

Влияние магнитного поля на спектры усиления и мощность генерации GaAs/AlGaAs ККЛ ТГц диапазона

А. А. Афоненко¹⁾, Д. В. Ушаков¹⁾, Р. А. Хабибуллин²⁾,
А. А. Дубинов³⁾, В. И. Гавриленко³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: ushakovdv@bsu.by

²⁾Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова, Москва, Россия,

³⁾Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

Для GaAs/AlGaAs квантово-каскадного лазера с 4 квантовыми ямами и двойным металлическим волноводом теоретически исследованы спектральные и мощностные характеристики в магнитном поле, приложенном параллельно оси роста. Проведен расчет уровней Ландау для различных магнитных полей. В приближении эффективной плотности состояний рассчитаны скорости электрон-фононного, электрон-примесного рассеяния и рассеяния на шероховатостях гетерограниц. Как показывают расчеты, при увеличении магнитного поля обнаруживаются выраженные осцилляции максимальной рабочей температуры и выходной мощности. Наблюдаемые эффекты связаны с модуляцией населенности лазерных уровней из-за совокупности эффектов межуровневых резонансов Ландау и тушения или зажигания каналов безызлучательной рекомбинации за счет дополнительного квантования Ландау. На зависимостях выходной мощности от температуры установлены изломы, которые объясняются существованием нескольких каналов генерации.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер; терагерцевый диапазон; магнитное поле; усиление; мощность генерации; осцилляции.

Influence of the magnetic field on the gain spectra and lasing power of GaAs/AlGaAs THz QCLs

A. A. Afonenko¹⁾, D. V. Ushakov¹⁾, R. A. Khabibullin²⁾,
A. A. Dubinov³⁾, V. I. Gavrilenko³⁾

¹⁾Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: ushakovdv@bsu.by

²⁾Mokerov Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics, Moscow, Russia,

³⁾Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia

The spectral and power characteristics of a GaAs/AlGaAs quantum cascade laser with 4 quantum wells and a double metal waveguide were theoretically studied in a magnetic field applied parallel to the growth axis. The Landau levels were calculated for various magnetic fields. In the effective density of states approximation, the rates of electron-phonon, electron-impurity scattering, and scattering at heterointerface roughness are calculated. Calculations show that as the magnetic field increases, pronounced oscillations in the maximum operating temperature and output power are detected. The observed effects are associated with modulation of the population of laser levels due to the combination of effects of interlevel Landau resonances and quenching or ignition of non-radiative recombination channels due to additional Landau quantization. There are kinks in the dependences of the output power on temperature, which are explained by the existence of several laser transitions.

Keywords: quantum cascade laser; terahertz range; magnetic field; gain; power; oscillations.

Введение

Реализованные в настоящее время квантово-каскадные лазеры (ККЛ) терагерцевого диапазона (ТГц) преимущественно созданы на основе структур

GaAs/AlGaAs с дизайном «резонансное испускание оптического фонона» и двойным металлическим волноводом ДМВ [1]. Особый интерес представляют исследования характеристик ККЛ под воздействием внешнего магнитного поля [2–5]. Детальное понимание различных процессов рассеяния в структурах с использованием магнитного поля может быть важным фактором для продвижения в субтерагерцевую область частот. Применение внешнего магнитного поля представляет уникальный экспериментальный инструмент для контроля и понимания механизмов квантования и межподзонной релаксации [3, 4]. Магнитное поле можно эффективно использовать для управляемого преобразования двухмерной структуры с несколькими квантовыми ямами в эффективную нульмерную систему с уменьшенными или даже подавленными безызлучательными механизмами рассеяния [3–5]. В работе [4] использование магнитного поля позволило добиться лазерного излучения в диапазоне частот от 0.68 ТГц до 3.33 ТГц и получить рекордную генерацию на частоте 1 ТГц при температуре до 215 К (31 Тл), а на частоте 3 ТГц – до 225 К (19 Тл).

В настоящей работе на основе численного моделирования рассмотрено влияние магнитного поля на спектральные и мощностные характеристики ККЛ ТГц диапазона в структуре с 4 квантовыми ямами в каскаде.

1. Результат численных расчетов

Населенности уровней подзон находились методом балансных уравнений с периодическими граничными условиями [6–8]. Базисные волновые функции находились k p -методом [7–8] с последующим преобразованием специального вида для учета дефазировки [6]. Вероятности переходов рассчитывались с учетом изменения плотности состояний в магнитном поле и учитывали процессы туннелирования, рассеяния на оптических фононах, заряженных примесях и шероховатостях гетерограниц. При этом использовались приближенные матричные элементы взаимодействий, рассчитанные при нулевом магнитном поле для энергий начальных и конечных состояний, соответствующих энергиям уровней Ландау.

На рис. 1 приведены результаты расчета уровней энергии и уровней Ландау в магнитном поле 4 Тл, а также волновых функций и соответствующих спектров усиления для структуры $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ с 4 КЯ, слои которой составляют 3.95/15.8/5.64/7.9/2.26/9.03/2.26/7.9 нм [8, 9]. Центральная часть широкой КЯ легирована примесями со слоевой концентрацией $4.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В одном модуле перенос носителей осуществляется по состояниям следующих уровней: инжектора (i'), верхнего (u), среднего (m), нижнего (l) лазерных уровней и уровня экстрактора (e). По нашим расчетам могут наблюдаться три типа лазерных переходов: $i'-u$ (~3.8 ТГц) и двух последовательных лазерных переходов $u-m$ (~4.4 ТГц), $m-l$ (~3.2 ТГц). Рабочее напряжение на одном каскаде близко к сумме двух энергий излучения и энергии продольного оптического фонона $2 \hbar\omega + \hbar\omega_{\text{LO}}$. Как видно из спектров усиления на рис. 1, б, при напряжении ~68 мэВ, близком к порогу генерации наблюдаются переходы с уровня инжектора на средний лазерный уровень $i'-u$. Хотя матричный элемент дипольных переходов $i'-u$ мал (~1 нм), но за счет большой населенности инжектора, такие переходы возможны. Далее с ростом напряжения, верхний лазерный уровень сравнивается с уровнем инжектора и становятся доминирующими два лазерных перехода $u-m$ и $m-l$, которые отражаются на двух разнесенных пиках на кривых спектров усиления.

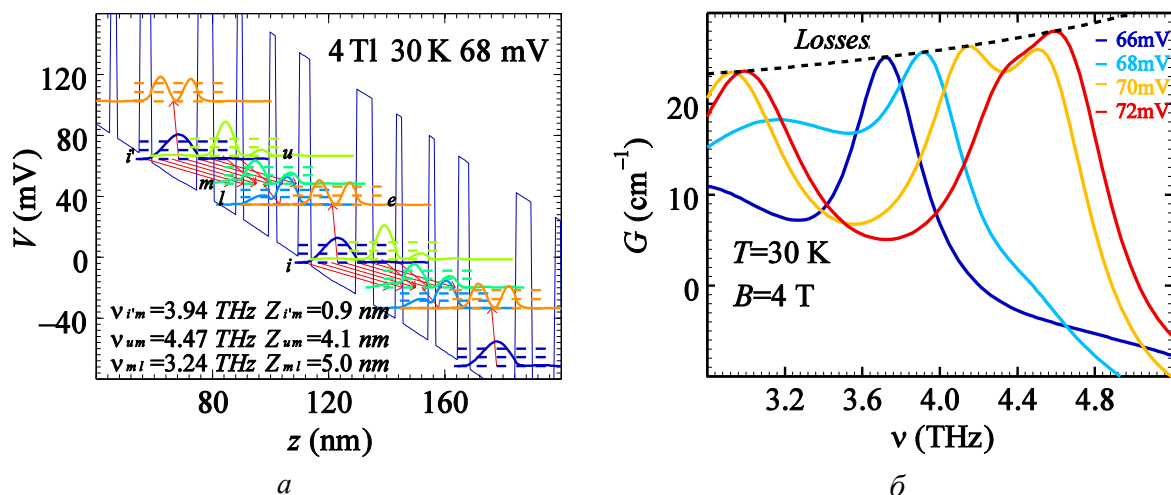


Рис. 1. (а) Диаграмма зоны проводимости и квадраты модулей волновых функций электронов, а также уровни Ландау (штриховые линии), рассчитанные k·p-методом при температуре $T = 30$ К и напряжении в одном модуле 68 мВ, (б) спектры усиления и потерь (штриховая линия) для различных напряжений в одном модуле (числа в мВ справа от кривых)

На рис. 2 приведены температурные зависимости максимального усиления и выходной мощности в режиме генерации для различных значений магнитного поля. Спектры модовых потерь рассчитаны согласно [10] для волновода со следующими параметрами: обкладки Au, слой адгезии Ti толщиной 50 нм, приконтактные n^+ -слои GaAs (70/100 нм, $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), активная область GaAs/AlGaAs (10 мкм, $4.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). Рассчитанная температурная зависимость суммарных потерь в резонаторе позволяет определить точку пересечения спадающего с температурой усиления и растущего коэффициента потерь, которая является теоретически достижимой максимальной рабочей температурой лазера [7]. Как показывают расчеты, с ростом магнитного поля наблюдается не монотонное осциллирующее поведение максимума коэффициента усиления и соответственно максимальной рабочей температуры, которая то растет, то падает. С ростом магнитного поля максимальные рабочие температуры для разных полей составляют: 100 К (0 Тл), 90.3 К (5 Тл), 115.6 К (10 Тл), 83.7 К (15 Тл), 123.2 К (20 Тл) и 164 К (25 Тл). Наблюдаемые осцилляции в магнитном поле, как также показано в работах [3, 4], связаны с модуляцией населенности лазерных уровней из-за совокупности эффектов межуровневых резонансов Ландау и тушения (для верхних лазерных уровней) или зажигания (для нижних лазерных уровней) каналов безызлучательной рекомбинации за счет дополнительного плоскостного квантования. Аналогичное поведение отражается и на мощностных характеристиках. На которых, кроме этого наблюдаются изломы, связанные с конкуренцией различных каналов генерации, связанных с переходами: $i'-u$ (~ 3.8 ТГц), $u-m$ (~ 4.4 ТГц) и $m-l$ (~ 3.2 ТГц).

Таким образом, дополнительное квантовое ограничение, при оптимизации лазерных переходов в магнитном поле, является путем к получению более высоких рабочих температур для ТГц ККЛ.

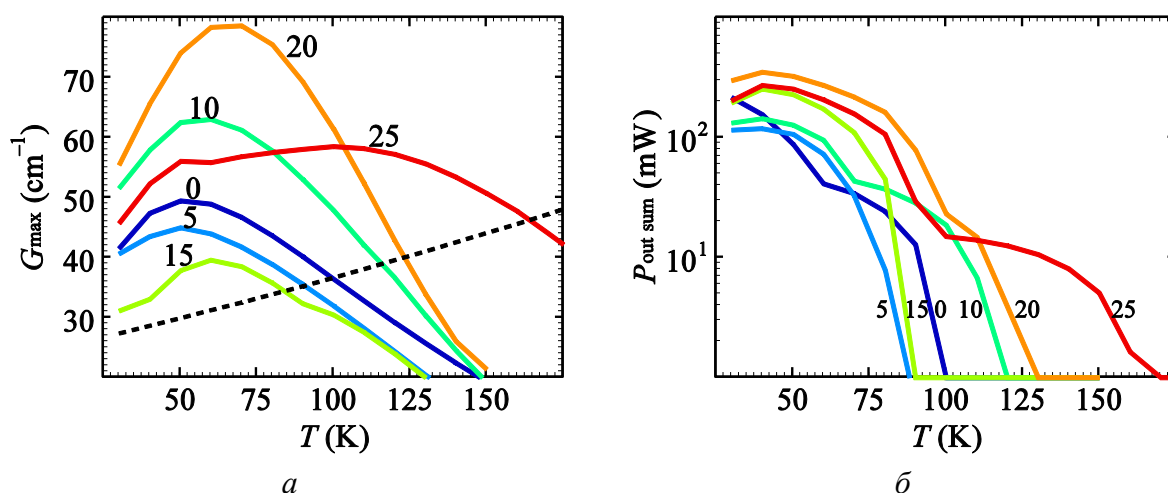


Рис. 2. Температурные зависимости (а) максимума коэффициента усиления и (б) суммарной выходной мощности излучения для различных значений магнитного поля (числа на кривых в Тл). Длина резонатора 1 мм, ширина полоска 100 мкм. Штриховой линией показан спектр коэффициента результирующих потерь

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 23-19-00436, <https://rscf.ru/project/23-19-00436/>.

Библиографические ссылки

1. Quantum cascade lasers with double metal-semiconductor waveguide resonators / K. Unterrainer [et al.] // *Appl. Phys. Lett.*, 2002. Vol. 80. P. 3060–3062.
2. *Apalkov V. M., Chakraborty T.* Magnetic field induced luminescence spectra in a quantum cascade laser // *Applied Physics Letters*. 2001. Vol. 78. P. 1973–1975.
3. Magnetic field in-plane quantization and tuning of population inversion in a THz superlattice quantum cascade laser / J. Alton [et al.] // *Physical Review B*. 2003. Vol. 68. 081303(R).
4. Magnetic-field-assisted terahertz quantum cascade laser operating up to 225 K/ A. Wade [et al.] // *Nat Photonics*. 2009. Vol. 3. P. 41.
5. Magnetic field effects on THz quantum cascade laser: A comparative analysis of three and four quantum well based active region design/ A. Daničić [et al.] // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2016. Vol. 81. P. 275–280.
6. Моделирование квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот методом балансных уравнений на основе базиса волновых функций со сниженными дипольными моментами туннельно-связанных состояний / Д. В. Ушаков [и др.] // *Квантовая электроника*. 2019. Т. 49. С. 913–918.
7. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs phonon Reststrahlen band predicted by the balance equation method / D. Ushakov [et al.] // *Opt. Express*. 2020. Vol. 28. P. 25371–25382.
8. Новые дизайны лазерных переходов в ТГц квантово-каскадных лазерах/ Д. В. Ушаков [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2022. Т. 65, № 5–6. С. 505–515.
9. Квантово-каскадный лазер с частотой генерации 3.8 THz, выращенный методом металлоорганической газофазной эпитаксии/ Т. А. Багаев [и др.] // *Письма в ЖТФ*. 2022. Т. 48, вып. 10. С. 16–19.
10. Спектры модовых потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах с двойным металлическим волноводом на основе Au и Ag /Д. В. Ушаков [и др.] // *Квантовая электроника*. 2018. Т. 48, № 11. С. 1005–1008.