-EQEC, 23–27 June 2019, Munich, Germany*, <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8872750>

### Quantum cascade lasers for the 8- $\mu\text{m}$ spectral range: technology, design, and analysis

V.V. Dudelev<sup>(1,\*), E.D. Cherotchenko<sup>(1), I.I. Vrubel<sup>(1), D.A. Mikhailov<sup>(1), D.V. Chistyakov<sup>(1), V.Yu. Mylnikov<sup>(1), S.N. Losev<sup>(1), E.A. Kognovitskaya<sup>(1), A.V. Babichev<sup>(1), A.V. Lutetskiy<sup>(1), S.O. Slipchenko<sup>(1), N.A. Pikhin<sup>(1), A.G. Gladyshev<sup>(2), K.A. Podgaetskiy<sup>(3), A.Yu. Andreev<sup>(3), I.V. Yarotskaya<sup>(3), M.A. Ladugin<sup>(3), A.A. Marmalyuk<sup>(3), I.I. Novikov<sup>(2,4), V.I. Kuchinskii<sup>(1), L.Ya. Karachinsky<sup>(2,4), A.Yu. Egorov<sup>(2,5), G.S. Sokolovskii<sup>(1)</sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup>

<sup>(1)</sup> Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences,

ul. Politekhnicheskaya 26, 194021 St. Petersburg, Russian Federation

<sup>(2)</sup> Connector Optics LLC,

ul. Domostroitel'naya 16B, 194292 St. Petersburg, Russian Federation

<sup>(3)</sup> Polus Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company,

ul. Vvedenskogo 3, korp. 1, 117342 Moscow, Russian Federation

<sup>(4)</sup> ITMO University,

Kronverkskii prosp. 49, 197101 St. Petersburg, Russian Federation

<sup>(5)</sup> Alferov St. Petersburg National Research Academic University, Russian Academy of Sciences,

ul. Khlopina 8, korp. 3A, 194021, St. Petersburg, Russian Federation

E-mail: <sup>(\*)</sup> v.dudelev@mail.ru

Quantum cascade lasers (QCLs) have received enormous attention from the scientific community due to their broad range of applications in a wide variety of industries, agriculture, healthcare, environmental protection, and many other scientific and technical fields. In this article, in addition to a review of the main applications and the state of research and development of high-power QCLs in the mid-infrared range, we consider the features of their manufacturing technology that make it possible to obtain a high peak power and discuss the effect of overheating of the active region on the output optical power and spectral characteristics. A comparison is made of the characteristics of QCLs with the same cavity parameters but with different active regions made on the basis of substrate-matched or strained heteropairs, which provides a different energy barrier between the upper laser level and the continuum. It is shown that the use of strained heteropairs in the active region of a QCL provides an almost twofold increase in the characteristic temperature  $T_0$  as well as a significantly higher efficiency and an increase in the maximum output optical power to over 21 W, which is a world record for a QCL with a spectral range of 8  $\mu\text{m}$  with one working strip.

**Keywords:** quantum cascade laser, heterostructure, mid-infrared range, chirp, heat sink

PACS numbers: 42.55.Px, **42.60** – v, 78.67.Pt

Bibliography — 60 references

Received 22 May 2023

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **194** (1) 98 – 105 (2024)

*Physics – Uspekhi* **67** (1) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.05.039543>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.05.039543>