

УДК 535.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ИМПУЛЬСНЫХ КВАНТОВЫХ КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

*А. А. Ластовкин*¹, *А. В. Иконников*¹, *В. И. Гавриленко*¹, *А. В. Антонов*¹,
*Ю. Г. Садофьев*²

¹ Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород;

² Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань, Россия

Методом фурье-спектроскопии исследованы спектры излучения терагерцовых импульсных квантовых каскадных лазеров с частотами генерации около 2,6 ТГц и 3,2 ТГц. Продемонстрирована перестройка частоты генерации на 5,4 ГГц для лазера на 2,6 ТГц при изменении температуры от 8 до 86 К и на 2,7 ГГц для лазера на 3,2 ТГц при изменении температуры от 10 до 60 К. Данная перестройка вызвана в основном изменением с температурой эффективного показателя преломления активной области. Впервые для лазера с конструкцией активной области, основанной на быстрой откачке носителей с нижнего рабочего уровня за счёт рассеяния на фонах, была продемонстрирована перестройка частоты генерации на 420 МГц в течение импульса излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Квантовые каскадные лазеры — компактные твердотельные источники электромагнитного поля, длинноволновая область излучения которых захватывает терагерцовый диапазон частот. Частоты многих возбуждений в конденсированных средах, таких как фононы, возбуждения мелких примесей, вращательные и колебательные возбуждения в жидкостях, а также частоты циклотронного и парамагнитного резонансов и спектральные особенности многих органических молекул, включая биологически важные молекулы ДНК и белков, соответствуют терагерцовому диапазону [1]. Поэтому использование методов терагерцовой спектроскопии для анализа таких сред представляется весьма интересным. Перспективность применения квантовых каскадных лазеров для терагерцовой спектроскопии обусловлена узостью (до 100 кГц [2]) их спектральных линий и возможностью изменения их частот. Однако в опубликованных до настоящего времени работах перестройка частоты терагерцовых квантовых каскадных лазеров при изменении рабочей температуры исследовалась только в узком интервале значений последней, см., например [2–4], а изучению перестройки частоты излучения импульсных лазеров в течение импульса посвящена только одна работа [4]. При этом для терагерцовой спектроскопии остаются актуальными задачи управления частотой излучения квантовых каскадных лазеров за счёт изменения их рабочих температур. Исследование процессов разогрева лазерной структуры даёт возможность контролировать перестройку частоты лазеров, что может использоваться в приборах селективного обнаружения примесей разнообразных веществ.

В настоящей работе методом фурье-спектроскопии высокого разрешения исследованы спектры излучения квантовых каскадных лазеров с частотами генерации около 2,6 ТГц и 3,2 ТГц, изучены температурные зависимости последних в широком интервале температур от 8 до 86 К, а также представлены данные по их изменению в течение импульса и проведено сравнение с опубликованными ранее результатами, полученными для квантовых каскадных лазеров с другой конструкцией активной области.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследуемые квантовые каскадные лазеры были предоставлены фирмой «Trion Technology» (г. Темпе, Аризона, США). Активная область лазерной структуры содержала около 200 каскадов, каждый из которых состоял из четырёх квантовых ям GaAs, разделённых барьерными слоями $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$. Конструкция подобного лазера подробно рассмотрена в работе [5]. Инверсия населённости на рабочем переходе в таких устройствах достигается за счёт туннелирования электронов с инжекторного уровня на верхний рабочий уровень и опустошения нижнего рабочего уровня благодаря резонансному рассеянию с испусканием продольных оптических фононов. Структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs, последовательность роста и послеростовых операций соответствовала описанной в работе [6]. Активная область прибора толщиной около 10 мкм была ограничена двумя металлическими слоями, являющимися обкладками полоскового волновода. Методом фотолитографии формировалось несколько полосков шириной около 100 мкм, после чего выкальвались лазерные чипы с длиной $1\div 2$ мм в направлении распространения излучения и с шириной несколько миллиметров; зеркала резонатора были образованы сколами вдоль плоскости (110). Лазеры монтировались на медный хладопровод, являвшийся нижним контактом к структуре.

Квантовые каскадные лазеры размещались в вакууме в гелиевом криостате замкнутого цикла «Displex DE-202S». Блок управления температурой криостата позволял устанавливать и автоматически поддерживать заданную температуру хладопровода. Измерения проводились в импульсном режиме. Для питания лазеров использовался электронный ключ, формирующий импульсы напряжения с длительностями $1\div 100$ мкс и скважностью $10\div 100$. Питание ключа осуществлялось источником Keithley Source Meter 2400, который позволял осуществлять пошаговую развёртку выходного напряжения при измерениях излучательных и вольт-амперных характеристик лазеров.

При измерениях вольт-амперных характеристик сигналы, пропорциональные амплитуде импульсов напряжения и тока, подавались на двухканальный строб-интегратор SRS.SR250 фирмы «Stanford Research Systems». Он осуществлял «выборку» амплитуды исследуемых импульсов в заданном временном окне, соответствующем длительности строба, и проводил усреднение сигнала по большому числу реализаций. Постоянное напряжение с выхода каждого из каналов строб-интегратора оцифровывалось с помощью аналого-цифрового преобразователя и записывалось в память ЭВМ.

При измерениях интегральной интенсивности излучения квантовых каскадных лазеров в зависимости от тока накачки их выходное излучение через полиэтиленовое окно криостата замкнутого цикла с помощью световода заводилось через фильтр-окно, изготовленное из чёрного полиэтилена, в световодный модуль-вставку в транспортном гелиевом сосуде Дьюара СТГ-40, в котором непосредственно в жидком гелии при температуре 4,2 К находился примесный фотоприёмник Ge : Ga. Смещение на приёмник подавалось с предусилителя прибора UNIPAN 232B, использовавшегося в данном эксперименте в качестве широкополосного усилителя с полосой 150 кГц, которая соответствовала длительности фронта нарастания сигнала 2 мкс. Усиленный сигнал с фотоприёмника вместе с импульсом, пропорциональным току через лазер, подавались на два канала строб-интегратора. Сигналы с его выхода оцифровывались и записывались в ЭВМ. Запись зависимости интенсивности излучения от тока при заданной температуре проводилась при автоматической развёртке источника питания Keithley Source Meter 2400.

Спектры излучения квантовых каскадных лазеров измерялись с помощью фурье-спектрометра высокого (до $0,003\text{ см}^{-1}$) разрешения BOMEM DA3.36. При этом оптическая конфигурация эксперимента была аналогична использованной при измерениях интегральной интенсивности из-

лучения. Смещение на фотоприёмник также подавалось с предусилителя прибора UNIPAN 232В. Поскольку спектрометр BOMEM DA3.36 работает в режиме быстрого сканирования и не позволяет осуществлять пошаговое перемещение зеркала интерферометра Майкельсона, что необходимо для работы с импульсными сигналами, импульсный сигнал с фотоприёмника сглаживался полосовым фильтром $50 \div 150$ Гц прибора UNIPAN 232В. Вследствие этого изменение сигнала после усилителя UNIPAN 232В и полосового фильтра определялось лишь перемещением зеркала интерферометра фурье-спектрометра. Усиленный сигнал оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя фурье-спектрометра и записывался в память ЭВМ как функция положения зеркала, после чего осуществлялось фурье-преобразование полученной таким образом интерферограммы.

При измерениях перестройки частоты квантового каскадного лазера за время импульса генерации частота повторения импульсов выбиралась таким образом, чтобы на периоде интерферограммы укладывалось достаточное количество импульсов, обычно 10 импульсов. Период интерферограммы определялся частотой излучения и скоростью движения зеркала спектрометра, которая была равна $0,5$ см/с. Типичное значение частоты повторения составляло 1 кГц. Сигнал с приёмника усиливался прибором UNIPAN 232В с полосой усиления 150 кГц, которая соответствовала временному разрешению 2 мкс, и детектировался строб-интегратором SRS.SR250. Измерение сигнала происходило во временном окне, задаваемом длительностью строба и его задержкой относительно начала импульса тока через лазер. С выхода строб-интегратора сигнал поступал на аналого-цифровой преобразователь фурье-спектрометра.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены вольт-амперная характеристика и зависимость интегральной интенсивности излучения от тока для квантового каскадного лазера с частотой генерации около $2,6$ ТГц. Рабочие напряжения лазера лежат в диапазоне от $13,5$ до $14,5$ В, что соответствует токам $0,40 \div 0,65$ А. При $U > 14,5$ В на осциллограммах напряжения и тока наблюдались высокочастотные неустойчивости и мощность лазера резко уменьшалась. Видно, что при пороговом токе $0,4$ А на вольт-амперной характеристике наблюдается излом, соответствующий уменьшению дифференциального сопротивления лазера, что связано с уменьшением времени жизни носителей на верхнем рабочем уровне вследствие стимулированных излучением переходов. При исследовании спектров излучения лазера рабочая точка всегда выбиралась вблизи максимума вольт-амперной характеристики и лежала в непосредственной близости порога появления неустойчивостей. Аналогичные зависимости были получены для квантового каскадного лазера с частотой генерации около $3,2$ ТГц, для которого оптимальное рабочее напряжение было равно $14,7$ В.

На рис. 2 представлена зависимость частоты излучения квантового каскадного лазера с частотой генерации около $2,6$ ТГц от температуры. Длительность импульса тока была равна 3 мкс при частоте повторения импульсов 10 кГц. Спектры излучения записывались с разрешением $0,007$ см⁻¹. На вставке на рис. 2 показан характерный спектр излучения лазера, измеренный при температуре 45 К. Из него видно, что ширина линии излучения при одномодовой генерации была равна $0,015$ м⁻¹, что соответствует 450 МГц. Как и в работах [3, 7], в настоящей работе наблюдалась нелинейная зависимость частоты от температуры, однако нам впервые удалось проследить эту зависимость в широком интервале температур от 8 до 86 К. При этом частота лазера изменялась от $87,14$ до $86,96$ см⁻¹, т. е. на $5,4$ ГГц. Коэффициент температурной перестройки частоты изменялся от $-0,25 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹/К ($-7,5$ МГц/К) при низких температурах до $-4,2 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹/К (-126 МГц/К) при высоких температурах, что качественно согласуется с данными, полученными в работах [2, 3, 7, 8]. Частота излучения лазера определяется модами резонатора Фабри–Перо

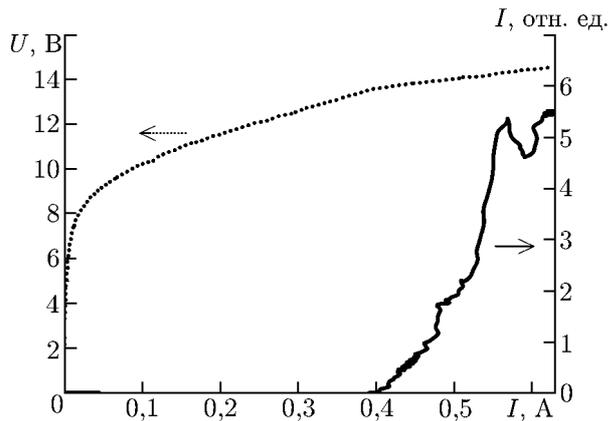


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика (пунктирная кривая) и зависимость интегральной интенсивности излучения I от тока (сплошная кривая) квантового каскадного лазера с частотой генерации около 2,6 ТГц, измеренные при температуре хладопровода 8 К

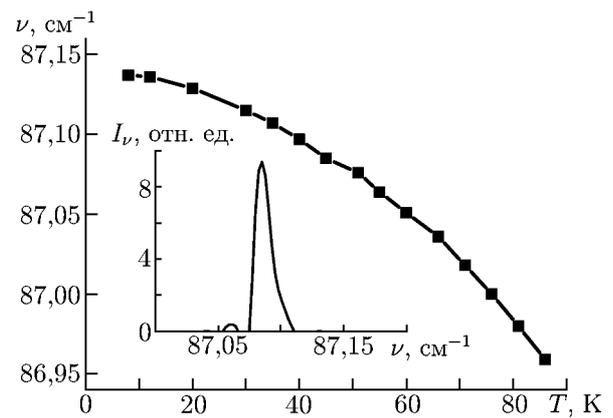


Рис. 2. Зависимость частоты излучения ν квантового каскадного лазера с частотой генерации около 2,6 ТГц от температуры хладопровода. Длительность импульса излучения равна 3 мкс, частота повторения импульсов 10 кГц. На вставке приведён спектр излучения лазера I_ν , измеренный при температуре 45 К с разрешением $0,007 \text{ см}^{-1}$, ширина линии на полувысоте — $0,015 \text{ см}^{-1}$

согласно формуле $f = mc/(2n_{\text{eff}}L)$, где m — номер моды, n_{eff} — показатель преломления, L — длина резонатора. Повышение температуры приводит к изменению как показателя преломления, так и длины резонатора. В работе [2] было показано, что основной вклад в уменьшение частоты при росте температуры даёт изменение показателя преломления, что находится в соответствии с данным экспериментом.

На рис. 3 представлена зависимость ширины спектральной линии лазера от длительности импульса. Видно, что наблюдаемая ширина линии излучения возрастает от $0,012 \text{ см}^{-1}$ при длительности импульса 2 мкс до $0,024 \text{ см}^{-1}$ при длительности импульса 6 мкс, что может быть связано с разогревом активной области лазера и перестройкой частоты излучения за время импульса.

Для исследования эффекта перестройки частоты за время импульса были проведены исследования спектров излучения квантовых каскадных лазеров с временным разрешением в различные моменты времени в течение импульса тока. Конкретно, исследовался квантовый каскадный лазер с частотой генерации около 3,2 ТГц. На рис. 4 представлены спектры излучения этого лазера, измеренные при различной температуре хладопровода. Длительность импульса была равна 40 мкс при частоте повторения импульсов 1 кГц. Спектры излучения записывались с разрешением $0,01 \text{ см}^{-1}$. Температура варьировалась от 10 до 60 К, при этом частота изменялась в интервале от $107,00$ до $106,91 \text{ см}^{-1}$, т. е. на 2,7 ТГц.

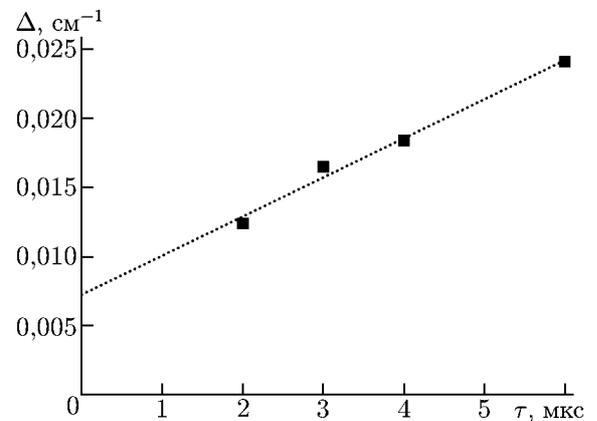


Рис. 3. Значения спектральной ширины линии Δ на полувысоте при различной длительности τ импульса излучения квантового каскадного лазера с частотой генерации около 2,6 ТГц. Частота повторения импульсов равна 10 кГц, температура хладопровода — 45 К, спектральное разрешение — $0,007 \text{ см}^{-1}$

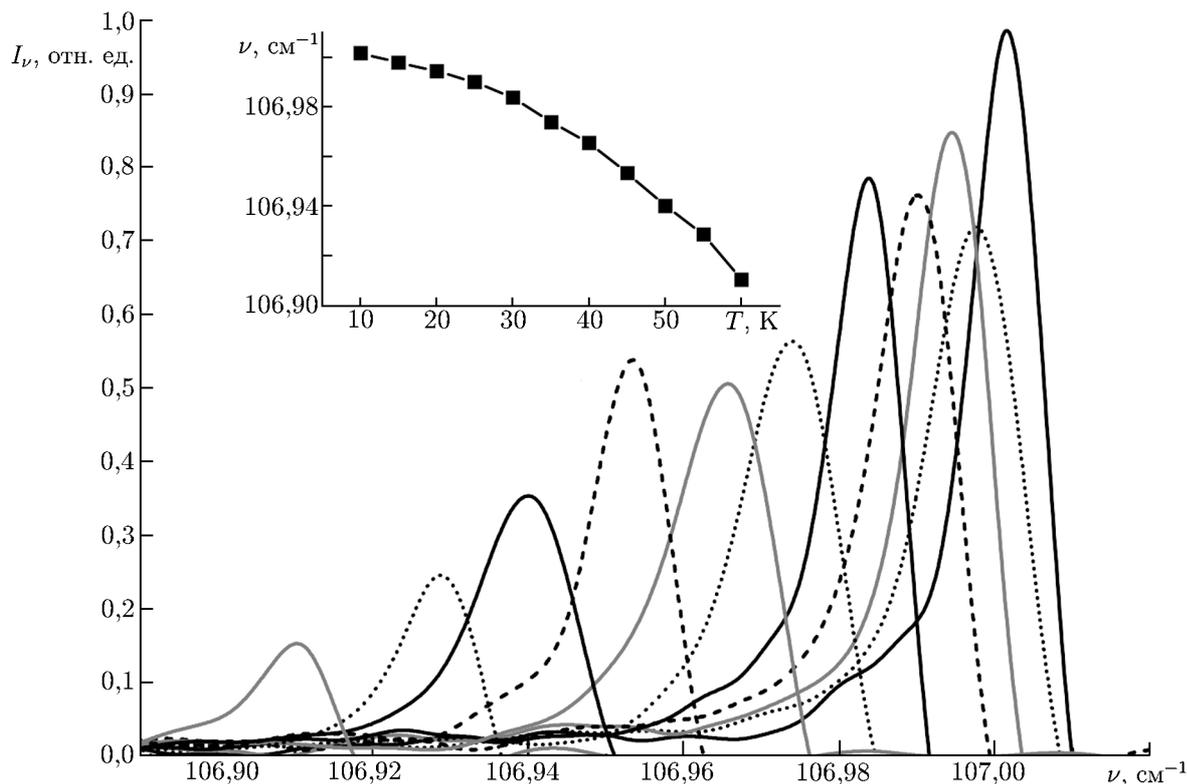


Рис. 4. Спектры излучения квантового каскадного лазера с частотой генерации около 3,2 ТГц, записанные в интервале температур хладопровода (справа налево) от 10 до 60 К с шагом 5 К. Длительность импульсов была равна 40 нс, частота их повторения — 1 кГц, спектральное разрешение — 0,01 см⁻¹. На вставке приведена соответствующая спектрам зависимость частоты излучения от температуры хладопровода

Неточности записи аппаратной функции спектрометра, т. е. ошибки в определении «нуля» интерферограммы излучения глобара, приводили к фазовым ошибкам, которые было трудно устранить при высоком спектральном разрешении. Это объясняет появление в спектрах на краю линии отрицательной амплитуды интенсивности излучения. На вставке на рис. 4 изображена зависимость частоты излучения лазера от температуры хладопровода. Уменьшение частоты при увеличении температуры для этого лазера также имеет параболический вид. Коэффициент температурной перестройки лазера изменялся от $-0,76 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹/К (-23 МГц/К) при низкой температуре до $-3,64 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹/К (-109 МГц/К) при высокой температуре. В целом характер температурной перестройки частоты излучения данного лазера хорошо согласуется с таковым для квантового каскадного лазера с частотой генерации около 2,6 ТГц, см. рис. 2.

Для квантового каскадного лазера с частотой генерации около 3,2 ТГц были выполнены измерения спектра его излучения в различные моменты импульса генерации, длительность которого, как и при записи спектров при различных температурах, была равна 40 нс, а частота повторения импульсов — 1 кГц. Таким образом, скважность импульсного сигнала равнялась 25, что позволило минимизировать эффект «остаточного» разогрева лазерной структуры к моменту включения следующего импульса, см. ниже. Температура хладопровода составляла 10 К. Спектры записывались с разрешением 0,01 см⁻¹. Полученные спектры представлены на рис. 5, а на рис. 6 приведена зависимость сдвига частоты излучения от времени задержки строб-импульса с длительностью 2 нс относительно начала импульса тока через лазер. Отметим, что импульс излучения лазера был задержан примерно на 1 нс относительно импульса тока и длитель-

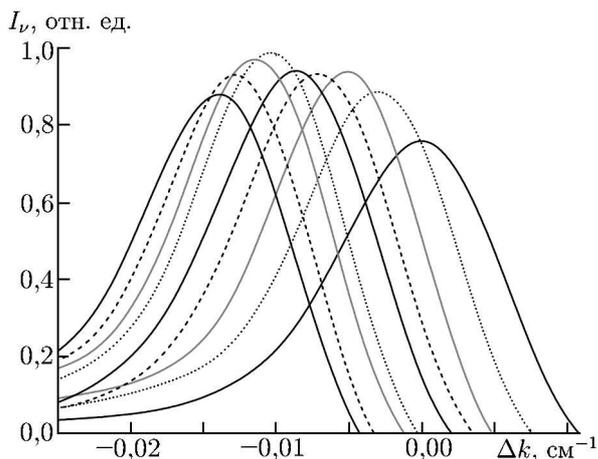


Рис. 5. Спектры излучения квантового каскадного лазера с частотой генерации около 3,2 ТГц, измеренные в различные моменты импульса генерации с разрешением $0,01 \text{ см}^{-1}$. Ноль оси абсцисс соответствует максимуму спектральной линии, записанной при установке импульса строба в начало «плоского» участка импульса излучения. Спектры записаны при задержке строб-импульса длительностью 2 мкс относительно начала импульса тока (справа налево) на 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 21 и 25 мкс. Длительность импульса излучения была равна 40 мкс, частота повторения — 1 кГц, температура хладопровода — 10 К

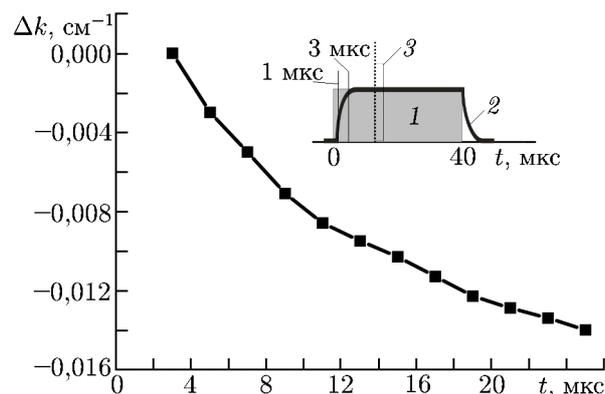


Рис. 6. Зависимость сдвига частоты излучения от времени задержки строб-импульса t для квантового каскадного лазера с частотой генерации около 3,2 ТГц. Ноль оси ординат соответствует максимуму спектральной линии, записанной при установке импульса строба в начало «плоского» участка импульса излучения. Спектры записывались с разрешением $0,01 \text{ см}^{-1}$. На вставке схематически изображён импульс тока через квантовый каскадный лазер с длительностью 40 мкс (1) и импульс излучения лазера (2), а также строб-импульс (3). Временной сдвиг импульса излучения относительно начала импульса тока был равен 1 мкс. Длительность фронта импульса излучения составляла 2 мкс

ность фронта импульса излучения составляла 2 мкс в соответствии с шириной полосы усилителя UNIPAN 232B, равной 150 кГц. Таким образом, значение времени задержки 3 мкс соответствует началу «плоского» участка импульса излучения, см. вставку на рис. 6. Как видно из рис. 5 и 6, с ростом времени задержки частота излучения уменьшается, что, очевидно, связано с ростом температуры активной области. При увеличении времени задержки от 3 до 25 мкс частота излучения лазера сдвигалась на $0,014 \text{ см}^{-1}$ (420 МГц). В соответствии с данными, представленными на рис. 4, такой сдвиг соответствует повышению температуры на 15 К (от 10 до 25 К).

Как видно из рис. 5 и 6, в начале импульса скорость изменения частоты заметно выше, чем в дальнейшем, несмотря на обратную тенденцию изменения частоты излучения при повышении температуры. Качественно такое поведение легко понять, исходя из особенностей теплоёмкости кристаллической решётки полупроводников при низких температурах T , которая в рассматриваемой области практически пропорциональна T^3 . Для оценок величины адиабатического разогрева активной области и стационарного отвода тепла можно воспользоваться данными по теплоёмкости [9, 10] и теплопроводности [11] GaAs при низких температурах. При выделяемой электрической мощности 3,2 Вт в активной области квантового каскадного лазера с длиной 1,55 мм, шириной 90 мкм и толщиной 10,8 мкм оценка величины адиабатического разогрева за время 25 мкс даёт температуру около 90 К для температуры Дебая 345 К, соответствующей случаю низких температур и около 70 К для температуры Дебая 250 К, соответствующей её минимуму в районе 25 К [10]. Однако в любом случае эта оценка даёт многократно завышенную величину температуры. С другой стороны, для одномерной модели стационарного теплоотвода от активной

области лазера через подложку GaAs толщиной 300 мкм на хладопровод с температурой 10 К (в которой не учитывается как растекание тепла по подложке шириной несколько миллиметров, что понижает температуру активной области T , так и тепловые сопротивления на границах подложка—подложка и подложка—хладопровод, что повышает T), исходя из значения теплопроводности GaAs $20 \text{ Вт}/(\text{см}\cdot\text{К})$ в области температур $10\div 30 \text{ К}$ [11], получаем величину $\Delta T = 3,5 \text{ К}$. Как отмечалось в работе [12], именно растекание тепла по подложке определяет тепловое сопротивление квантового каскадного лазера. Таким образом, качественно картину перестройки частоты излучения в течение импульса вследствие разогрева активной области лазера можно представить следующим образом. В начальный момент температура активной области резко повышается, увеличиваясь при адиабатическом разогреве пропорционально корню четвёртой степени из времени, что приводит к быстрому изменению частоты генерации. В дальнейшем рост температуры замедляется вследствие растекания тепла по подложке, что приводит и к замедлению перестройки частоты. Подобная зависимость наблюдалась в [4], единственной известной авторам работе, где исследовалась перестройка частоты излучения терагерцового квантового каскадного лазера (с другой конструкцией) от времени в течение импульса с помощью гетеродинного приёмника. В ней было установлено, что за первые 15 мкс частота излучения уменьшалась на 700 МГц. Однако, в отличие от настоящей работы, в [4] при больших временах задержки наблюдалось возрастание частоты, которое к концу импульса достигало величины 400 МГц относительно значения частоты в момент времени, соответствующий 15 мкс от начала импульса. Такое поведение частоты генерации можно объяснить переходом от квазиадиабатического разогрева к режиму стационарного теплоотвода.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе методом фурье-спектроскопии проведены исследования спектров излучения терагерцовых импульсных квантовых каскадных лазеров с частотами генерации около 2,6 и 3,2 ТГц. Продемонстрирована перестройка последних на 5,4 ГГц для лазера на 2,6 ТГц в интервале температур от 8 до 86 К и на 2,7 ГГц для лазера на 3,2 ТГц в интервале температур от 10 до 60 К, которая вызвана в основном изменением с температурой эффективного показателя преломления активной области. Впервые для лазера с конструкцией активной области, основанной на быстрой откачке носителей с нижнего рабочего уровня за счёт рассеяния на фононах, была продемонстрирована перестройка частоты генерации на 420 МГц за время импульса излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smye S. W., Chamberlain J. M., Fitzgerald A. J., Berry E. // *Phys. Med. Biol.* 2001. V. 46. P. R101.
2. Betz L., Boreiko R. T. // *Opt. Lett.* 2005. V. 30, No. 14. P. 1837.
3. Rabanus D., Graf U. U., Philipp M., et al. // *Opt. Express.* 2009. V. 17. P. 1159.
4. Hensley J. M., Montoya J., Allen M. G., et al. // *Opt. Express.* 2009. V. 17. P. 20476.
5. Kumar S., Williams B. S., Kohen S., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 84. P. 2494.
6. Иконников А. В., Антонов А. В., Ластовкин А. А. и др. // *Физика и техника полупроводников.* 2010. Т. 44. С. 1514.
7. Tredicucci A. // *Conf. Lasers Electro-Opt. Opt. Soc. Am.*, 2007. Paper FH2-1.
8. Richter H., Pavlov S. G., Semenov A. D., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. Art. no. 071112.
9. Blakemore J. S. // *Appl. Phys.* 1982. V. 53, No. 10. P. R123.
10. Cetas T. C., Swenson C. A., Tilfor C. R. // *Phys. Rev. Ser. 2.* 1968. V. 174. P. 835.
11. Carlson R. O., Slack G. A., Silverman S. J. // *J. Appl. Phys.* 1965. V. 36. P. 505.

12. Williams B. S., Kumar S., Hu Q., Reno J. L. // Opt. Express. 2005. V. 13. P. 3331.

Поступила в редакцию 6 июня 2011 г.; принята в печать 2011 г.

STUDYING THE FREQUENCY SHIFT OF PULSED TERAHERTZ QUANTUM CASCADE LASERS

A. A. Lastovkin, A. V. Ikonnikov, V. I. Gavrilenko, A. V. Antonov, and Yu. G. Sadof'ev

Emission spectra of pulsed quantum cascade lasers operated at about 2.6 and 3.2 THz have been studied using the Fourier-transform technique. Tuning of the laser emission frequency by 5.4 GHz in a temperature variation range of 8 to 86 K for the 2.6 THz laser and by 2.7 GHz in a range of 10 to 60 K for the 3.2 THz laser, resulting mainly from the temperature dependence of the effective refractive index of the active region, has been demonstrated. A frequency shift by 420 MHz during the emission pulse was shown for the first time in a laser with the active region based on fast removal of the carriers from the lower operating level due to the phonon scattering.