

Спектры терагерцового усиления квантово-каскадных структур с двумя квантовыми ямами на основе $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}(\text{GaAs})/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$

Д. В. Ушаков^a, Ю. Г. Садофеев^b, N. Samal^b

^a Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; ushakovdv@bsu.by

^b Trion Technology, Tempe, Arizona, USA

Предложена конструкция ККЛ на основе $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}(\text{GaAs})-\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ с двумя КЯ и встроенной узкой КЯ внутри широкой КЯ, позволяющая ввести дополнительные степени свободы для продвижения в область меньших частот ТГц-диапазона. В структуру широкой КЯ $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$ встроена узкая КЯ GaAs. Максимум коэффициента усиления получен на частоте ~ 2.3 ТГц. Варьирование положением узкой КЯ позволяет управлять матричным элементом дипольных переходов для рабочих уровней 3–2.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, две квантовые ямы, 3-х уровневая схема, резонансное туннелирование, фононный резонанс, терагерцовое усиление.

Введение

В последнее время отмечается растущий интерес к изучению межподзонных оптических переходов в ТГц диапазоне в полупроводниковых многопериодных квантово-каскадных структурах. Все реализованные в настоящее время квантово-каскадные лазеры (ККЛ) ТГц диапазона созданы преимущественно на основе структур GaAs/AlGaAs [1–4] с дизайном «резонансное испускание оптического фонона», основанной на быстром опустошении нижнего рабочего уровня за счет резонансного испускания оптического фонона. Обычно полная толщина квантово-размерной части структуры составляет 10 мкм, и количество квантовых ям в структуре превышает 700. При этом отклонение от заданных параметров по толщинам слоев не должно превышать 1% [7]. Единичный каскад прибора может включать в себя 4 [1], 3 [2] или 2 [4] квантовых ямы (КЯ) различной ширины, разделенных туннельно-прозрачными барьерами. Соответственно, приборы работают по 5- [1], 4- [2] и 3-х [4] уровневым схемам. Наибольшие достигнутые рабочие температуры ТГц ККЛ составляют 117 К в непрерывном режиме [3], 186 К при импульсной накачке [5] и 225 К при дополнительном использовании магнитного поля [6]. Мощность излучения ККЛ в диапазоне частот 3–4.5 ТГц достигает 100 мВт, однако, при продвижении от 3 к 1 ТГц выходные мощности снижаются до ~ 10 мВт.

Численный расчет и обсуждение результатов

В настоящей работе исследуются квантово-каскадные структуры $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}(\text{GaAs})/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ с 2 КЯ, работающие по 3-х уровневой схеме. Инверсия населенностей достигается между уровнями 3 и 2 при опустошении уровня 2 за счет резонансного испускания оптического фонона, при этом уровень 3 туннельно связан с уровнем 1' предыдущего каскада [4]. Как показано в работе [4], в таких структурах достигаются большие рабочие температуры.

Значения энергии, волновые функции, матричные элементы дипольных переходов, а также профиль потенциальной энергии находились $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ -методом в расширенной модели Бастиарда [8, 9] на основе решения уравнений Шредингера и Пуассона [10]. Степень заполнения уровней энергии и соответствующие квазиуровни Ферми находились путем численного решения системы балансных уравнений [11]. Коэффициент усиления g для внутриподзонных переходов в зависимости от частоты

света v находился в многоуровневом приближении с учетом несимметричного контура уширения линии излучения [12] с параметром уширения $\gamma = 5$ мэВ.

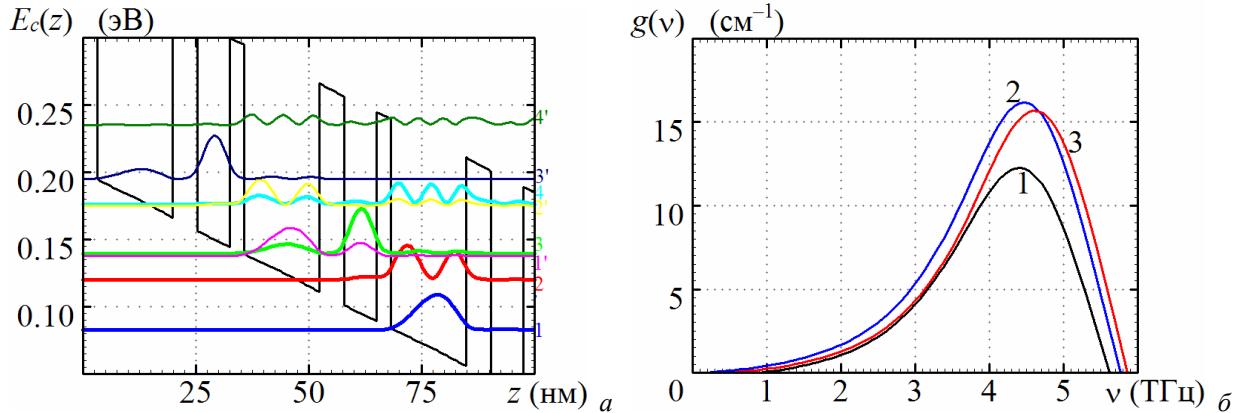


Рис. 1. – (а) Диаграмма зоны проводимости $E_c(z)$ и квадраты модулей волновых функций электронов в электрическом поле $E = 17 \cdot \text{kV}/\text{см}$ и (б) спектры усиления $g(v)$ для различных значений электрического поля $E = 16.9$ (1), 17.0 (2), $17.3 \text{ кВ}/\text{см}$ (3).

Толщины слоев структуры в нанометрах последовательно слева направо имеют следующие значения: 3.1/**16.7**/5.6/7.1. Во всей последовательности слоев квантовые ямы GaAs выделены жирным, а подчеркнутые слои легированы примесями Si с поверхностной концентрацией $2.17 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 1 приведены тестовые расчеты зонной структуры, уровней энергии, волновых функций, а также спектров усиления ККЛ на основе GaAs–Al_{0.15}Ga_{0.85}As, полученной в работе [4]. При вычислениях высота потенциальных барьеров в зоне проводимости полагалась равной $\Delta E_c = 155$ мэВ. Рассчитанные значения эффективных масс носителей тока составляли $m^* = 0.080 m_0$ для барьераных слоев Al_{0.15}Ga_{0.85}As и $m^* = 0.067 m_0$ для квантовых ям GaAs. Как показывают численные расчеты, результаты расчета зонной структуры и спектров усиления хорошо согласуются с экспериментальными данными работы [4]. Рабочая частота составляет 4.6 ТГц, однако продвижение в область меньших частот ограничивается недостаточной возможностью варьирования толщин квантовых ям и барьераных слоев (их всего 4) из-за необходимости одновременного выполнения условий резонансного испускания оптического фона и резонансного туннелирования.

Дополнительные степени свободы можно получить при незначительном изменении молярного состава квантовых ям и введении тонких квантовых ям (~ 2 нм) внутри толстой квантовой ямы [13], что позволяет продвинуться в область меньших частот. На рис. 2 представлены численные самосогласованные расчеты зонной структуры, уровней энергии, волновых функций, а также спектров усиления модифицированных ККЛ на основе Al_{0.02}Ga_{0.98}As(GaAs)–Al_{0.15}Ga_{0.85}As. В структуру широкой КЯ Al_{0.02}Ga_{0.98}As глубиной $\Delta E_c = 132.2$ мэВ встроена узкая КЯ GaAs высотой $\Delta E_c = 22.8$ мэВ. Рассчитанные значения эффективных масс для различных уровней энергии составляют: $m_1 = 0.069 m_0$, $m_2 = 0.070 m_0$, $m_3 = 0.070 m_0$.

Расстояние между уровнями 2–1 составляет 36.5 мэВ, что соответствует энергии полярного оптического фона в GaAs. Максимум коэффициента усиления достигается на частоте ~ 2.3 ТГц при напряженности электрического поля $E = 14.4 \text{ кВ}/\text{см}$. Введение узкой КЯ внутри широкой ямы позволяет уменьшить энергию излучения, центрирует волновую функцию, а также позволяет управлять матричным элементом дипольных переходов между рабочими уровнями 3–2.

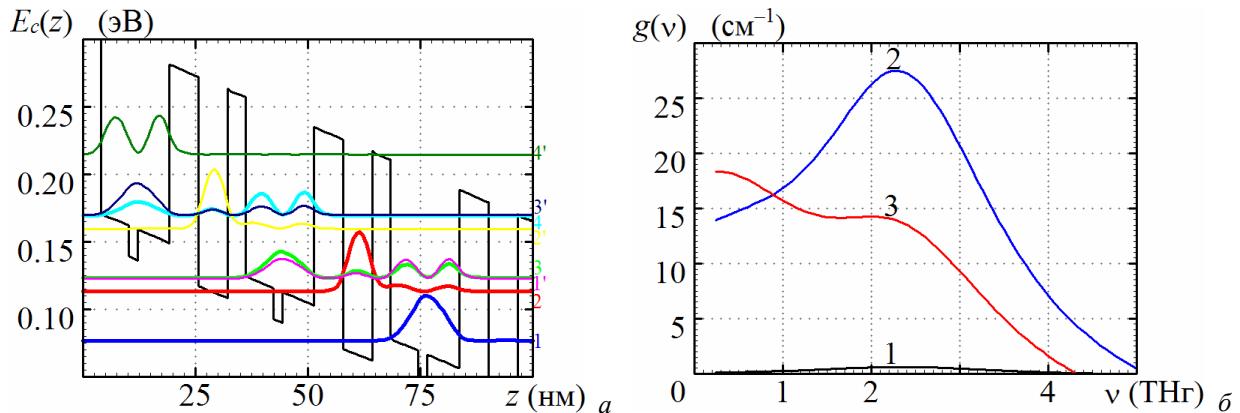


Рис. 2. – (а) Диаграмма зоны проводимости $E_c(z)$ и квадраты модулей волновых функций электронов в электрическом поле $E = 14.4 \text{ кВ/см}$ и (б) спектры усиления $g(v)$ для различных значений электрического поля $E = 14.3$ (1), 14.4 (2), 14.5 кВ/см (3).

Толщины слоев структуры в нанометрах последовательно слева направо имеют следующие значения: /3.955/6.215/1.978/7.063/6.497/6.497. Во всей последовательности слоев квантовые ямы GaAs выделены жирным, а $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$ – жирным курсивом.

Подчеркнутые слои легированы примесями Si с поверхностной концентрацией $2.17 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Так, при фиксированной напряженности электрического поля $E = 14.5 \text{ кВ/см}$ и неизменной толщине широкой квантовой ямы варьирование положением встроенной узкой КЯ шириной $d = 1.978 \text{ нм}$ позволяет получить следующие значения матричных элементов дипольных переходов: $z_{32} = 4.82$ (6.215/1.978/7.063), 5.54 (4.802/1.978/8.475) и 2.94 нм (8.475/1.978/4.802). Отметим, что все толщины слоев ККЛ кратны толщине монослоя (0.2825 нм), что обеспечивает лучшее качество гетерограниц, высокую скорость роста структур и более высокие ожидаемые рабочие температуры [7].

Заключение

Таким образом, предложена конструкция ККЛ на основе $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}(\text{GaAs})-\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ с 2 КЯ и встроенной узкой КЯ внутри широкой КЯ, позволяющая ввести дополнительные степени свободы для продвижения в область меньших частот ТГц-диапазона. В структуру широкой КЯ $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$ встроена узкая КЯ GaAs. Максимум коэффициента усиления получен на частоте $\sim 2.3 \text{ ТГц}$. Варьирование положением узкой КЯ позволяет управлять матричным элементом дипольных переходов для рабочих уровней 3–2.

Благодарности

Работа частично выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по проекту БРФФИ № Ф10Р–091.

Литература

1. B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, J. L. Reno. High-power terahertz quantum-cascade lasers. *Electron. Lett.* 2006. Vol. 42, № 2. P. 89–90.
2. H. Luo, S. R. Laframboise, Z. R. Wasilewski, G. C. Aers, H. C. Liu. Terahertz quantum-cascade lasers based on a three-well active module. *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. P. 041112(1–3).

3. B. S. Williams. Terahertz quantum-cascade lasers. *Nature Photonics*. 2007. Vol. 1. P. 517–525.
4. S. Kumar, C. W. I. Chan, Q. Hu, J. Reno. Two-well terahertz quantum-cascade laser with direct intrawell phonon depopulation. *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 95. P. 141110(1–3).
5. S. Kumar, Q. Hu, J. Reno. 186 K operation of terahertz quantum-cascade lasers based on a diagonal design. *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 94. P. 131105(1–3).
6. A. Wade, G. Fedorov, D. Smirnov, S. Kumar, B. S. Williams, Q. Hu, J. L. Reno. Magnetic-field-assisted terahertz quantum cascade laser operating up to 225 K. *Nature Photonics*. 2009. Vol 3. P. 41–45.
7. Ю. Г. Садофеев. Выращивание структур ТГц ККЛ методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Мат. XV Междунар. Симпоз. "Нанофизика и Наноэлектроника". Т. 1. Нижний Новгород, 2011. С. 244–245.
8. K. H. Yoo, L. R. Ram-Mohan, D. F. Nelson. Effect of nonparabolicity in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs semiconductor quantum wells. *Phys. Rev. B*. 1989. Vol. 39, № 17. P. 12808–12813.
9. C. Sirtori, F. Capasso, J. Faist, S. Scandolo. Nonparabolicity and a sum rule associated with bound-to-bound and bound-to-continuum intersubabnd transitions in quantum wells. *Phys. Rev. B*. 1994. V. 50, № 12. P. 8663–8674.
10. Д. В. Ушаков, И. С. Манак. Энергетические и излучательные характеристики квантово-каскадных структур на сверхрешетках. *Опт. и спектр.* 2008. Т. 104, № 5. С. 847–852.
11. Д. В. Ушаков, И. С. Манак. Двухпериодная модель расчета населенностей уровней подзон многопериодных квантово-каскадных сверхрешеточных структур. *ЖПС*. 2007. Т. 74, № 6. С. 801–804.
12. Д. В. Ушаков, В. К. Кононенко, И. С. Манак. Расчет спектров усиления и люминесценции квантово-каскадных лазерных структур с учетом несимметричных контуров уширения линии излучения. *Квантовая электроника*. 2010. Т. 40, № 3. С. 195–198.
13. Д. И. Крыжков, С. В. Морозов, Д. М. Гапонова, С. М. Сергеев, В. И. Гавриленко, Д. И. Курицын, Ю. Г. Садофеев, N. Samal. Диагностика квантовых каскадных структур оптическими методами в ближнем ИК-диапазоне. Мат. XV Междунар. Симпоз. "Нанофизика и Наноэлектроника". Т. 2. Нижний Новгород, 2011. С. 525–526.

Terahertz gain spectra of the quantum-cascade structures with two quantum wells based on Al_{0.15}Ga_{0.85}As/Al_{0.02}Ga_{0.98}As(GaAs)/Al_{0.15}Ga_{0.85}As

D. V. Ushakov^a, Yu.G. Sadofev^b, N. Samal^b

^a Belarusian State University, Minsk, Belarus; ushakovdv@bsu.by

^b Trion Technology, Tempe, Arizona, USA

QCL design based on Al_{0.02}Ga_{0.98}As(GaAs)–Al_{0.15}Ga_{0.85}As with two QW and built-in narrow quantum wells in the wide QW is proposed, which allows to introduce additional degrees of freedom to move to lower terahertz frequencies. Narrow GaAs QW is built in the structure of the wide Al_{0.02}Ga_{0.98}As QW. Maximum gain is obtained at a frequency of ~ 2.3 THz. Varying the position of the narrow QW allows to control the matrix element of dipole transitions for the working levels 3–2.

Keywords: quantum-cascade laser, two quantum wells, 3-th level scheme, resonant tunneling, the optical phonon resonance, terahertz gain.