

Разработка и исследование мощных квантово-каскадных лазеров для спектрального диапазона 4.5–4.6 мкм

В.В.Дюделев, Д.А.Михайлов, А.В.Бабичев, Г.М.Савченко, С.Н.Лосев, Е.А.Когновицкая, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, А.Г.Гладышев, Д.В.Денисов, И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский, В.И.Кучинский, А.Ю.Егоров, Г.С.Соколовский

Разработаны и исследованы квантово-каскадные лазеры для спектрального диапазона 4.5–4.6 мкм с различным числом квантовых каскадов, генерирующие при комнатной температуре. Показано, что потери на металлизированных боковых стенках гребневого волновода существенно увеличивают пороговую плотность тока. Продемонстрировано, что в лазерах с 30-ю квантовыми каскадами плотность тока накачки, необходимая для преодоления внутренних потерь, а также потеря на выход излучения, на порядок ниже, а выходная мощность на порядок выше соответствующих значений в лазерах с 15-ю квантовыми каскадами.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, гетероструктура, высокая мощность излучения.

1. Введение

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) благодаря компактности и эффективности являются объектом интенсивных исследований уже на протяжении почти 50 лет. Их концепция была предложена Сурисом и Казариновым еще в 1971 г. [1], но практической реализации первого работающего устройства пришлось ждать более 20 лет [2], что связано в первую очередь с чрезвычайной сложностью выращивания эпитаксиальных лазерных структур, содержащих порядка тысячи наноразмерных слоев. Интенсивные исследования ККЛ позволили создать приборы, работающие при комнатной температуре в спектральном диапазоне 3–25 мкм [3–6]. Интерес к спектральному диапазону 4.5–4.6 мкм обусловлен прежде всего тем, что

в нем можно детектировать многие вещества, среди которых следует отметить монооксид углерода [7], силан [8], сероуглерод [9] и оксид азота [10]. В настоящее время для этой спектральной области созданы ККЛ различных конструкций, работающие при комнатной температуре. Здесь стоит выделить работы, посвященные созданию мощных ККЛ – как одиночных полосковых лазеров [11, 12], так и приборов на основе лазерных линеек [13, 14]. Необходимо также отметить успехи в создании лазеров с поверхностным выводом излучения [15, 16], а также перестраиваемых [17, 18] и одночастотных [19, 20] лазеров. Именно ККЛ являются ключевым элементом систем контроля химических веществ в спектральном диапазоне 4.5–4.6 мкм [8–10, 21]. Решение многих задач, связанных с детектированием химических веществ на расстоянии, требует высокой мощности источника излучения, поэтому цель настоящей работы – создание и исследование мощных ККЛ для этого спектрального диапазона.

2. Разработка и исследование мощных ККЛ

Наиболее важной проблемой, резко снижающей эффективность излучающих в спектральном диапазоне 4.5–4.6 мкм ККЛ, созданных на основе изопериодичной с подложкой InP гетеропары $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, является малая величина потенциального барьера над верхним уровнем размерного квантования, что приводит к тепловому выбросу носителей [22]. Как было показано в [23], одним из наиболее эффективных подходов к решению этой проблемы является создание активной области ККЛ на основе напряженно-компенсированных гетеропар, что позволяет в несколько раз увеличить потенциальный барьер над верхним уровнем размерного квантования лазерного перехода. В настоящей работе для создания активной области ККЛ была выбрана напряженно-компенсированная гетеропара $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$. Как показали расчеты, ее применение позволяет увеличить разрыв зоны проводимости на гетерогранице до 800–820 мэВ, что превышает значения, достижимые при ис-

В.В.Дюделев, Д.А.Михайлов, Г.М.Савченко, С.Н.Лосев, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, В.И.Кучинский, Г.С. Соколовский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26; e-mail: gs@mail.ioffe.ru

А.В.Бабичев. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; ООО «Коннектор Оптик», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

Е.А.Когновицкая. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197022 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

А.Г.Гладышев. ООО «Коннектор Оптик», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

Д.В.Денисов. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197022 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26; Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; ООО «Коннектор Оптик», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

А.Ю.Егоров. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49

Поступила в редакцию 4 июля 2020 г., после доработки – 7 сентября 2020 г.

пользовании механически-ненапряженной гетеропары $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, на 310–320 мэВ [24]. Толщина слоев $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$ в квантовом каскаде выбиралась таким образом, чтобы обеспечить компенсацию механического напряжения и сформировать упругосбалансированную гетероструктуру. В этом случае наиболее эффективным подходом для опустошения нижнего уровня лазерного перехода является использование схемы с двухфотонным резонансным рассеянием носителей заряда [25]. На рис.1 представлен численный расчет профиля зоны проводимости квантового каскада на основе напряженной гетеропары $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$, а также представлены квадраты волновых функций в слоях каскада расчетной конструкции. Общая толщина квантового каскада составила 50.4 нм, расчетная энергия лазерного перехода – 271 мэВ, что соответствует длине волны генерации 4.57 мкм. Расчетное время жизни носителей на верхнем уровне τ_{up} было равно 2.6 пс, время жизни носителей на нижнем уровне τ_{low} – 0.39 пс. С учетом величины матричного элемента взаимодействия $z_{\text{up-low}} = 1.91$ нм и времени перехода $\tau_{\text{up-low}} = 7.47$ пс, величина, характеризующая эффективность конструкции активной области ККЛ [26], $z_{\text{up-low}}^2 \tau_{\text{up}} (1 - \tau_{\text{low}}/\tau_{\text{up-low}}) = 9$ пс·нм².

Как известно, важным условием получения высокой выходной мощности лазера является уменьшение внутренних потерь. Один из источников таких потерь – поглощение на верхнем металллическом контакте и приконтактной сильнолегированной области. Очевидно, что поглощение на свободных носителях можно уменьшить за счет увеличения толщины слаболегированной верхней волноводной обкладки. Однако это ведет к увеличению сопротивления прибора и, как следствие, к росту потерь. Таким образом, как показано на рис.2, существует оптимум толщины верхней обкладки волновода, зависящий от толщины активной области ККЛ (от числа квантовых каскадов в структуре).

На основании проведенных исследований, методом молекулярно-пучковой эпитаксии в компании ООО «Коннектор Оптикс» на установке Ribeg 49 были выращены гетероструктуры ККЛ, содержащие в активной области 15 квантовых каскадов (табл.1).

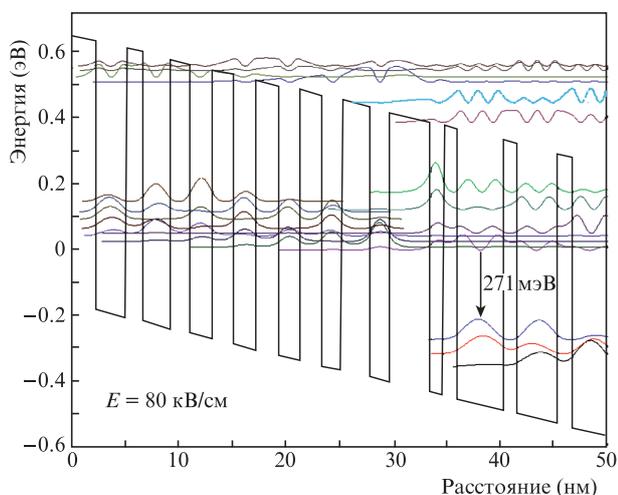


Рис.1. Конструкция квантового каскада на основе напряженной гетеропары $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$. Представлен расчетный профиль зоны проводимости, а также квадраты волновых функций электронов в слоях квантового каскада при напряженности электрического поля 80 кВ/см. Стрелкой показан лазерный переход.

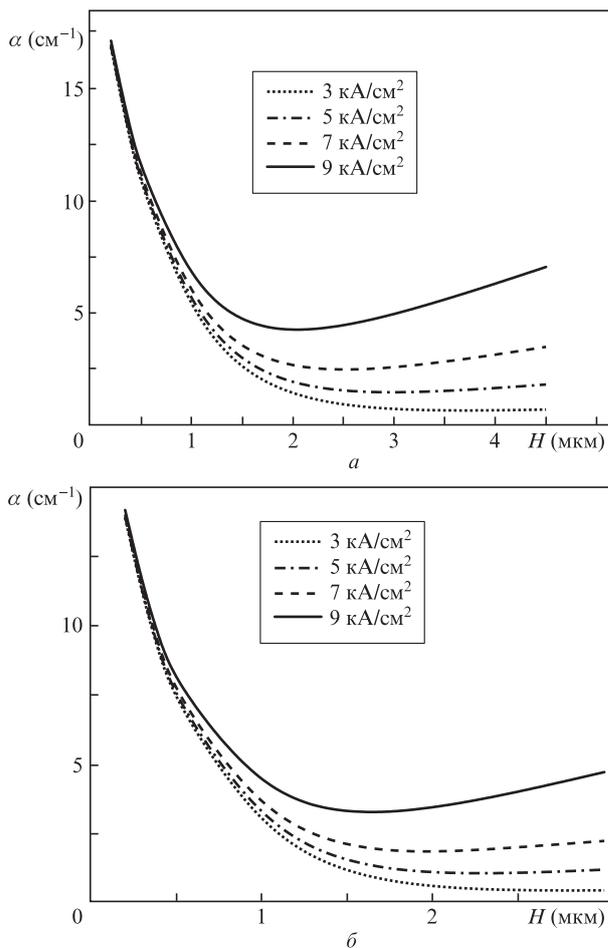


Рис.2. Расчетные зависимости суммарных потерь в волноводе ККЛ от толщины слаболегированной верхней волноводной обкладки при числе каскадов 15 (а) и 30 (б) и различных плотностях тока накачки.

Табл.1. Гетероструктура ККЛ, содержащая в активной области 15 квантовых каскадов на основе гетеропары $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.36}\text{Al}_{0.64}\text{As}$.

Материал	Назначение слоя	Толщина (мкм)	Уровень легирования (см ⁻³)
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	Контактный слой	0.2	2.5×10^{19}
InP	Контактный слой	0.2	1.0×10^{19}
InP	Приконтактный слой	0.5	7.0×10^{18}
InP	Верхняя волноводная обкладка	3.5	1.0×10^{17}
15 квантовых каскадов	Активная область	0.756	2.7×10^{16}
InP	Нижняя волноводная обкладка	0.3	1.0×10^{17}
InP	Подложка	350	3.0×10^{17}

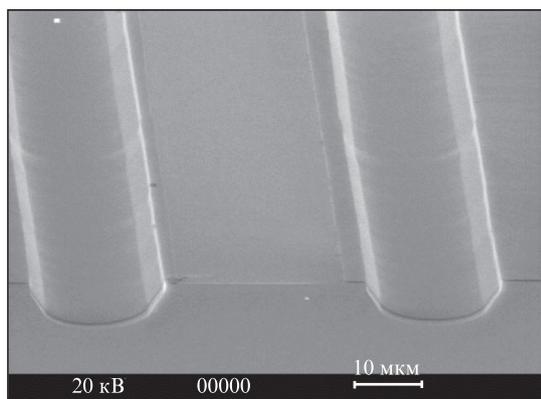
На гетероструктурах ККЛ методами постростовой обработки были изготовлены полоски, сформированные травлением глубоких мезоканавок. Для этого на планарную поверхность структуры был нанесен фоторезист S1813 и сформирована фоторезистивная маска в виде параллельных окон шириной 11 мкм. Химическое травление сквозь фоторезистивную маску на глубину, превышающую толщину гетероструктуры на 1–2 мкм, осуществлялось неселективным травителем $\text{HBr}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$

в соотношении 10:5:1:50. Затем методом плазмохимического осаждения из газовой фазы проводилось напыление диэлектрика SiO_2 . Вскрытие окон в диэлектрике на верхней части гребневого волновода, сформированного мезоканавками, осуществлялось травлением в буферном травителе сквозь фоторезистивную маску (фоторезист AZ4533), закрывающую мезоканавки, края полосков и планарную поверхность между полосками. Фотография полоска с нанесенным диэлектриком и вскрытым окном под омический контакт представлена на рис.3.

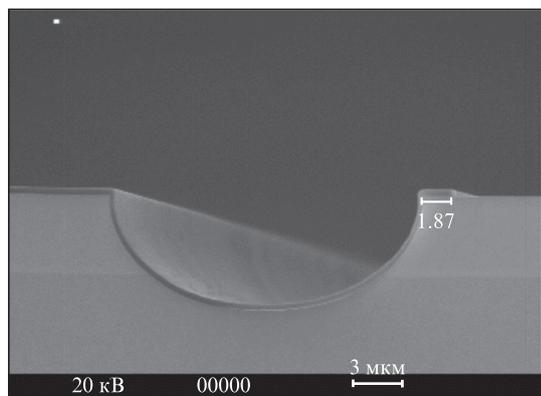
После напыления верхнего контакта, утоньшения подложки и нанесения нижнего контакта гетероструктура раскалывалась на чипы длиной ~ 3 мм. В исследованиях использовались ККЛ с шириной полоскового контакта $W = 10$ –50 мкм. Лазеры монтировались на первичный теплоотвод гетероструктурой вниз, что обеспечивало эффективный отвод тепла от активной области ККЛ.

Созданные ККЛ изучались в импульсном режиме генерации. Длительность импульсов тока накачки составляла ~ 75 нс при частоте следования 48 кГц. Все исследованные лазеры генерировали при комнатной температуре.

Исследования спектральных характеристик ККЛ (рис.4) показали, что генерация при комнатной температуре наблюдается вблизи длины волны 4.5 мкм, что соответствует предварительным теоретическим оценкам [24]. Спектральные измерения проводились с использованием монохроматора МДР-23 с дифракционной решеткой 150 мм^{-1} , регистрация спектров осуществлялась фото-



а



б

Рис.3. Изображения полоска с нанесенным на боковые стороны диэлектриком, полученные методом растровой электронной микроскопии: общий вид полоска, сформированного глубокими мезоканавками (а), и увеличенное изображение одной из боковых сторон полоска (б).

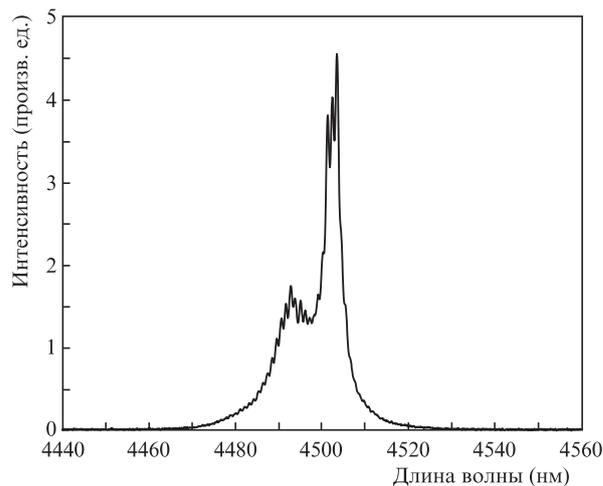


Рис.4. Типичный спектр генерации ККЛ с 15-ю квантовыми каскадами в активной области и шириной полоскового контакта $W = 50$ мкм при токе накачки 9 А ($1.25I_{th}$).

приемником Vigo Systems PVI-4TE-10.6. Подробнее техника измерений описана в работах [27, 28].

Мощностные характеристики ККЛ изучались в импульсном режиме генерации, техника измерений подробно описана в работе [29]. Типичные ватт-амперные характеристики ККЛ с ширинами полосковых контактов $W = 10, 16, 26$ и 50 мкм представлены на рис.5. Максимальная пиковая выходная мощность исследуемых ККЛ не превышала 0.5 Вт (~ 0.25 Вт с одного зеркала). Наблюдаемый наклон ватт-амперной характеристики возрастал с увеличением W : для ККЛ с $W = 16$ мкм наклон составлял 0.26 Вт/А, а для ККЛ с $W = 50$ мкм – уже 0.35 Вт/А.

Исследования пороговых характеристик ККЛ позволили оценить влияние потерь на боковых стенках гребневого волновода ККЛ на величину его порогового тока. На рис.6 приведена измеренная зависимость порогового тока ККЛ I_{th} от ширины полоскового контакта W . Как видно из представленных данных, пороговый ток линейно снижается с уменьшением W . При этом линейная аппроксимация этой зависимости (сплошная линия 1 на рис.6) показывает, что существенная доля тока накачки идет на преодоление потерь в боковых областях мезы: по-

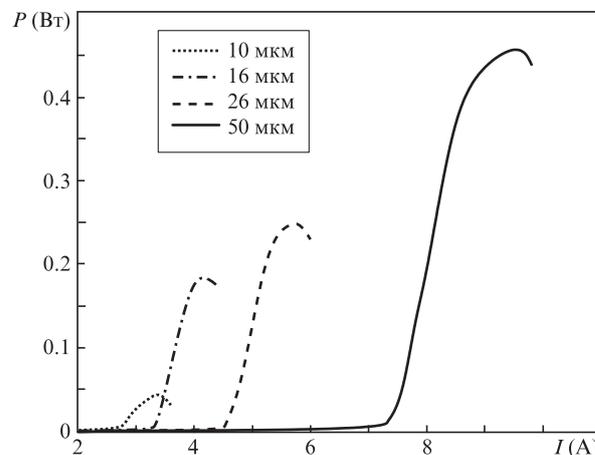


Рис.5. Типичные ватт-амперные характеристики ККЛ с 15-ю квантовыми каскадами в активной области и шириной полосковых контактов $W = 10, 16, 26$ и 50 мкм.

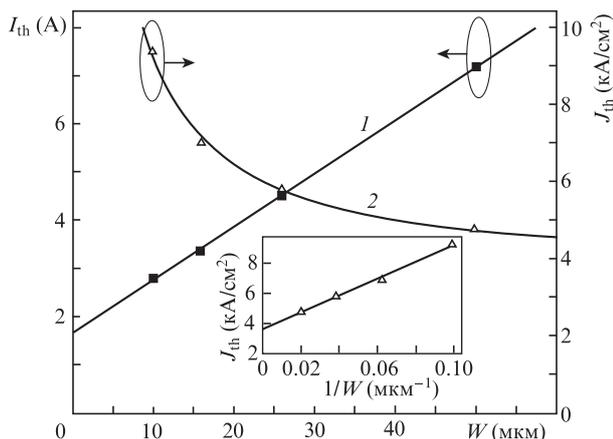


Рис.6. Зависимости порогового тока I_{th} и пороговой плотности тока J_{th} ККЛ с 15-ю квантовыми каскадами в активной области от ширины полоскового контакта W . Квадраты и треугольники – экспериментальные значения пороговых токов и плотностей пороговых токов соответственно; 1 – линейная аппроксимация зависимости I_{th} от W ; 2 – гиперболическая аппроксимация зависимости J_{th} от W . На вставке – зависимость J_{th} от W^{-1} .

роговый ток в пределе нулевой ширины W составляет ~ 1.65 А.

Как видно из рис.3, полученные гребневые волноводы имеют высокое качество; это позволяет сделать вывод о том, что источником потерь является не рассеяние света на боковых стенках волновода, а его поглощение в металле за счет проникновения волноводной моды сквозь слой диэлектрика в металлизированные слои боковых стенок. Представленная на рис.6 зависимость пороговой плотности тока ККЛ J_{th} от ширины контакта W соответствует гиперболической аппроксимации зависимости J_{th} от W . Пределом этой зависимости при бесконечно большой ширине W является плотность тока, необходимая для преодоления внутренних потерь и потерь на выход излучения без учета потерь на боковых стенках, которая определяется в точке пересечения линейной аппроксимации $J_{th}(1/W)$ с осью ординат в точке $1/W = 0$ (см. вставку на рис.6). Полученное большое значение плотности тока, необходимое для преодоления внутренних потерь и потерь на выход и составившее ~ 3.6 кА/см² для ККЛ с 15-ю квантовыми каскадами в активной области, а также большая доля порогового тока, связанная с потерями на боковых стенках гребневого волновода, указывают на необходимость внесения изменений в активную область ККЛ и повышение коэффициента усиления.

С учетом всего этого была изготовлена новая гетероструктура ККЛ с квантовыми каскадами на основе напряженно-компенсированной гетеропары $In_{0.67}Ga_{0.33}As/In_{0.36}Al_{0.64}As$ с увеличенным до 30 числом квантовых каскадов (табл.2)

Процедура постростовой обработки этих гетероструктур аналогична описанной выше. Были изготовлены ККЛ с ширинами полосковых контактов 16–50 мкм и длиной резонатора 3 мм.

Исследования ККЛ с активной областью, содержащей 30 квантовых каскадов, проводились при комнатной температуре и тех же условиях, что и исследования ККЛ с 15-ю квантовыми каскадами. Исследования зависимостей I_{th} и J_{th} от W (рис.7) показали снижение примерно на 25% величины тока, необходимой для преодоления потерь на боковых стенках гребневого волновода, – до 1.22 А по

Табл.2. Гетероструктура ККЛ, содержащая в активной области 30 квантовых каскадов на основе гетеропары $In_{0.67}Ga_{0.33}As/In_{0.36}Al_{0.64}As$.

Материал	Назначение слоя	Толщина (мкм)	Уровень легирования (см ⁻³)
$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	Контактный слой	0.2	2.5×10^{19}
InP	Приконтактный слой	1.0	2.0×10^{18}
InP	Верхняя волноводная обкладка	2.0	1.0×10^{17}
30 квантовых каскадов	Активная область	1.512	2.7×10^{16}
InP	Нижняя волноводная обкладка	0.3	1.0×10^{17}
InP	Подложка	350	3.0×10^{17}

сравнению с 1.65 А у ККЛ с 15-ю квантовыми каскадами. Также (см. вставку на рис.7) у ККЛ с 30-ю квантовыми каскадами почти на порядок снизилась пороговая плотность тока, необходимая для преодоления внутренних потерь и потерь на выход, – до 0.44 кА/см² по сравнению с 3.6 кА/см² у ККЛ с 15-ю квантовыми каскадами. Все это открывает перспективы получения лазерной генерации в непрерывном режиме при комнатной температуре за счет оптимизации постростовой обработки гетероструктур и снижения потерь в лазерном волноводе.

Кроме того, исследования спектральных характеристик ККЛ с 30-ю квантовыми каскадами в активной области показали, что их спектр существенно шире спектра ККЛ с 15-ю квантовыми каскадами, что может быть обусловлено увеличением усиления активной области на основе 30 каскадов. Типичный спектр генерации такого ККЛ приведен на рис.8.

Как видно из спектров, приведенных на рис.4 и 8, при сравнимых уровнях накачки относительно порога генерации наблюдается практически пятикратное расширение спектра генерации ККЛ с резонатором Фабри–Перо при увеличении числа квантовых каскадов с 15 до 30.

Типичные ватт-амперные характеристики ККЛ с 30-ю квантовыми каскадами в активной области и шириной полоскового контакта 16, 20, 26 и 50 мкм приведены на

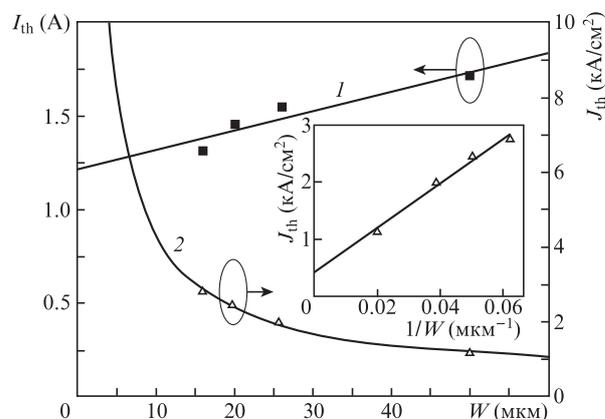


Рис.7. Зависимости порогового тока I_{th} и пороговой плотности тока J_{th} ККЛ с 30-ю квантовыми каскадами в активной области от ширины полоскового контакта W . Квадраты и треугольники – экспериментальные значения пороговых токов и плотностей пороговых токов соответственно; 1 – линейная аппроксимация зависимости I_{th} от W ; 2 – гиперболическая аппроксимация зависимости J_{th} от W . На вставке – зависимость J_{th} от W^{-1} .

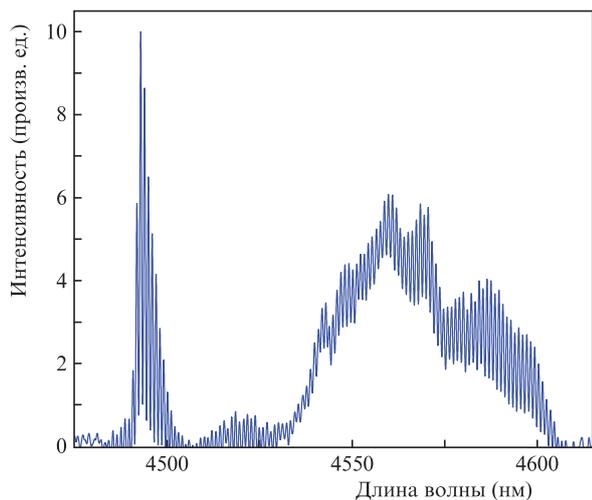


Рис.8. Типичный спектр генерации ККЛ с 30-ю каскадами в активной области и шириной полоскового контакта 50 мкм при токе накачки 4.6 А ($1.25I_{th}$).

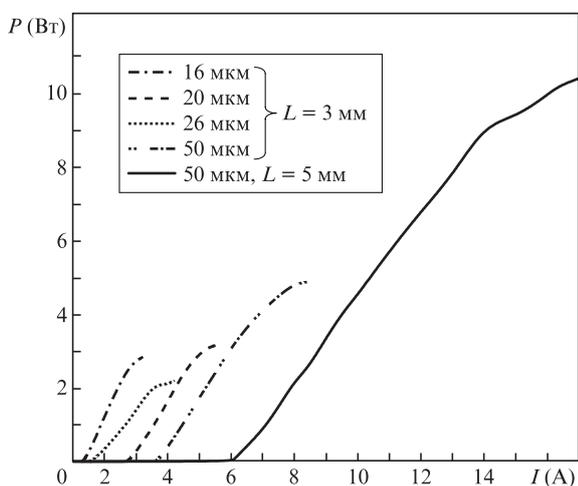


Рис.9. Ватт-амперные характеристики ККЛ с 30-ю каскадами в активной области и $W = 10, 16, 26$ и 50 мкм при длине резонатора $L = 3$ мм, а также при $W = 50$ мкм и $L = 5$ мм.

рис.9. Хорошо видно, что увеличение числа каскадов в активной области ККЛ с 15 до 30 позволило на порядок увеличить выходную мощность лазеров при одинаковых геометрических размерах. Максимальная выходная мощность для ККЛ с $L = 3$ мм и $W = 50$ мкм составила ~ 5 Вт (~ 2.5 Вт с одного зеркала). Наклон ватт-амперной характеристики для таких ККЛ уменьшался с ростом W . Наибольший наклон достигал 1.78 Вт/А для лазеров с $W = 16$ мкм, а для лазеров с W , равным 20 и 50 мкм, он составлял 1.35 и 1.3 Вт/А соответственно. Исключением были лазеры с $W = 26$ мкм, у них наклон ватт-амперной характеристики был менее 1 Вт/А, что, по-видимому, связано с худшим качеством постростовой обработки данной партии ККЛ. Полученное максимальное значение наклона ватт-амперной характеристики у ККЛ с 30-ю каскадами в активной области почти в пять раз выше, чем у ККЛ с 15-ю каскадами. Увеличение длины резонатора до 5 мм позволило получить максимальную выходную мощность более 10 Вт (свыше 5 Вт с одного зеркала, рис.9) [30] при наклоне ватт-амперной характеристики 1.15 Вт/А.

3. Выводы

Итак, в настоящей статье представлены результаты разработки и исследования мощных ККЛ спектрального диапазона $4.5\text{--}4.6$ мкм с различным числом квантовых каскадов, демонстрирующие лазерную генерацию при комнатной температуре. Показано, что потери на металлизированных боковых стенках гребневого волновода ККЛ приводят к существенному увеличению пороговой плотности тока. Продемонстрировано, что у ККЛ с 30-ю квантовыми каскадами почти на порядок снижается плотность тока, необходимая для преодоления внутренних потерь и потерь на выход: до 0.44 кА/см² против 3.6 кА/см² у ККЛ с 15-ю квантовыми каскадами. Увеличение числа каскадов в активной области ККЛ с 15 до 30 позволило на порядок поднять выходную оптическую мощность у лазеров с одинаковыми геометрическими размерами. Так, максимальная выходная мощность для ККЛ с длиной резонатора 3 мм и шириной полоскового контакта 50 мкм составила около 5 Вт (~ 2.5 Вт с одного зеркала), а при длине резонатора 5 мм – свыше 10 Вт (более 5 Вт с одного зеркала). Отмечены перспективы получения лазерной генерации в непрерывном режиме при комнатной температуре за счет оптимизации постростовой обработки гетероструктур и снижения потерь в лазерном волноводе.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0318).

1. Казаринов Р.Ф., Суриц Р.А. *ФТП*, **5**, 797 (1971) [*Semiconductors*, **5**, 707 (1971)].
2. Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Hutchinson A.I., Cho A.Y. *Science*, **264**, 553 (1994).
3. Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Бабичев А.В., Андреев А.Д., Лосев С.Н., Когновицкая Е.А., Бобрецова Ю.К., Слипенченко С.О., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Денисов Д.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Кучинский В.И., Егоров А.Ю., Соколовский Г.С. *Квантовая электроника*, **50**, 141 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 141 (2020)].
4. Botez D., Chang C.-C., Mawst I.J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49**, 043001 (2016).
5. Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Курочкин А.С., Дюделев В.В., Колодезный Е.С., Соколовский Г.С., Бугров В.Е., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Денисов Д.В., Ионов А.С., Слипенченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Егоров А.Ю. *Письма в ЖТФ*, **45** (8), 31 (2019) [*Techn. Phys. Lett.*, **45**, 398 (2019)].
6. Lohmari Z., Bahriz M., Meguekam A., Teissier R., Baranov A.N. *Electron. Lett.*, **55**, 144 (2019).
7. Curl R.F., Capasso F., Gmachl C., Kosterev A.A., McManus B., Lewicki R., Pusharsky H., Wysocki G., Tittel F. *Chem. Phys. Lett.*, **487**, 1 (2010).
8. Man Helden J.H., Lopatik D., Navea A., Lang N., Davies P.B., Röpcke J. *J. Quantitat. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **151**, 287 (2015).
9. Yang C.G., Deng H., Qian Y.Y., Li M.X., Chen B., Xu Z.Y., Kan R.F. *Spectrochim. Acta Pt A: Molec. Biomolec. Spectrosc.*, **225**, 117478 (2020).
10. Zhou S., Liu N.W., Zhang L., He T.B., Li J.S. *Spectrochim. Acta Pt A: Molec. Biomolec. Spectrosc.*, **205**, 79 (2018).
11. Semtsiv M.P., Masselink W. *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 203502 (2016).
12. Liang P., Liu F.Q., Zhang J.C., Wang L.J., Liu J.Q., Wang Z.G. *Chin. Phys. Lett.*, **29**, 074215, (2012).
13. Yan F.-L., Zhang J.-C., Jia Z.-W., Zhuo N., Zhai S.-Q., Liu S.-M., Liu F.-Q., Wang Z.-G. *AIP Advances*, **6**, 035022 (2016).
14. Lyakh A., Maulini R., Tsekoun A., Go R., Kumar C., Patel N. *Opt. Express*, **22**, 1203 (2014).
15. Yao D.-Y., Zhang J.-C., Liu F.-Q., Zhuo N., Yan F.-L., Wang L.-J., Liu J.-Q., Wang Z.-G. *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 041121 (2013).

16. Yao D.-Y., Zhang J.-C., Liu F.-Q., Jia Z.-W., Yan F.-L., Wang L.-J., Liu J.-Q., Wang Z.-G. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **26**, 323 (2014).
17. Zhang J.-C., Wang L.-J., Liu W.-F., Liu F.-Q., Yin W., Liu J.-Q., Li L., Wang Z.-G. *Chin. Phys. Lett.*, **28**, 074203 (2011).
18. Dhirhe D., Slight T.J., Nshii C.C., Ironside C.N. *Semicond. Sci. Technol.*, **27**, 094007 (2012).
19. Zhang J.C., Liu F.Q., Tan S., Yao D.Y., Wang L.J., Li L., Liu J.Q., Wang Z.G. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 112105 (2012).
20. Zhang J.C., Wang L.J., Chen J.Y., Zhao L.H., Liu F.Q., Liu, J.Q., Wang Z.G. *Electron. Lett.*, **47**, 1338-U56 (2011).
21. Nwaboh J.A., Persijn S., Arrhenius K., Bohlén H., Werhahn O., Ebert V. *Meas. Sci. Technol.*, **29**, 095010 (2018).
22. Lyakh A., Maulini R., Tsekoun A., Go R., Von der Porten S., Pflugl C., Diehl L., Capasso F., Patel C.K.N. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **107**, 18799 (2010).
23. Егоров А.Ю., Бабичев А.В., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Никитина Е.В., Чернышова М., Софронов А.Н., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Пихтин Н.А., Тарасов И.С. *ФТП*, **49**, 1574 (2015) [*Semiconductors*, **49**, 1527 (2015)].
24. Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Дюделев В.В., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Денисов Д.В., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Соколовский Г.С., Егоров А.Ю. *Письма в ЖТФ*, **46** (9), 35 (2020) [*Techn. Phys. Lett.*, **46**, 444 (2020)].
25. Hofstetter D., Beck M., Aellen T., Faist J. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 396 (2001).
26. Rajeev A., Sigler C., Earles T.L., Flores Y.V., Mawst L.J., Botez D. *Opt. Eng.*, **57**, 011017 (2017).
27. Дюделев В.В., Лосев С.Н., Мыльников В.Ю., Бабичев А.В., Когновицкая Е.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Егоров А.Ю., Кучинский В.И., Соколовский Г.С. *Письма в ЖТФ*, **88**, 1708 (2018) [*Techn. Phys. Lett.*, **63**, 1656 (2018)].
28. Дюделев В.В., Лосев С.Н., Мыльников В.Ю., Бабичев А.В., Когновицкая Е.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Егоров А.Ю., Кучинский В.И., Соколовский Г.С. *Оптика и спектроскопия*, **125**, 387 (2018) [*Opt. Spectros.*, **125**, 402 (2018)].
29. Бабичев А.В., Дюделев В.В., Гладышев А.Г., Михайлов Д.А., Курочкин А.С., Колодезный Е.С., Бугров В.Е., Неведомский В.Н., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Денисов Д.В., Ионов А.С., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Соколовский Г.С., Егоров А.Ю. *Письма в ЖТФ*, **45** (14), 48 (2019) [*Tech. Phys. Lett.*, **45**, 735 (2019)].
30. Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Бабичев А.В., Лосев С.Н., Когновицкая Е.А., Лютецкий А.В., Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Денисов Д.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Кучинский В.И., Егоров А.Ю., Соколовский Г.С. *Квантовая электроника*, **50**, 720 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 720 (2020)].