

# Исследование спектров излучения импульсных квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона с высоким спектральным разрешением

© А.В. Иконников<sup>¶</sup>, А.В. Антонов, А.А. Ластовкин, В.И. Гавриленко,  
Ю.Г. Садофьев\*, N. Samal\*

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

\* Trion Technology,  
AZ 85281 Tempe, USA

(Получена 8 апреля 2010 г. Принята к печати 8 апреля 2010 г.)

Исследованы спектры импульсных квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона с высоким спектральным разрешением. Характерная ширина линии на полувысоте составила  $0.01 \text{ см}^{-1}$ , она определяется изменением температуры лазера за время импульса питающего напряжения. Показано, что увеличение температуры лазера приводит к уменьшению частоты излучения, что вызвано увеличением эффективного показателя преломления активной области. Также обнаружено, что уменьшение питающего напряжения приводит к уменьшению частоты излучения, что связано с изменением энергии диагональных переходов между рабочими уровнями лазера.

## 1. Введение

Одними из наиболее перспективных источников терагерцового излучения являются квантовые каскадные лазеры (ККЛ). Основные их достоинства заключаются в компактности и возможности работы в широком спектральном диапазоне. Однако до сих пор не реализована работа таких лазеров в терагерцовом диапазоне при комнатной температуре. Наибольшие достигнутые рабочие температуры составляют 117 К в непрерывном режиме [1] и 186 К при импульсной накачке [2] (без использования сильного магнитного поля). Поэтому всестороннее детальное исследование таких ККЛ с различными параметрами по-прежнему является актуальным.

Одно из применений ККЛ видится в их использовании для спектроскопии газов. Для таких задач необходимо, чтобы излучение лазера было монохроматическим с очень малой спектральной шириной линии. Недавно было показано [3], что, используя метод фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), удастся добиться ширины линии  $\sim 100 \text{ кГц}$  для лазера, излучающего на частоте  $\sim 3 \text{ ТГц}$  в непрерывном режиме.

В предыдущих наших работах [4,5] исследовались различные характеристики импульсных ККЛ терагерцового диапазона, в частности вольт-амперные характеристики (ВАХ) лазеров и их изменение с температурой, зависимости интегрального излучения от приложенного напряжения и их изменение с температурой, а также спектры излучения. Однако в этих работах спектры измерялись с разрешением  $0.2 \text{ см}^{-1}$ , что не позволило определить собственную спектральную ширину линии лазера. В данной работе спектры излучения ККЛ измерялись с разрешением до  $0.007 \text{ см}^{-1}$ .

## 2. Исследуемые структуры

Исследуемые ККЛ, изготовленные фирмой „Trion Technology“ (г. Темпе, Аризона, США), были выполнены в виде полосковой мезоструктуры с характерными шириной  $\sim 100 \text{ мкм}$  и длиной 1–1.5 мм. Архитектура структур соответствовала описанной в работе [6], инверсия населенности достигалась за счет туннелирования электронов из инжектора на верхний рабочий уровень и опустошения нижнего рабочего уровня вследствие резонансного рассеяния с испусканием оптических фононов. Для уменьшения потерь ККЛ помещался в двойной металлический полосковый волновод. Структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs. Активная область структуры ККЛ состоит из повторяющихся (около 200 периодов) наборов из трех квантовых ям (КЯ) GaAs, разделенных барьерами  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ . Центральная часть самой широкой квантовой ямы в каждом периоде, в которой происходит испускание оптических фононов, легировалась донорной примесью с концентрацией  $3.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Рост структуры начинался с буферного слоя GaAs, далее выращивался слой AlGaAs с высоким содержанием Al, который в дальнейшем использовался при создании двойного металлического полоскового волновода в качестве стоп-слоя при травлении подложки. После завершения роста структуры ККЛ на поверхность последовательно термически напылялись слои металлов Ta/Ni/Sn/Au. Выращенную структуру помещали на проводящую подложку-носитель из GaAs, на поверхность которой были нанесены такие же металлические слои, и срачивали методом термокомпрессионного сжатия. Затем исходную подложку травлили до стоп-слоя и сверху наносили аналогичную последовательность металлических слоев. В результате структура толщиной  $\sim 10 \text{ мкм}$  оказывалась ограниченной двумя металли-

<sup>¶</sup> E-mail: antikon@ipm.sci-nnov.ru

ческими слоями, являющимися обкладками полоскового волновода. Далее методом фотолитографии формировались полоски шириной  $\sim 100$  мкм и выкалывались лазерные чипы, при этом зеркала резонатора были образованы сколами в кристаллографическом направлении [110]. Лазеры монтировались на медный хладопровод, являющийся нижним контактом к структуре. В данной работе исследовались два ККЛ (#1 и #2), изготовленные из двух схожих структур и излучающие в области 3 ТГц.

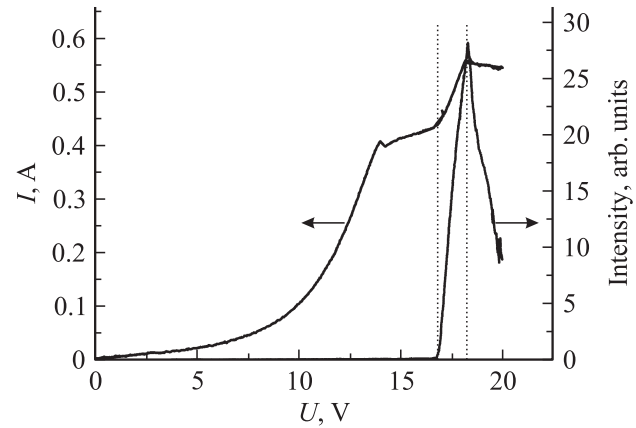
### 3. Методика измерений

Измерения проводились при температурах  $T = 8-25$  К, лазер размещался в вакууме на медном хладопроводе в гелиевом криостате замкнутого цикла „Displex DE-202S“. Блок управления температурой криостата замкнутого цикла позволял выставлять и поддерживать автоматически заданную температуру и контролировать ее с помощью термодатчика, расположенного на хладопроводе. Измерения проводились в импульсном режиме. Для питания лазеров использовался электронный ключ, позволяющий получать импульсы с заданной длительностью (1–10 мкс), скважностью (10–100) и амплитудой, а также измерять напряжение и ток, проходящий через лазер. Для измерения амплитуды импульсов (напряжения, тока, сигнала излучения) использовался двухканальный строб-интегратор (бокскар) фирмы Stanford Research Systems.

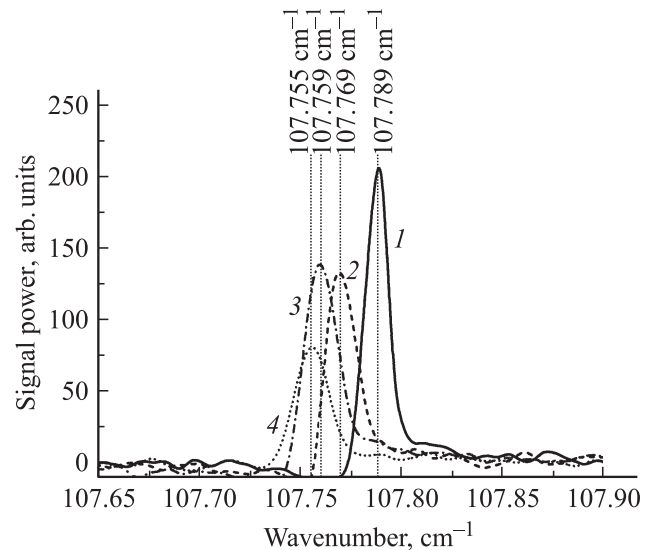
Для измерения спектров излучения использовался фурье-спектрометр высокого разрешения (до  $0.003$  см $^{-1}$ ) BOMEM DA3.36. Поскольку данный спектрометр не способен работать в режиме пошагового сканирования, использовалась следующая схема эксперимента. Терагерцовое излучение лазера проходило через спектрометр и через волновод попадало на примесный фотоприемник Ge:Ga, который располагался в жидком гелии в транспортном сосуде Дьюара. Сигнал с приемника усиливался, а затем проходил через полосовой фильтр с верхней граничной частотой 500 Гц. В результате этого импульсный сигнал с приемника сглаживался, и его изменение на выходе фильтра определялось лишь перемещением зеркала интерферометра фурье-спектрометра. Спектры снимались с таким разрешением, при котором наблюдаемая ширина спектральной линии переставала зависеть от разрешения спектрометра.

### 4. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны ВАХ  $I(U)$  и зависимость интегрального излучения от приложенного напряжения  $U$  для лазера #1. Как видно из рисунка, диапазон рабочих напряжений лазера лежит от 16.7 до 18.2 В (при  $U > 18.2$  на осциллограммах напряжения и тока наблюдались высокочастотные неустойчивости и мощность лазера резко падала). Это соответствует рабочим токам



**Рис. 1.** Вольт-амперная характеристика  $I(U)$  и зависимость интегрального излучения от приложенного напряжения для лазера #1 при  $T = 8$  К. Пунктирными линиями показан диапазон рабочих напряжений лазера.



**Рис. 2.** Спектры излучения ККЛ #1 при различных температурах, скважности 20 при длительности импульсов  $\tau = 2$  мкс ( $1$ ) и скважности 10 при  $\tau = 10$  мкс ( $2-4$ ).  $1$  —  $T = 8$  К, разрешение  $0.007$  см $^{-1}$ , FWHM =  $0.013$  см $^{-1}$ ;  $2$  —  $T = 8$  К, разрешение  $0.008$  см $^{-1}$ , FWHM =  $0.017$  см $^{-1}$ ;  $3$  —  $T = 20$  К, разрешение  $0.01$  см $^{-1}$ ;  $4$  —  $T = 25$  К, разрешение  $0.01$  см $^{-1}$ .

$I = 0.43-0.56$  А. При исследованиях спектров лазера мы всегда, если это не оговаривается отдельно, выбирали рабочую точку в максимуме ВАХ, непосредственно перед появлением неустойчивостей.

На рис. 2 представлены спектры излучения ККЛ #1, снятые при различных температурах хладопровода и различной скважности. Рассмотрим вначале зависимость положения линии от температуры хладопровода  $T$ . Как видно из рис. 2, при увеличении температуры хладопровода максимум спектральной линии излучения смещается в сторону меньших энергий, причем смещение

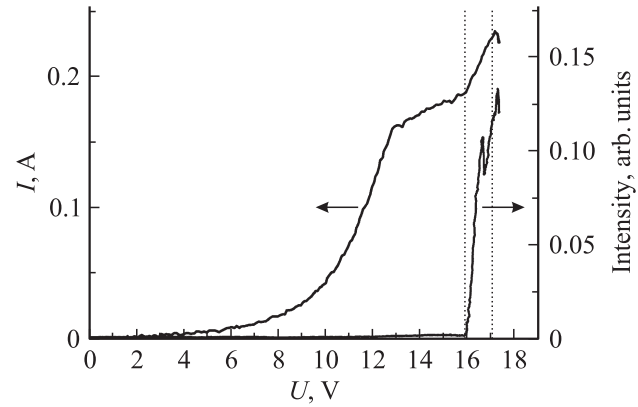
частоты  $\Delta f$  оказывается прямо пропорциональным изменению температуры хладопровода  $\Delta T$ :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f}{\Delta T} &= \frac{107.755 - 107.769}{25 - 8} \text{ см}^{-1}/\text{К} \\ &= -8.2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}/\text{К} = -24.6 \text{ МГц}/\text{К}, \\ \frac{1}{f} \frac{\Delta f}{\Delta T} &= 7.6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}. \end{aligned}$$

Уменьшение частоты излучения лазера с ростом температуры хладопровода наблюдалось в ряде других работ, в частности в работах [3,7]. В работе [3] в диапазоне температур 52–59 К (температуры были ограничены имеющимся в их распоряжении криостатом) также наблюдался линейный сдвиг частоты излучения при изменении температуры для лазера с частотой излучения 3 ТГц. Однако величины коэффициентов были на порядок больше:  $\Delta f/\Delta T = -202 \text{ МГц}/\text{К}$ ,  $f^{-1}\Delta f/\Delta T = 6.61 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ . В работе [7] для лазера на 1.5 ТГц в диапазоне температур 21.2–28.8 К наблюдалась нелинейная зависимость сдвига частоты излучения при изменении температуры (с ростом температуры частота также уменьшалась) (см. рис. 6 из работы [7]). На участке  $T = 21\text{--}25 \text{ К}$  средний коэффициент  $f^{-1}\Delta f/\Delta T$  составил  $5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ , что близко к значению, полученному для нашего лазера #1. Как можно видеть из этого рисунка, при дальнейшем повышении температуры величина  $\Delta f/\Delta T$  возрастает, что, по-видимому, и объясняет расхождение наших результатов с данными, полученными в работе [3] при более высоких температурах.

При увеличении скважности в 2 раза и уменьшении длительности импульса в 5 раз (при температуре хладопровода 8 К) (см. рис. 2) частота излучения лазера увеличилась на  $0.02 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует 600 МГц. В соответствии с определенным коэффициентом перестройки  $\Delta f/\Delta T = 24.6 \text{ МГц}/\text{К}$  получается, что температура лазера изменилась на 24 К. Даже если предположить, что для линии, снятой при скважности 20 (кривая 1), температура лазера составляет 8 К, то для линии, снятой при скважности 10 (кривая 2), температура лазера должна составлять минимум  $T_{10} = 32 \text{ К}$ . В этом случае такой параметр, как температура хладопровода, оказывается неким абстрактным параметром, по которому можно оценивать лишь минимальную температуру лазера. Тем не менее мы считаем, что коэффициент  $\Delta f/\Delta T$  соответствует реальным значениям в нашем диапазоне температур, поскольку, во-первых, изменение  $\Delta T$  оказывается не очень большим по сравнению с  $T_{10}$ , а во-вторых, сдвиг частоты оказался в нашем случае пропорциональным изменению температуры.

Измерив ширину линии на полувысоте (FWHM) для этих двух спектральных линий, мы получили значение при скважности 20  $\text{FWHM}_{20} = 0.013 \text{ см}^{-1} = 390 \text{ МГц}$ , при скважности 10  $\text{FWHM}_{10} = 0.017 \text{ см}^{-1} = 500 \text{ МГц}$ . Известно, что „естественная“ ширина линии лазера не превышает 100 кГц [3].

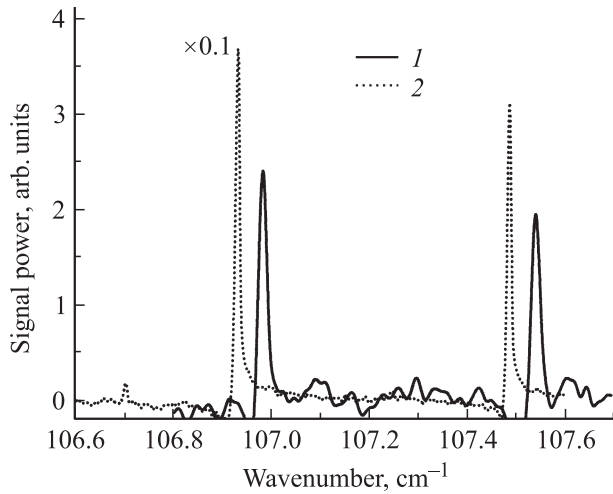


**Рис. 3.** Вольт-амперная характеристика  $I(U)$  и зависимость интегрального излучения от приложенного напряжения для лазера #2 при  $T = 8 \text{ К}$ . Пунктирными линиями показан диапазон рабочих напряжений лазера.

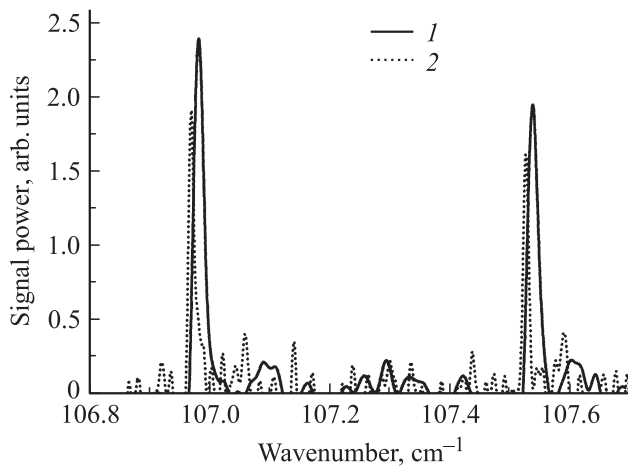
Поэтому очевидно, что за время импульса частота лазера меняется со временем, что и приводит к большой ширине линии. Частота лазера определяется модами резонатора Фабри–Перо:  $f = mc/2nL$ , где  $m$  — номер моды,  $n$  — эффективный показатель преломления,  $L$  — длина резонатора. Изменение температуры может приводить к изменению как показателя преломления, так и длины резонатора. В работе [3] было показано, что определяющим является изменение показателя преломления: для лазера из работы [3] коэффициент теплового расширения составляет  $(1/L)(dL/dT) = 0.16 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ , в то время как  $(1/n)(dn/dT) = 6.17 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ .

Как уже отмечалось, уменьшение длительности импульса привело к сужению линии (рис. 2). В соответствии с определенным коэффициентом перестройки частоты от температуры  $\Delta f/\Delta T$  можно оценить, насколько нагревается лазер за время импульса  $\tau$ . Для линии, соответствующей  $\tau = 10 \text{ мкс}$ ,  $\Delta T$  составляет  $\sim 20 \text{ К}$ , в то время как для линии, соответствующей  $\tau = 2 \text{ мкс}$ ,  $\Delta T \approx 15.8 \text{ К}$ . Видно, что уменьшение длительности импульса лазера в 5 раз не приводит к такому же значительному сужению линии. Это связано с тем, что основное повышение температуры лазера происходит в начале импульса. Теплота, выделяемая в лазере, отводится достаточно медленно (этим объясняется необходимость работы при достаточно больших скважностях импульсов), поэтому в грубом приближении можно считать, что нагрев лазера в первый момент происходит адиабатически. В этом случае теплоемкость есть  $C_V \propto T^3$ , количество выделившегося тепла  $Q \propto \int_0^T T^3 dT \propto T^4$ . С другой стороны,  $Q = P\tau$ , где  $P$  — мощность, выделяемая в лазере,  $\tau$  — время импульса. Таким образом, при заданной мощности  $T \propto \sqrt[4]{\tau}$ .

На рис. 3 показаны ВАХ  $I(U)$  и зависимость интегрального излучения от приложенного напряжения для лазера #2. Как видно из рисунка, основные наблю-



**Рис. 4.** Спектры излучения ККЛ #2 при  $T = 8$  К, длительности импульсов  $\tau = 1$  мкс, скважности 100 (1) и 10 (2). 1 — разрешение спектрометра  $0.01 \text{ см}^{-1}$ , FWHM =  $0.019 \text{ см}^{-1}$  (левый пик) и  $0.020 \text{ см}^{-1}$  (правый пик), 2 — разрешение спектрометра  $0.007 \text{ см}^{-1}$ , FWHM =  $0.010 \text{ см}^{-1}$  (левый пик) и  $0.009 \text{ см}^{-1}$  (правый пик).



**Рис. 5.** Спектры излучения ККЛ #2 при  $T = 8$  К, длительности импульсов  $\tau = 1$  мкс, скважности 100, разрешении спектрометра  $0.01 \text{ см}^{-1}$ , напряжения на лазере 17 В (1) и 16.5 В (2). 1 — FWHM =  $0.019 \text{ см}^{-1}$  (левый пик) и  $0.020 \text{ см}^{-1}$  (правый пик); 2 — FWHM =  $0.011 \text{ см}^{-1}$  (левый пик) и  $0.010 \text{ см}^{-1}$  (правый пик).

даемые особенности оказались такими же, как и для лазера #1 (рис. 1). Диапазон рабочих напряжений лазера лежит от 15.9 до 17.1 В, что соответствует рабочим токам  $I = 0.19\text{--}0.23$  А.

На рис. 4 представлены спектры излучения ККЛ #2, снятые при различной скважности. Как видно из рисунка, данный лазер излучал на двух модах, дальнейшие рассуждения справедливы для обеих из них. Во-первых, уменьшение скважности в 10 раз привело к тому, что линии сдвинулись в сторону меньших частот на  $0.052 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует 1560 МГц. Очевидно, что уменьшение

скважности в 10 раз привело к значительному возрастанию „средней“ температуры лазера (лазер не успевает остыть до температуры хладопровода за время между импульсами). Во-вторых, уменьшение скважности привело к сужению (!) спектральных линий в 2 раза (ширина линии при скважности  $100 \text{ FWHW}_{100} \approx 0.02 \text{ см}^{-1}$ , при скважности  $10 \text{ FWHW}_{10} \approx 0.01 \text{ см}^{-1}$ ). По-видимому, это также связано с увеличением средней температуры лазера. Увеличение температуры привело к увеличению теплоемкости лазера, что, в свою очередь, — к меньшему изменению температуры за время импульса и соответственно более узким линиям.

Зависимость частоты излучения лазера #2 от напряжения показана на рис. 5. Как видно из рисунка, уменьшение напряжения приводит к сужению линий, что связано, очевидно, с уменьшением мощности, выделяемой в лазере, и уменьшением разогрева лазера во время импульса. Вместе с тем уменьшение напряжения приводит также к уменьшению энергии излучения, в то время как уменьшение температуры должно приводить к сдвигу линии в сторону больших энергий. По всей видимости, мы имеем дело с двумя конкурирующими процессами: уменьшением разогрева и средней температуры лазера, что сдвигает линию вправо, и изменением энергии излучения за счет изменения профиля зоны проводимости,<sup>1</sup> что сдвигает линию влево. Соответственно в нашей ситуации второй процесс оказывается преобладающим, что и приводит в итоге к уменьшению частоты лазера с уменьшением питающего напряжения. За счет данного эффекта можно управлять частотой лазера с помощью питающего напряжения, что позволит легко ввести обратную связь при использовании ФАПЧ. В дальнейшем мы предполагаем для исследований спектров излучения ККЛ с более высоким спектральным разрешением использовать гетеродинный приемник с гармоническим смесителем на основе полупроводниковой сверхрешетки и лампы обратной волны в качестве гетеродина.

## 5. Заключение

Таким образом, в настоящей работе исследованы спектры излучения импульсных квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона с высоким спектральным разрешением. Обнаружен эффект уменьшения частоты излучения лазера с ростом температуры хладопровода или уменьшением скважности питающего напряжения, что вызвано увеличением эффективного показателя преломления активной области с ростом температуры лазера. Показано, что ширина линии в спектре излучения лазера определяется изменением температуры лазера за

<sup>1</sup> В нашем лазере, структура которого аналогична представленной в работе [6], рабочими переходами по сути являются переходы между уровнями из соседних квантовых ям. Соответственно изменение внешнего электрического поля на величину  $\Delta E$  приводит к изменению расстояния между уровнями на величину порядка  $e\Delta E d$ , где  $d$  — толщина барьера, разделяющего ямы.

время импульса питающего напряжения, причем основной рост температуры происходит в начале импульса. Также обнаружен эффект перестройки частоты лазера с изменением питающего напряжения: уменьшение напряжения приводит к уменьшению частоты излучения, что связано с изменением энергии диагональных переходов между рабочими уровнями лазера.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 08-02-00962), РАН и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы (ГЦ № П1211).

## Список литературы

- [1] B.S. Williams, S. Kumar, Q. Hu. *Opt. Express*, **13**, 3331 (2005).
- [2] S. Kumar, Q. Hu, J.L. Reno. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 131 105 (2009).
- [3] A.L. Betz, R.T. Boreiko, B.S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, J.L. Reno. *Optics Lett.*, **30**, 1837 (2005).
- [4] А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников и др. *Матер. всеросс. симп. „Нанопфизика и наноэлектроника“* (Н. Новгород, 2009) т. 2, с. 378.
- [5] А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, А.В. Иконников, К.В. Маремьянин, А.А. Ластовкин, С.В. Морозов, Д.В. Ушаков, Ю.Г. Садофьев, Н. Самал. *Изв. вузов. Радиофизика*, **52**, 550 (2009).
- [6] H. Luo, S.R. Laframboise, Z.R. Wasilewski, G.C. Aers, H.C. Liu, J.C. Cao. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 041 112 (2007).
- [7] D. Rabanus, U.U. Graf, M. Philipp, O. Ricken, J. Stutzki, B. Vowinkel, M.C. Wiedner, C. Walther, M. Fischer, J. Faist. *Opt. Express*, **17**, 1159 (2009).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## High resolution emission spectra of pulsed terahertz quantum cascade lasers

*A.V. Ikonnikov, A.V. Antonov, A.A. Lastovkin, V.I. Gavrilenko, Yu.G. Sadof'ev\*, N. Samal\**

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

\* Trion Technology,  
AZ 85281 Tempe, USA

**Abstract** The spectra of pulsed terahertz range quantum cascade lasers were measured with high spectral resolution. The typical line width at half maximum was  $0.01 \text{ cm}^{-1}$ , it is determined by laser temperature changing during the pulse. It is shown that an increase in laser temperature leads to a decrease in the emission frequency that is caused by an increase in the effective refractive index of the active region. It was also found that reducing the power voltage reduces the emission frequency, which is associated with the changing of the energy of the diagonal transitions between operation levels of the laser.