

УДК 537.9

СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ КВАНТОВЫХ КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

*А. В. Антонов¹, В. И. Гавриленко¹, А. В. Иконников¹, К. В. Маремьянин¹,
А. А. Ластовкин¹, С. В. Морозов¹, Д. В. Ушаков², Ю. Г. Садофьев³, Н. Самал³*

¹ Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия;

² Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь;

³ «Trion Technology», Tempe, Arizona, USA

Рассчитаны энергетические уровни, волновые функции и энергии излучательных переходов в квантовых каскадных лазерах терагерцового диапазона на гетероструктурах GaAs/Al_{0,15}Ga_{0,85}As. Измерены вольт-амперные характеристики и токовые зависимости интенсивности излучения лазеров, определены максимальные рабочие температуры, достигающие 85 К. Измерены спектры излучения квантовых каскадных лазеров при различных температурах, обнаружен эффект «перекачки» интенсивности из низкочастотных в высокочастотные моды при росте тока и времени задержки выборки сигнала, что объясняется разогревом образца в течение импульса тока. Продемонстрировано использование лазеров для регистрации сигнала примесной фотопроводимости в полупроводниковых гетероструктурах.

ВВЕДЕНИЕ

Квантовые каскадные лазеры являются компактными эффективными полупроводниковыми источниками излучения в среднем инфракрасном и терагерцовом диапазонах. В среднем инфракрасном диапазоне эти приборы могут работать в непрерывном режиме при комнатной температуре, причём мощность излучения может превышать 1 Вт [1]. В терагерцовой области частот наибольшие достигнутые рабочие температуры составляют 117 К в непрерывном режиме [2] и 178 К при импульсной накачке [3]. Мощность излучения квантового каскадного лазера в диапазоне частот 3÷4,5 ТГц достигает 100 мВт, однако при продвижении от 3 к 1 ТГц выходная мощность и рабочая температура существенно снижаются, что связано с различными физическими ограничениями. Со стороны высоких частот рабочий диапазон терагерцовых квантовых каскадных лазеров ограничен полосой остаточных лучей в GaAs-материале, на основе которого в настоящее время изготавливаются все известные квантовые каскадные лазеры этого диапазона. Поэтому разностороннее детальное исследование подобных структур с различными параметрами по-прежнему является актуальным.

Настоящая работа посвящена теоретическому расчёту волновых функций и энергий переходов квантово-каскадных структур, а также детальному исследованию вольт-амперных характеристик (ВАХ), спектров и токовых зависимостей интенсивности излучения квантовых каскадных лазеров терагерцового диапазона. Показана возможность применения этих лазеров для спектроскопии мелких примесей в полупроводниковых наноструктурах.

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ СТРУКТУРЫ

Исследовались квантовые каскадные лазеры, изготовленные фирмой «Trion Technology» (г. Темпе, Аризона, США). Дизайн структур соответствовал описанному в работе [4], инверсия населённости достигалась за счёт туннелирования электронов из инжектора на верхний рабочий уровень и опустошения нижнего рабочего уровня за счёт испускания оптических фононов.

Структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs(001) и состояли из повторяющихся (около 180 периодов) наборов из четырёх квантовых ям GaAs, разделённых барьерами $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$. Самая широкая квантовая яма в каждом периоде, в которой происходит испускание оптических фононов, легировалась с концентрацией $n = 1,9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для уменьшения потерь структуру с толщиной около 10 мкм помещали в двойной металлический волновод с шириной около 100 мкм и длиной $1 \div 2$ мм, зеркала резонатора были образованы сколами в кристаллографическом направлении (110). Лазеры монтировались на медный хладопровод, являющийся нижним контактом к структуре. В настоящей работе исследовались структуры двух типов с различающимися параметрами, излучающие в области 3 и 4,3 ТГц соответственно.

2. РАСЧЁТ

Процедура численного расчёта энергетических спектров и оптических переходов квантового каскадного лазера включала в себя следующие этапы: определение уровней энергии и волновых функций, расчёт матричных элементов дипольных переходов, вычисление скоростей рассеяния на оптических фононах и электрон-электронного рассеяния, определение поверхностных концентраций носителей заряда и квазиуровней Ферми, соответствующих энергетическим подзонам, из системы замкнутых балансных уравнений [5] и расчёт спектров усиления [6]. Вычисления зонной диаграммы, уровней энергии и волновых функций проводились путём численного решения уравнения Шрёдингера на основе метода передаточной матрицы в расширенной модели Бастарда с учётом координатной и энергетической зависимости эффективной массы электронов [7]. При этом высота потенциальных барьеров в зоне проводимости полагалась равной $\Delta E_c = 0,118 \text{ эВ}$, а рассчитанные значения эффективных масс носителей заряда составляли $m^* = 0,075m_0$ для барьерных слоёв $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ и $m^* = 0,067m_0$ для квантовых ям GaAs, где m_0 — масса электрона.

На рис. 1а представлены результаты расчёта энергетического спектра $E_c(z)$ в зоне проводимости и квадраты модулей волновых функций электронов, рассчитанные для двух каскадов в электрическом поле, близком к оптимальному для работы лазера, а на рис. 1б — спектры усиления для 5-ти различных значений напряжённости поля. Толщины слоёв GaAs/AlGaAs в периоде слева направо, начиная с широкой квантовой ямы составляют 16,09; 3,66; 9,36; 4,78; 8,20; 2,62; 6,79 и 4,25 нм. Инжекция носителей осуществляется на верхние рабочие уровни $(N-1)$ -го каска-

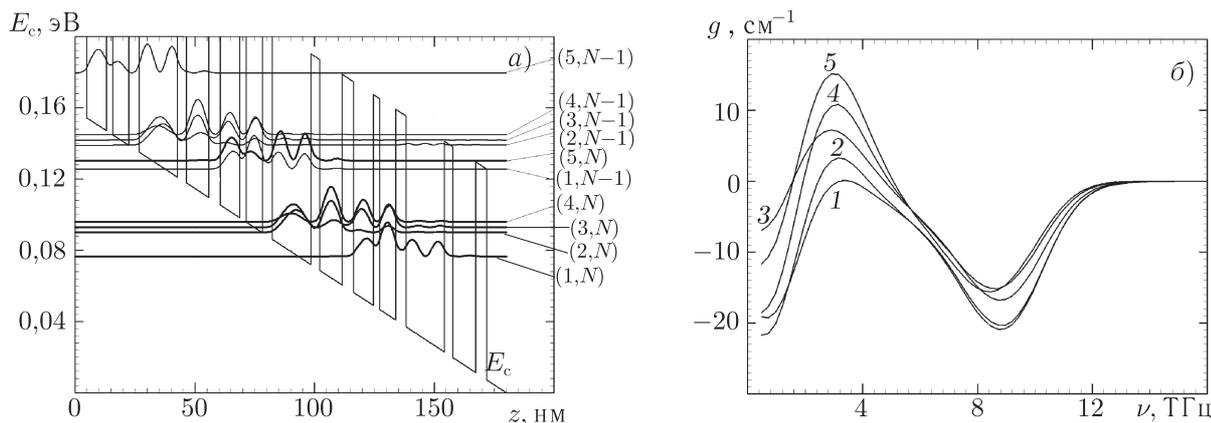


Рис. 1. Результаты расчётов квантового каскадного лазера диапазона 3 ТГц: (а) диаграмма зоны проводимости $E_c(z)$ и квадраты модулей волновых функций электронов квантовой каскадной структуры, находящейся в электрическом поле $E = 8,8 \cdot 10^5 \text{ В/м}$; (б) спектры усиления при различных значениях напряжённости электрического поля: $E = 8,0 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ (кривая 1), $8,2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ (кривая 2), $8,4 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ (кривая 3), $8,6 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ (кривая 4) и $8,8 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ (кривая 5)

да $(3, N - 1)$ и $(2, N - 1)$ за счёт туннелирования с уровня $(4, N - 1)$ инжекторной квантовой ямы. Оптические переходы происходят между рабочими уровнями $(3, N - 1)$ и $(5, N)$, а также $(2, N - 1)$ и $(1, N - 1)$. Первой паре уровней соответствуют большие значения матричных элементов переходов: $z_{(3, N - 1), (5, N)} = 4,9$ нм, тогда как $z_{(2, N - 1), (1, N - 1)} = 0,7$ нм. Для обеспечения инверсии населённостей между уровнями зонная схема каскада подобрана таким образом, что энергетический зазор между уровнями $(5, N)$ и $(4, N)$ и уровнями $(1, N - 1)$ и $(3, N)$ близок к энергии продольного оптического фонона в GaAs. Как видно из рис. 1б, при таком дизайне и заданном электрическом поле усиление имеет место на частоте около 3 ТГц, соответствующей расстоянию между рабочими уровнями $(3, N - 1)$ и $(5, N)$, а также $(2, N - 1)$ и $(1, N - 1)$.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения проводились при низких температурах $T = 7 \div 80$ К в импульсном режиме, лазер размещался в вакууме на медном хладопроводе в гелиевом криостате замкнутого цикла «Displex DE-202S». Для измерения амплитуды импульсов (напряжения, тока, сигнала излучения) использовался двухканальный строб-интегратор (бокскар) фирмы «Stanford Research Systems». Излучение лазера детектировалось примесным фотоприёмником Ge:Ga, который располагался в световодном модуле в транспортном сосуде Дьюара. Для записи спектров излучения использовался фурье-спектрометр «Bruker Vertex 80v» в режиме пошагового сканирования. В последнем случае протектированный сигнал излучения с выхода строб-интегратора подавался на аналого-цифровой преобразователь фурье-спектрометра.

Для демонстрации возможности применения лазеров для спектроскопии полупроводников исследовалась примесная фотопроводимость объёмного материала n-GaAs и гетероструктуры p-Ge/GeSi. Терагерцовое излучение лазера с помощью световода направлялось в криостат со сверхпроводящим магнитом, в центре которого располагался исследуемый образец.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) квантового каскадного лазера диапазона 3 ТГц представлены на рис. 2а. Видно, что заметный ток в этом лазере при низких температурах возникает при приложенном напряжении более 4 В, что соответствует выстраиванию уровней, обеспечивающему протекание тока через каскад структуры за счёт инжекции на уровни $(5, N)$ и

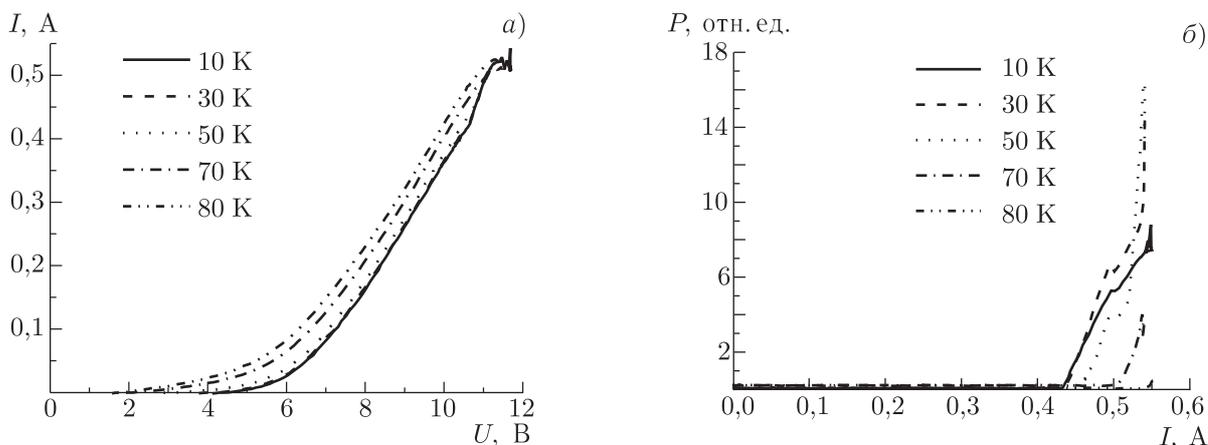


Рис. 2. Измеренные характеристики квантового каскадного лазера диапазона 3 ТГц при различных температурах: (а) ВАХ; (б) токовые зависимости интегральной интенсивности излучения

($1, N - 1$) (см. рис. 1). При повышении температуры до 80 К рост тока начинается уже при приложенном напряжении порядка 2 В, что связано, очевидно, с термической активацией носителей на вышележащие уровни. Начиная с напряжения 6 В при всех температурах начинается участок линейного роста тока, связываемый с протеканием тока через структуру за счёт инжекции на верхний рабочий уровень ($3, N - 1$). Наконец, в конце линейного участка (при напряжении примерно 10 В) при низких температурах наблюдается резкий излом ВАХ, соответствующий возникновению лазерного излучения, что естественно связать с уменьшением времени жизни носителей на верхнем рабочем уровне за счёт стимулированного излучения фотонов. При дальнейшем росте напряжения наблюдается насыщение (и даже некоторый спад) тока, связанное с рассогласованием уровня инжектора и верхнего рабочего уровня ($3, N - 1$).

На рис. 2б представлены зависимости интегральной интенсивности излучения при различных температурах для квантового каскадного лазера диапазона 3 ТГц. При низких температурах лазерное излучение возникало при токе 0,46 А, что как раз соответствует излому на ВАХ (см. рис. 2а). При температурах до 50 К на зависимостях видна особенность при токе порядка 0,5 А, после чего наблюдался участок более быстрого роста интенсивности излучения, что, скорее всего, связано с изменением его модового состава. При достижении максимального значения тока, соответствующего началу области отрицательной дифференциальной проводимости, наблюдалось резкое падение интенсивности излучения. Излучательные характеристики лазера не претерпевали существенных изменений вплоть до температуры 50 К, после чего наблюдалось заметное снижение интенсивности излучения, что связано, в первую очередь, с уменьшением времени жизни электронов на верхнем рабочем уровне за счёт возросшей частоты рассеяния электронов на акустических фононах. Максимальная рабочая температура данного образца лазера составляла около 80 К. Полученные значения критического тока и максимальной температуры вполне сопоставимы с лучшими представленными в литературе величинами для лазеров диапазона 3 ТГц с двойным металлическим волноводом [2].

На рис. 3 представлены спектры излучения для обоих типов исследуемых лазеров. Для лазера диапазона 3 ТГц (рис. 3а) спектры были сняты с предельным разрешением спектрометра $0,2 \text{ см}^{-1}$. Хорошо видно, что при низкой температуре (7 К) и напряжении на лазере 14,6 В в спектре присутствует одна линия с максимумом $99,6 \text{ см}^{-1}$ (2,99 ТГц), что хорошо согласуется с результатами расчёта. При большем напряжении на лазере (14,9 В) при той же температуре в спектре излучения наблюдаются ещё несколько линий, смещённых в область больших энергий.

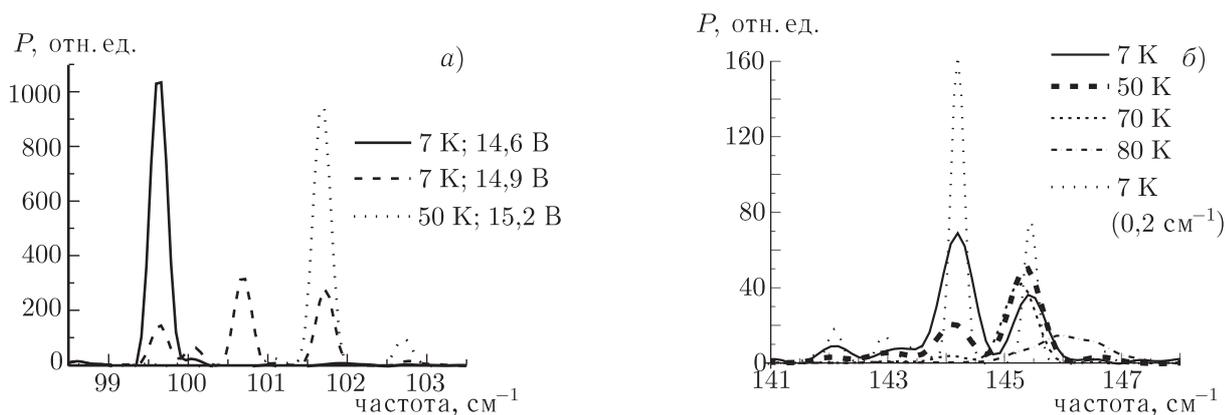


Рис. 3. Спектры излучения квантового каскадного лазера диапазонов 3 ТГц (а) и 4,3 ТГц (б). Для первого лазера спектры измерены с разрешением $0,2 \text{ см}^{-1}$, для второго — с разрешением $0,5 \text{ см}^{-1}$ (кроме последнего спектра). Во втором случае спектры снимались при одном и том же токе через лазер, равном 1,4 А

Наиболее мощные линии расположены эквидистантно, и расстояние между ними соответствует, очевидно, расстоянию между продольными модами резонатора. Мы связываем смещение полосы генерации в коротковолновую область с повышением температуры рабочей области, вызванной увеличением напряжения и тока. Это подтверждается и исследованиями спектров излучения при различных температурах. Как видно из рис. 3а, при температуре 50 К основная линия в спектре также смещается в сторону больших энергий.

Наиболее детально эффект перестройки спектра излучения в высокочастотную область с разогревом прослежен для лазера диапазона 4,3 ТГц. На рис. 3б представлены спектры излучения при различных температурах при одинаковом токе через лазер, равном 1,4 А. Видно, что в спектре излучения присутствуют две основные спектральные линии на частотах вблизи 144 и 145,5 см⁻¹, что соответствует 4,3 ТГц. При увеличении температуры помимо падения интенсивности излучения наблюдается «перекачка» интенсивности из низкочастотной в более высокочастотную моду. Данный эффект можно объяснить как падением усиления, так и возросшим поглощением электромагнитного излучения в лазере на свободных носителях, которое, как известно, растёт пропорционально квадрату длины волны. В совокупности оба фактора приводят к тому, что максимум коэффициента усиления должен сдвигаться в область более высоких частот, что и наблюдается для обоих типов лазеров.

В работе были также получены спектры излучения квантового каскадного лазера диапазона 4,3 ТГц при различных значениях приложенного напряжения и в различные моменты времени импульса излучения лазера (рис. 4а). Первые три кривые получены при напряжении 14,4 В. Первая кривая представляет собой спектр излучения, усреднённый по большей части импульса излучения с длительностью около 10 мкс (что соответствует условию измерения спектров на рис. 3б). Для этого длительность выборки на строб-интеграторе выбиралась почти равной длительности импульса излучения. Второй и третий спектры измерены при в 3 раза меньшей длительности строба, при этом второй спектр соответствует начальному участку импульса излучения, а третий — концу импульса. Хорошо видно, что «интегральный» спектр является, по сути, суперпозицией второго и третьего спектров. Из сопоставления последних видно, что к концу импульса излучения происходит «перекачка» интенсивности из низкочастотной в высокочастотную моду, что может быть связано с разогревом активной области в течение импульса излучения. К подобному же эффекту приводит и увеличение тока через лазер. Второй, четвёртый и пятый спектры измерены в начальный момент импульса излучения при напряжениях на лазере 14,4, 15,3 и 15,8 В соответственно. Видно, что с ростом напряжения происходит последовательное увеличение интенсивности высокочастотных мод и падение интенсивности низкочастотных мод, что также, скорее всего, связано с разогревом лазера. Другой возможной причиной высокочастотного сдвига спектра при увеличении тока, а значит, и электрического поля в структуре является увеличение расстояния между рабочими уровнями (рис. 1а), «относящимися» к соседним квантовым ямам, за счёт увеличения падения напряжения на разделяющем их барьере. В результате соответственно увеличивается частота рабочего перехода, что приводит к смещению линии усиления и спектра излучения лазера.

Для демонстрации возможности применения лазеров для задач спектроскопии в качестве тестовых структур использовались толстая эпитаксиальная плёнка n-GaAs, а также гетероструктура p-Ge/GeSi #306а (см. [8]). В обоих случаях при развёртке магнитного поля наблюдались резонансы, связанные с переходами между основным и возбуждённым состояниями мелких примесей. Для гетероструктуры p-Ge/GeSi положение обнаруженного пика в районе 5 Тл (рис. 4б) хорошо соответствует наблюдаемому ранее [8] примесному переходу $1s \rightarrow 2p^+$ для мелких акцепторов в центре квантовой ямы Ge.

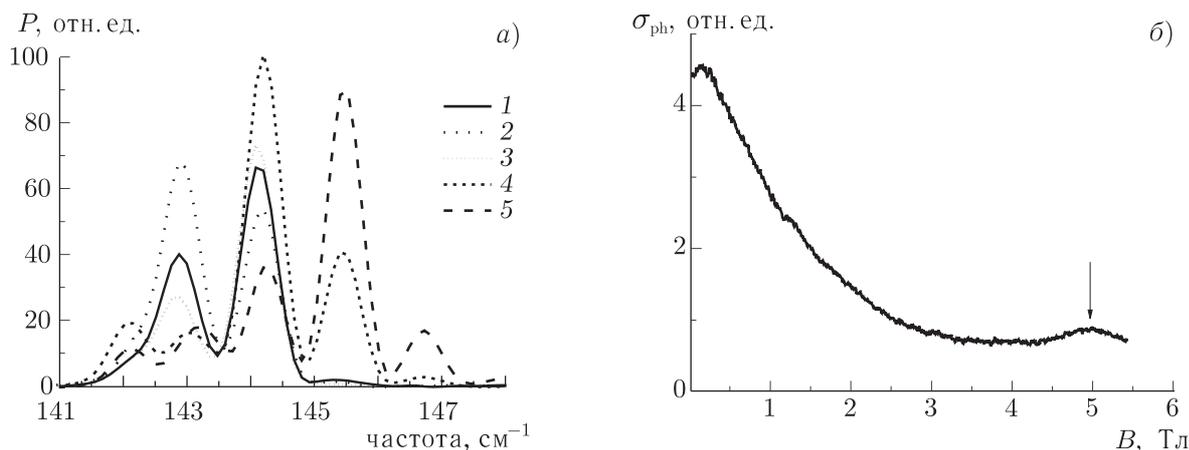


Рис. 4. (а) Спектры излучения лазера диапазона 4,3 ТГц, измеренные с разрешением $0,5 \text{ см}^{-1}$ при температуре 7 К и различных положениях (по времени) импульса выборки (строба) относительно импульса излучения для трёх значений приложенного напряжения: кривая 1 соответствует 14,4 В (весь импульс), 2 — 14,4 В (начало импульса), 3 — 14,4 В (конец импульса), 4 — 15,3 В (начало импульса), 5 — 15,8 В (начало импульса). (б) Зависимость примесной фотопроводимости гетероструктуры $p\text{-Ge}/\text{GeSi}$ от магнитного поля, измеренная с помощью квантового каскадного лазера диапазона 3 ТГц

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского и Российского фондов фундаментальных исследований (проекты Ф08Р–119 и 08–02–90054, 08–02–00962) и Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bai Y., Darvish S. R., Slivken S., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. Art. no. 101105.
2. Williams B. S. // *Nature Photonics.* 2007. V. 1. P. 517.
3. Belkin M. A., Fan J. A., Hormoz S., et al. // *Optics Express.* 2008. V. 16. P. 3242.
4. Williams B. S., Callebaut H., Kumar S., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. P. 1015.
5. Ушаков Д. В., Манак И. С. // *Оптика и спектроскопия.* 2008. Т. 104. С. 846.
6. Ушаков Д. В., Манак И. С. // *Журнал прикладной спектроскопии.* 2007. Т. 74. С. 801.
7. Yoo K. H., Ram-Mohan L. R., Nelson D. F. // *Phys. Rev. B.* 1989. V. 39. P. 12808.
8. Гавриленко В. И., Ерофеева И. В., Коротков А. Л. и др. // *Письма ЖЭТФ.* 1997. Т. 65. С. 194.

Поступила в редакцию 4 июня 2009 г.; принята в печать 25 ноября 2009 г.

EMISSION SPECTRA OF TERAHERTZ QUANTUM CASCADE LASERS

A. V. Antonov, V. I. Gavrilenko, A. V. Ikonnikov, K. V. Maremyanin, A. A. Lastovkin, S. V. Morozov, D. V. Ushakov, Yu. G. Sadofyev, N. Samal

Energy levels, wavefunctions and radiative transition energies have been calculated in terahertz quantum cascade lasers based on $\text{GaAs}/\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ heterostructures. Current-voltage and emission-current characteristics of the lasers have been measured and the maximum operating temperatures up to 85 K have been determined. Emission spectra of the quantum cascade lasers have been measured at various temperatures. The effect of emission intensity transfer from the low frequency modes into high frequency ones with the current and the time delay of the signal capture has been discovered

that is explained by the laser heating during the current pulse. The laser. Application of the quantum cascade laser for investigation of impurity photoconductivity in semiconductor heterostructures has been demonstrated.