

Квантово-каскадный лазер на 3.3 ТГц на основе активного модуля из трех квантовых ям GaAs/AlGaAs с рабочей температурой > 120 К

© Р.А. Хабибуллин^{1,2}, К.В. Маремьянин^{3,4}, Д.С. Пономарев¹, Р.Р. Галиев^{1,2}, А.А. Зайцев⁵, А.И. Данилов⁶, И.С. Васильевский⁷, А.Н. Виниченко⁷, А.Н. Клочков⁷, А.А. Афоненко⁸, Д.В. Ушаков⁸, С.В. Морозов^{3,4}, В.И. Гавриленко^{3,4}

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук, 117105 Москва, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁴ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022 Нижний Новгород, Россия

⁵ Национальный исследовательский университет МИЭТ, 124498 Зеленоград, Москва, Россия

⁶ АО НИИ Полюс им. М.Ф. Стельмаха, 117342 Москва, Россия

⁷ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Москва, Россия

⁸ Белорусский государственный университет, 220030 Минск, Беларусь

E-mail: khabibullin@isvch.ru, kirillm@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 18 мая 2021 г.

В окончательной редакции 25 мая 2021 г.

Принята к публикации 25 мая 2021 г.

Оптимизирована зонная структура квантово-каскадного лазера с активным модулем на основе трех квантовых ям GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As для высокотемпературной генерации на частоте ~ 3.3 ТГц. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращена гетероструктура с толщиной активной области 10 мкм и отклонением толщины активного модуля от номинального < 1%. Изготовленные терагерцовые квантово-каскадные лазеры с двойным металлическим волноводом позволяют получить генерацию вплоть до температуры 125 К. Исследования вольт-амперной характеристики, зависимости интегрального излучения от тока и спектров генерации показали хорошее согласие с рассчитанными характеристиками.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, терагерцовый диапазон, квантовая яма, молекулярно-лучевая эпитаксия.

DOI: 10.21883/FTP.2021.11.51551.46

1. Введение

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ), основанные на межподзонных переходах электронов в зоне проводимости гетероструктур GaAs/AlGaAs, являются уникальными компактными твердотельными источниками терагерцового (ТГц) излучения с инжекционной накачкой, в которых за счет вариации толщин слоев можно перестраивать частоту генерации от 1.2 до 5.4 ТГц (без использования больших магнитных полей) [1,2]. Несмотря на значительный прогресс ТГц ККЛ за последние 10–15 лет, актуальность задач по улучшению характеристик данных источников связана как с фундаментальными вопросами исследования электронного транспорта в чрезвычайно сложных квантовых системах, состоящих из более 1000 слоев нанометровой толщины, так и с прикладными задачами, где необходима спектральная чистота излучения, определенные мощностные и температурные характеристики.

К примеру, благодаря новым вариантам устройства энергетических зон в ТГц ККЛ в 2019–2020 гг. появились первые революционные результаты по работе данных источников, традиционно считавшихся криогенными приборами, при термоэлектрическом охлаждении с использованием элементов Пельтье [3–5]. С другой стороны, разработка новой архитектуры резонатора в сочетании с оптимизированным зонным устройством ТГц ККЛ позволила достичь высокого уровня мощности [6].

В то же время в России работы по созданию ТГц ККЛ начались с задержкой в 10–15 лет относительно работ зарубежных групп. Однако сегодня уже существуют ТГц ККЛ, полностью изготовленные в России, включая выращивание гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии и постростовую обработку полосковых лазеров с двойным металлическим волноводом [7,8]. Стоит отметить, что в имеющихся отечественных ТГц ККЛ был использован вариант зонной конфигурации (кон-

струкции активного модуля), опубликованный в работе [9]. Кроме того, рабочие температуры отечественных ТГц ККЛ не превышали 60–70 К [8], что существенно уступает зарубежным результатам.

В данной работе мы представляем результаты исследований вольт-амперных и спектральных характеристик ТГц ККЛ, полностью изготовленных в России, на основе оригинального устройства активной области для работы при высоких температурах. Показано двукратное увеличение максимальной рабочей температуры (T_{\max}) по сравнению с ранее изготовленными ТГц ККЛ, до $T_{\max} = 125$ К, а также даны рекомендации по дальнейшему увеличению T_{\max} .

2. Оптимизация зонной структуры терагерцового квантово-каскадного лазера

Для высокотемпературной генерации была выбрана конструкция ТГц ККЛ с активным модулем на основе трех туннельно-связанных квантовых ям (КЯ) GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As с резонансно-фононной схемой депопуляции нижнего лазерного уровня и частотой генерации ~ 3.3 ТГц. Принцип работы такого варианта лазера основан на последовательном резонансном туннелировании электронов на верхний лазерный уровень, испускании ТГц фотона и депопуляции нижнего лазерного уровня за счет рассеяния электронов на продольных оптических фононах. Данная схема работы ТГц ККЛ подробно описана в [9–11]. Выбранная частота генерации 3.3 ТГц соответствует минимуму потерь в ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом [12–14].

Значения энергии, вид волновых функций, а также профиль потенциальной энергии находились из самосогласованного решения уравнений Шредингера в 3-зонном $k \cdot p$ -приближении [15,16] и Пуассона. Численное моделирование оптических и электронных переходов проводилось с использованием системы балансных уравнений для одного каскада структуры [17,18]. При этом для учета когерентного электронного транспорта использовалось преобразование базиса собственных состояний уравнения Шредингера, приводящее к сильной локализации туннельно-связанных волновых функций [18], подобно использованию базиса в приближении сильной связи [19,20]. Расчеты коэффициента суммарных потерь проведены аналогично [12] для активной области толщиной 10 мкм с обкладками из двойного металлического волновода из золота с учетом потерь на зеркалах резонатора, свободных носителях заряда и поглощения на оптических фононах.

Толщины слоев разработанного активного модуля начиная с барьера инжектора составляют: **4.23/16.09/3.95/8.75/2.54/8.18** в нм (КЯ GaAs выделены жирным шрифтом). Легирование активного модуля донорной примесью Si составляло $3.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

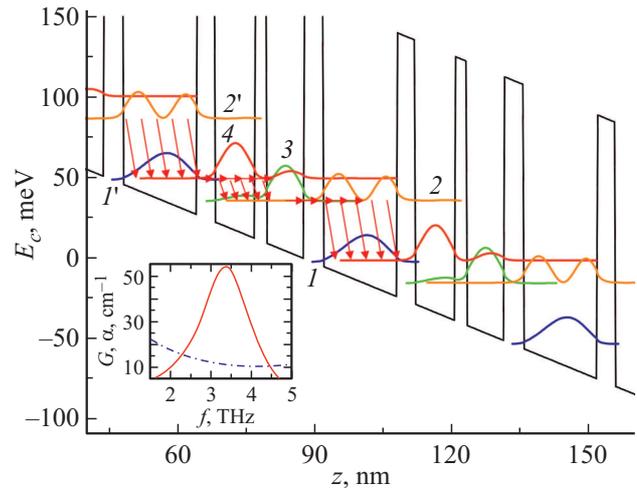


Рис. 1. Профиль энергии дна зоны проводимости E_c , уровни энергии и базисные волновые функции после процедуры локализации (модель сильной связи) для двух последовательных активных модулей при напряжении $V_1 = 51$ мВ и температуре 77 К. Количество стрелок пропорционально плотности тока через модуль. z — координата роста слоев. На вставке — рассчитанные спектры усиления G (сплошная линия) и коэффициента потерь α (штрихпунктирная линия) в двойном металлическом волновом. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

При моделировании высота потенциальных барьеров Al_{0.18}Ga_{0.82}As в зоне проводимости полагалась равной $\Delta E_c = 164$ мэВ.

На рис. 1 приведен расчет рабочих уровней энергии и волновых функций для разработанного модуля. Нумерация уровней в каскаде n идет снизу вверх от 1 до 4. Инжекция электронов на верхний лазерный уровень 4 осуществляется за счет резонансного туннелирования с основного уровня $1'$ широкой КЯ предыдущего активного модуля. Далее электроны излучательно переходят на нижний лазерный уровень 3, который эффективно опустошается за счет туннелирования на уровень 2 и безызлучательного перехода на уровень 1 путем испускания оптического фотона. Диагональный лазерный переход E_{43} с матричным элементом дипольных переходов $Z_{43} = 3.8$ нм реализуется на частоте генерации 3.3–3.4 ТГц и соответствует максимуму спектра усиления, как показано на вставке к рис. 1.

Рассчитанная вольт-амперная характеристика (ВАХ) одного активного модуля в режиме генерации и ватт-амперная характеристика (ВтАХ) для ККЛ с активной областью 10 мкм и размерами полоскового лазера 100×1000 мкм показаны на рис. 2. Отметим, что максимальная плотность тока J на ВАХ достигается вблизи напряжения $V_1 = 53$ мВ, когда уровень инжектора $1'$ совпадает с верхним лазерным уровнем 4. При дальнейшем увеличении напряжения уровень 4 становится ниже уровня $1'$, что соответствует отрицательной ветви ВАХ, где генерация не стабильна и, как показано в работе [21],

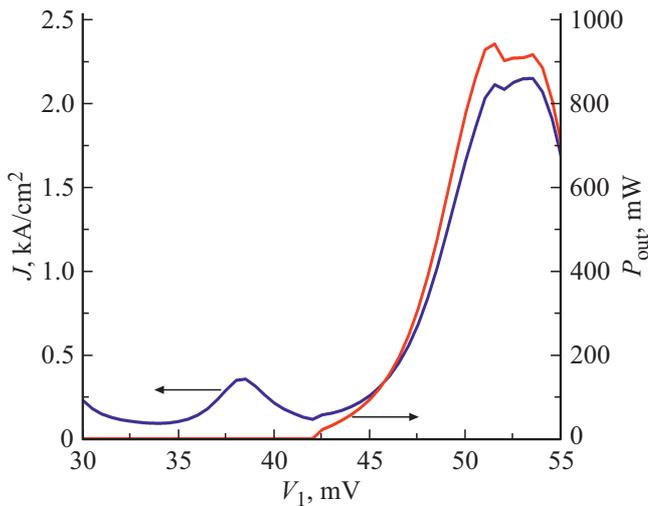


Рис. 2. Рассчитанная зависимость плотности тока через один активный модуль J в режиме генерации от приложенного напряжения V_1 при температуре 77 К и зависимость выходной мощности P_{out} от напряжения V_1 — расчет для полоскового лазера 100×1000 мкм с активной областью, содержащей 230 активных модулей, для температуры 77 К.

могут возникать домены электрического поля. Важно, что резонансный пик на ВАХ при напряжении вблизи $V_1 = 38$ мВ имеет существенно меньшую амплитуду, чем основной пик J в области генерации. Это позволит избежать проблем с электрической неустойчивостью в лазере. В ВАХ в целом повторяет поведение плотности тока накачки. При этом кривая мощности имеет максимум при $V_1 = 51$ – 54 мВ на одном активном модуле, что соответствует напряжению смещения для активной области 10 мкм ~ 12 В без учета вклада паразитных контактных сопротивлений.

3. Выращивание гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Оптимизированная гетероструктура GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As для ТГц ККЛ была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber Compact 21T в НИЯУ МИФИ. Особое внимание уделялось подбору технологических условий роста (температура подложки, поток мышьяка As₄) и точной калибровки скоростей роста соединений GaAs, AlAs, а также их стабильности в течение роста структур большой толщины. С целью выбора оптимальных условий роста для гетероструктуры ТГц ККЛ предварительно проводилась оптимизация условий роста при различных температурах подложки и разном давлении мышьяка. Для этого выращивалась серия структур со сверхрешеточными КЯ (СР КЯ) GaAs (8.5 нм)/Al_{0.18}Ga_{0.82}As (9.6 нм) с числом периодов не менее 40, которая анализировалась при

помощи комплекса методов. Критерием качества гетероструктур со СР КЯ являлись высокая интенсивность низкотемпературной ($T = 77$ К) фотолюминесценции при малой полуширине пика, низкая шероховатость поверхности, а также малая полуширина сверхрешеточных спутанных пиков на кривых рентгенодифракционного отражения от плоскостей (004) в режиме $2\theta - \omega$. В результате исследований были выбраны температура подложки во время роста 610°C и эквивалентное давление потока мышьяка $1.9 \cdot 10^{-5}$ Торр в зоне роста. В качестве опорного метода для калибровки скоростей роста было выбрано рентгенодифракционное измерение толщин СР КЯ двух типов — GaAs/AlAs и GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As, различающихся толщиной слоев и количеством периодов СР. Кроме того, перед ростом гетероструктуры ККЛ и сразу после нее выращивались калибровочные сверхрешетки GaAs(8.5 нм)/Al_{0.18}Ga_{0.82}As(13.6 нм) для контроля ухода скоростей роста AlAs и GaAs из-за расходования материала источников. Для обеспечения стабильности потоков перед ростом гетероструктуры ККЛ проводилось выдерживание источников при выбранных температурах в течение ~ 4 ч.

Структурные свойства гетероструктуры ТГц ККЛ исследовались методом высокоразрешающей рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku Ultima IV в двухкristальной схеме с монохроматором Ge(220)x2. На рис. 3 приведена кривая дифракционного отражения (КДО) излучения CuK α от плоскостей (004). Рядом с самым интенсивным рефлексом, соответствующим подложке GaAs, видны многочисленные острые спутанные пики, обусловленные периодическим характером исследуемой структуры. По положению этих пиков определена толщина периода каскада, равная 43.4 нм. Таким образом, величина отклонения периода гетероструктуры от номинального (43.74 нм) составляет $< 1\%$. На рис. 3 также приведена модельная КДО структуры, построенная в программе GlobalFit, в которой все толщины слоев

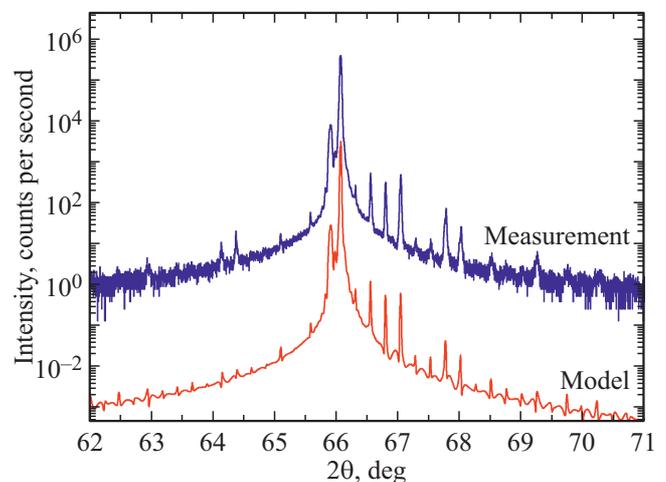


Рис. 3. Кривая рентгенодифракционного отражения в режиме $2\theta - \omega$ от плоскостей (004): эксперимент и моделирование.

уменьшены на 0.7% по сравнению с номинальными значениями. Хорошее согласие положения и амплитуды пиков КДО в эксперименте и модельном расчете указывает на незначительное отклонение параметров, подтверждающее правильность выбора технологического режима при получении многослойной гетероструктуры для ТГц ККЛ.

4. Экспериментальные образцы и методика измерений

На основе выращенной гетероструктуры #564 были изготовлены ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом (ДМВ). Постростовая технология изготовления полосковых лазеров с ДМВ Au–Au подробно описана в работах [22,23]. После формирования ДМВ подложка кристалла n^+ -GaAs утончалась до ~ 120 мкм и проводилось напыление металлических слоев Ti/Pd/Au (50/120/200 нм) на обратную сторону кристалла. Методом скалывания были сформированы полосковые лазеры. Из-за большого коэффициента отражения ТГц-излучения от сколотых граней, $R \approx 80\text{--}85\%$, в продольном направлении лазерных полосков возникает сильная обратная связь, что формирует резонатор Фабри–Перо. Выколотые полосковые ТГц ККЛ были смонтированы на теплоотводы типа C-mount; электрический контакт осуществлялся путем приваривания к верхнему полюсу нескольких золотых проволок диаметром 30 мкм, распределенных равномерно по всей длине полоска. Для измерений излучательных характеристик были выбраны ТГц ККЛ с номерами #52111 и #52113, различающиеся длиной резонатора.

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) и зависимостей интегральной интенсивности излучения от тока накачки и температуры изготовленных ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом проводились в импульсном режиме (длительность импульса 500 нс, частота повторения 100 Гц). Для питания структур использовался специально изготовленный электронный ключ, позволяющий получать импульсы заданных длительности, скважности и амплитуды, а также измерять напряжение и ток, проходящий через лазер. При измерениях ВАХ и интегральных зависимостей излучения от тока и температуры сигналы, пропорциональные амплитуде импульсов напряжения, тока и сигнала в приемнике подавались на двухканальный строб-интегратор Stanford Research Systems SR250.

Терагерцовые ККЛ размещались в вакууме на медном хладопроводе в гелиевом криостате замкнутого цикла, который позволял менять температуру лазера от 8 до 300 К. Для записи спектров излучения использовался фурье-спектрометр BRUKER Vertex 80v, работающий в режиме пошагового сканирования, в качестве приемника излучения при этом использовался штатный кремниевый болометр.

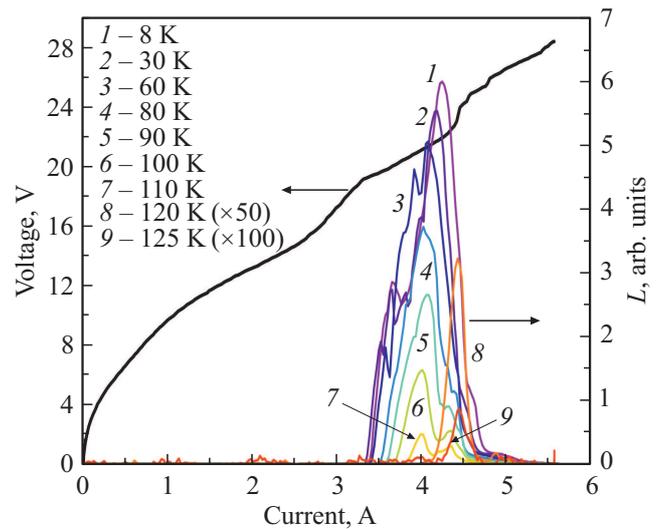


Рис. 4. ВАХ и зависимости интенсивности интегрального излучения от тока для ККЛ #52111 в диапазоне температур от 8 до 125 К. Амплитуда интегрального сигнала для температур 120 и 125 К умножена на 50 и 100 соответственно.

5. Исследование излучательных характеристик терагерцового квантово-каскадного лазера

На рис. 4 представлены ВАХ и зависимости интенсивности интегрального излучения от тока, $L(I)$, для исследуемого ККЛ #52111, измеренные в диапазоне температур от 8 до 125 К. При низких температурах порог генерации составляет $I_{th} \approx 3.35$ А, после чего наблюдается резкий рост сигнала L . Немонотонное поведение зависимости $L(I)$ в диапазоне токов от 3.6 до 3.8 А, вероятнее всего, связано с эффектом переключения мод (mode hopping). Увеличение температуры до 60 К не приводит к значительному падению сигнала L (уменьшение амплитуды составляет $< 20\%$). Однако при увеличении температуры > 80 К наблюдается более резкое падение сигнала L , что также сопровождается резким увеличением I_{th} . При этом лазерная генерация наблюдалась вплоть до температуры 125 К. Основываясь на высокой точности попадания выращенной гетероструктуры в номинальную толщину активного модуля (отклонение $< 1\%$), можно сделать вывод, что для дальнейшего увеличения рабочей температуры необходимо достичь более однородной толщины модуля в активной области и уменьшить шероховатость гетерограниц.

Для ККЛ #52113, имеющего меньшую длину резонатора и соответственно меньшие рабочие токи, были измерены спектры генерации. На рис. 5 приведены спектры генерации при токе $I = 1.78$ А (вблизи максимума сигнала), измеренные при трех температурах $T = 40, 70$ и 100 К. При 40 К в спектре наблюдаются две мощные спектральные линии вблизи частот $f = 3.2$ и 3.3 ТГц. Увеличение температуры приводит к уменьшению амплитуды данных линий вплоть до

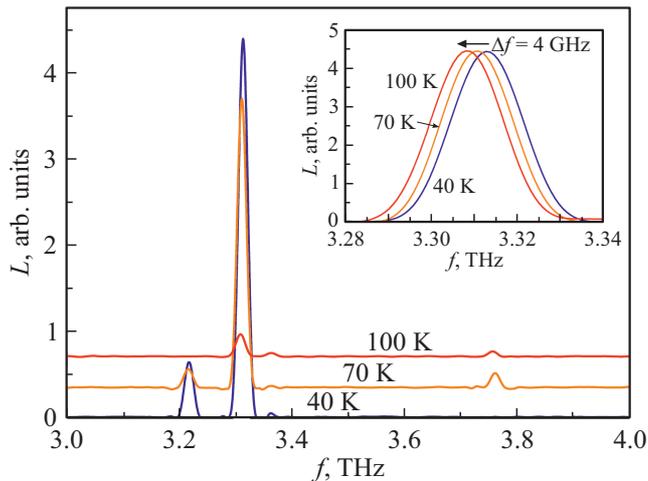


Рис. 5. Спектры излучения ККЛ #52113 при токе $I = 1.78$ А и температурах $T = 40, 70$ и 100 К. На вставке показано, как частота спектральной линии генерации перестраивается на 4 ГГц при увеличении температуры. Спектры измерены с разрешением 15 ГГц.

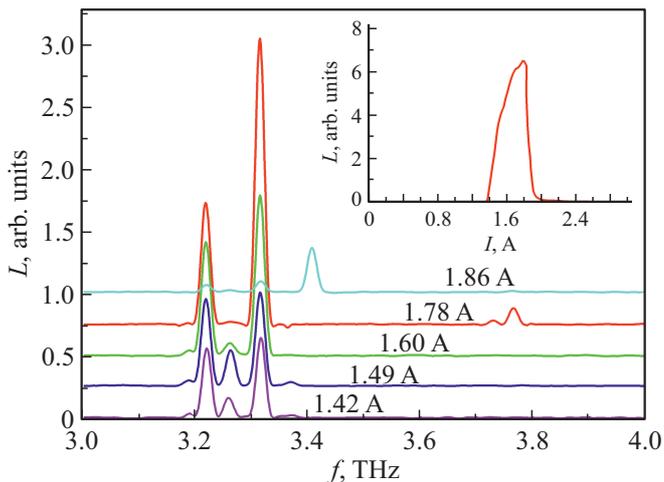


Рис. 6. Спектры излучения ККЛ #52113 при разных токах смещения и постоянной температуре $T = 8.5$ К. На вставке — зависимость интегрального излучения от тока смещения.

прекращения генерации низкочастотной моды при 100 К. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с рассчитанным спектром усиления активного модуля (см. вставку на рис. 1) с максимумом усиления вблизи 3.3 ТГц. Необходимо также отметить, что в экспериментальных спектрах при температурах 70 и 100 К наблюдается слабая линия в области 3.75 ТГц. Возникновение данной высокочастотной линии может быть связано с появлением дополнительных лазерных переходов между уровнями $1'-3$ и (или) $4-2$, которые проявляются при насыщении основного лазерного перехода $4-3$. Как показывает моделирование, такие переходы также могут возникать при отклонении толщин

слоев экспериментальных структур от рассчитанных, например, при увеличении толщины слоя широкой КЯ.

На вставке к рис. 5 показано, как происходит температурная перестройка спектральной линии с частотой вблизи 3.3 ТГц. Видно, что при увеличении температуры на 60 К частота линии перестраивается на $\Delta f = 4$ ГГц (красное смещение), что обусловлено изменением диэлектрической проницаемости кристаллической решетки, т.е. коэффициент температурной перестройки равен -66.6 МГц/К.

На рис. 6 представлены спектры генерации ККЛ #52113 при разных токах смещения и одной температуре 8.5 К. При увеличении тока смещения происходит последовательное увеличение интенсивности высокочастотных мод и падение интенсивностей низкочастотных мод, что связано со смещением максимума усиления в высокочастотную область. При малых токах накачки от 1.42 до 1.60 А наблюдается генерация еще одной моды, которая находится между наблюдаемыми ранее при 3.2 и 3.3 ТГц. При больших токах ($I = 1.86$ А) возникает „новая“ высокочастотная мода вблизи 3.4 ТГц. Из вставки к рис. 6 можно заметить, что данный ток соответствует области резкого падения интенсивности излучения ККЛ.

6. Заключение

В работе предложена оригинальная зонная конфигурация для ТГц ККЛ с активным модулем на основе трех квантовых ям GaAs/Al_xGa_{1-x}As с содержанием алюминия в барьерных слоях $x = 0.18$ для высокотемпературной генерации на частоте ~ 3.3 ТГц. Методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии установлено, что толщина активного модуля выращенной гетероструктуры (43.40 нм) отличается от номинальной (43.74 нм) на 0.7% . Изготовленные ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом позволяют получить генерацию вплоть до температуры 125 К, в 2 раза выше по сравнению с ранее изготовленными отечественными ТГц ККЛ. Для измеренных спектров излучения характерна генерация на $3-4$ модах в области $3.2-3.8$ ТГц с наиболее мощными спектральными линиями вблизи 3.3 ТГц, что хорошо соответствует рассчитанному спектру усиления. Определен коэффициент температурной перестройки моды вблизи 3.3 ТГц, который составил -66.6 МГц/К.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-72-30020 (теоретические расчеты, изготовление и измерение характеристик ККЛ), а также в рамках государственного задания НИЯУ МИФИ (проект № 0723-2020-0037 — отработка технологии и рост структуры методом молекулярно-лучевой эпитаксии).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.S. Vitiello, G. Scalari, B. Williams, P.D. Natale. *Opt. Express*, **23**, 5167 (2015).
- [2] G. Liang, T. Liu, Q.J. Wang. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **23**, 1200118 (2017).
- [3] L. Bosco, M. Franckie, G. Scalari, M. Beck, A. Wacker, J. Faist. *Appl. Phys. Lett.*, **115**, 010601 (2019).
- [4] M.A. Kainz, M.P. Semtsiv, G. Tsianos, S. Kurlov, W.T. Masselink, S. Schönhuber, H. Detz, W. Schrenk, K. Unterrainer, G. Strasser, A.M. Andrews. *Opt. Express*, **27**, 20688 (2019).
- [5] A. Khalatpour, A.K. Paulsen, C. Deimert, Z.R. Wasilewski, Q. Hu. *Nature Photonics*, **15**, 16 (2021).
- [6] Y. Jin, J. L. Reno, S. Kumar. *Optica*, **7**, 708 (2020).
- [7] К.В. Маремьянин, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко, А.Ю. Павлов, Н.В. Щаврук, Р.А. Хабибуллин, Р.Р. Резник, Г.Э. Цырлин, Ф.И. Зубов, А.Е. Жуков, Ж.И. Алфёров, А.В. Иконников. *Письма ЖТФ*, **43**, 86 (2017).
- [8] Г.Э. Цырлин, Р.Р. Резник, А.Е. Жуков, Р.А. Хабибуллин, К.В. Маремьянин, В.И. Гавриленко, С.В. Морозов. *ФТП*, **54**, 902 (2020).
- [9] S. Fatholouloumi, E. Dupont, C.W.I. Chan, Z.R. Wasilewski, S.R. Laframboise, D. Van, A. Matyas, C. Jirauschek, Q. Hu, H.C. Liu. *Opt. Express*, **20**, 3866 (2012).
- [10] Р.А. Хабибуллин, Н.В. Щаврук, А.Н. Клочков, И.А. Глинский, Н.В. Зенченко, Д.С. Пономарев, П.П. Мальцев, А.А. Зайцев, Ф.И. Зубов, А.Е. Жуков, Г.Э. Цырлин, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **51**, 540 (2017).
- [11] S. Kumar, Q. Hu, J.L. Reno. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 131105 (2009).
- [12] Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов, В.И. Гавриленко, И.С. Васильевский, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин. *Квант. электрон.*, **48**, 1005 (2018).
- [13] R. Khabibullin, D. Ushakov, A. Afonenko, N. Shchavruk, D. Ponomarev, I. Vasil'evskii, D. Safonov, A. Dubinov. *Proc. SPIE*, **11066**, 1106613 (2018).
- [14] R. Khabibullin, D. Ushakov, A. Afonenko, N. Shchavruk, D. Ponomarev, O. Volkov, V. Pavlovskiy, I. Vasil'evskii, D. Safonov, A. Dubinov. *Proc. SPIE*, **11022**, 1102204 (2019).
- [15] C. Sirtori, F. Capasso, J. Faist, S. Scandolo. *Phys. Rev. B*, **50**, 8663 (1994).
- [16] D. Ushakov, A. Afonenko, R. Khabibullin, D. Ponomarev, V. Aleshkin, S. Morozov, A. Dubinov. *Opt. Express*, **28**, 25371 (2020).
- [17] Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов, В.И. Гавриленко, О.Ю. Волков, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин. *Квант. электрон.*, **49**, 913 (2019).
- [18] Д.В. Ушаков, И.С. Манак. *ЖПС*, **74**, 801 (2007).
- [19] Р.А. Казаринов, Р.А. Сурис. *ФТП*, **5**, 797 (1971).
- [20] Р.А. Казаринов, Р.А. Сурис. *ФТП*, **6**, 148 (1972).
- [21] R.A. Khabibullin, N.V. Shchavruk, D.S. Ponomarev, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, K.V. Maremyanin, O.Yu. Volkov, V.V. Pavlovskiy, A.A. Dubinov. *Opto-Electron. Rev.*, **27**, 329 (2019).
- [22] Р.А. Хабибуллин, Н.В. Щаврук, А.Ю. Павлов, Д.С. Пономарев, К.Н. Томош, Р.Р. Галиев, П.П. Мальцев, А.Е. Жуков, Г.Э. Цырлин, Ф.И. Зубов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **50**, 1395 (2016).
- [23] Р.А. Хабибуллин, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, И.С. Васильевский, А.А. Зайцев, А.И. Данилов, О.Ю. Волков, В.В. Павловский, К.В. Маремьянин, В.И. Гавриленко. *ФТП*, **52**, 1268 (2018).

Редактор Л.В. Шаронова

3.3 THz quantum cascade laser based on three GaAs/AlGaAs quantum wells active module with operation temperature above 120 K

R.A. Khabibullin^{1,2}, K.V. Maremyanin^{3,4}, D.S. Ponomarev¹, R.R. Galiev^{1,2}, A.A. Zaycev⁵, A.I. Danilov⁶, I.S. Vasil'evskii⁷, A.N. Vinichenko⁷, A.N. Klochkov⁷, A.A. Afonenko⁸, D.V. Ushakov⁸, S.V. Morozov^{3,4}, V.I. Gavrilenko^{3,4}

¹ Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

² Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

³ Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603087 Nizhny Novgorod, Russia

⁴ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

⁵ National Research University of Electronic Technology, 124498 Zelenograd, Moscow, Russia

⁶ JSC Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh, 117342 Moscow, Russia

⁷ National Research Nuclear University MEPhI, 115409 Moscow, Russia

⁸ Belarusian State University, 220030 Minsk, Belarus

Abstract In this work, we have optimized the THz QCL design with an active module based on three GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As quantum wells for high-temperature generation at a frequency of ~ 3.3 THz. A heterostructure based on the developed design with an active region thickness of 10 μm was grown by molecular beam epitaxy with a deviation of the active module thickness from the nominal < 1%. The fabricated THz QCLs with a double metal waveguide demonstrate lasing up to the temperature of 125 K. Investigations of the current–voltage characteristics, the dependences of the integrated radiation on the current and the lasing spectra showed good agreement with the calculated characteristics.