

Расчет в магнитном поле спектральных и мощностных характеристик GaAs/AlGaAs ККЛ ТГц-диапазона

Д. В. Ушаков^{1,*}, А. А. Афоненко¹, Р. А. Хабибуллин², А. А. Дубинов³,
В. И. Гавриленко³

¹Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105

³Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, Нижний Новгород, 607680

*ushakovdv@bsu.by

Для ТГц-структур GaAs/AlGaAs квантово-каскадного лазера с 4 квантовыми ямами и двойным металлическим волноводом теоретически исследованы спектральные (3–4 ТГц) 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 населенности уровней и времени жизни носителей заряда на основных уровнях, а также выходной мощности излучения. Наблюдаемые эффекты связаны с межуровневыми резонансами Ландау и подавлением или ростом каналов безызлучательной рекомбинации с помощью дополнительного квантования Ландау.

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 двумерной структуры с несколькими квантовыми ямами (КЯ) 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 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 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.

Результаты

Населенности уровней подзон находились методом балансных уравнений с периодическими граничными условиями [6–8]. Базисные волновые функции находились *kp*-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 шеро-

ховатостях 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 Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs с 4 КЯ, слои которой составляют 3,95/16,4/5,08/8,46/2,26/9,03/2,26/7,90 нм [8, 9]. Центральная часть широкой КЯ легирована примесями со слоевой концентрацией 4,6·10¹⁰ см⁻².

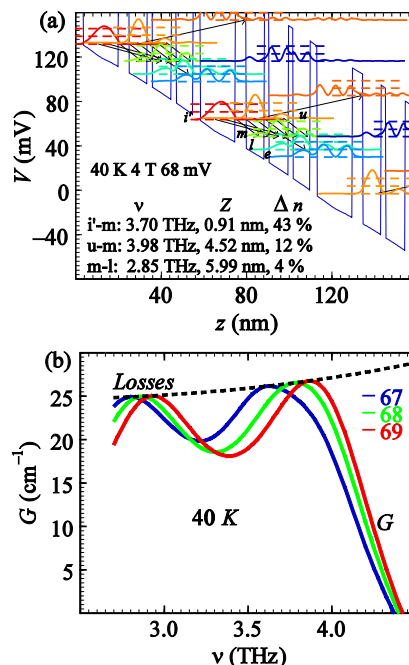


Рис. 1. Диаграмма зоны проводимости (а) и квадраты модулей волновых функций электронов, а также уровни Ландау (штриховые линии), рассчитанные *kp*-методом при температуре $T = 40$ К, магнитном поле $B = 4$ Тл и напряжении в одном модуле 68 мВ; б – спектры усиления и потерь для различных напряжений в одном модуле (числа справа от кривых в мВ)

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: $i'-m$ ($\sim 3,7$ ТГц) и двух лазерных переходов $u-m$ ($\sim 3,98$ ТГц), $m-l$ ($\sim 2,85$ ТГц).

Рабочее напряжение на одном каскаде близко к сумме двух энергий излучения и энергии продольного оптического фонона $2\hbar\omega + \hbar\omega_{LO}$. Как видно из спектров усиления на рис. 1, b , при напряжении ~ 68 мэВ, близком к порогу генерации, наблюдаются переходы с уровня инжектора на средний лазерный уровень $i'-m$. Хотя матричный элемент дипольных переходов $i'-m$ мал (~ 1 нм), но из-за 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.

Спектры модовых потерь рассчитаны согласно [10] для волновода со следующими параметрами: обкладки Au, слои адгезии Ti толщиной 50 нм, приконтактные n^+ -слои GaAs (70/100 нм, $5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$), активная область GaAs/AlGaAs (10 мкм, $4.6 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$).

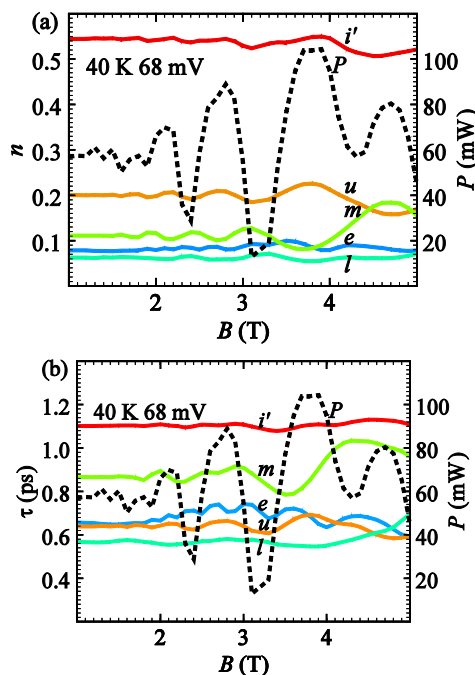


Рис. 2. Населенности уровней (a) и времена жизни (b) в допороговом режиме для различных уровней, а также мощность генерации (штриховые линии) в зависимости от магнитного поля

На рис. 2 рассчитаны населенности и времена жизни уровней, а также мощность генерации для различных значений магнитного поля B . В отсутствие магнитного поля населенности уровней составляют: 53 (i'), 22 (u), 10 (m) и 6 % (l). Наблюдаемые осцилляции в магнитном поле, так же как и в работах [3, 4], связаны с модуляцией населенности лазерных уровней из-за совокупности эффектов межуровневых резонансов Ландау. Максимумы мощности следуют синхронно вплоть до 4 Тл за максимумами населенности верхнего (u) и минимумами населенности нижнего (l) лазерных уровней и соответствуют процессам роста (для нижних лазерных уровней) и подавления (для верхних лазерных уровней) каналов безызлучательной рекомбинации путем дополнительного плоскостного квантования. Максимумы мощности также следуют синхронно за максимумами времени жизни верхнего (u) лазерного уровня. После 4,5 Тл расщепление уровней становится значительным и приводит к перекрытию уровней Ландау различных подзон, что объясняет более сложное поведение мощности генерации.

Таким образом, дополнительное квантовое ограничение в магнитном поле для ТГц ККЛ является путем к исследованию процессов рассеяния с целью оптимизации лазерных переходов и продвижения в область более высоких рабочих температур.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 23-19-00436.

Литература

1. K. Unterrainer, R. Colombelli, C. Gmachl, et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 3060–3062.
2. V. M. Apalkov, T. Chakraborty // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 1973–1975.
3. J. Alton, S. Barbieri, J. Fowler, et al. // Physical Review B. 2003. V. 68. 081303(R).
4. A. Wade, G. Fedorov, D. Smirnov, et al. // Nat Photonics. 2009. V. 3. P. 41–45.
5. A. Daničić, J. Radovanović, V. Milanović, et al. // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2016. V. 81. P. 275–280.
6. Д. В. Ушаков, А. А. Афоненко, А. А. Дубинов и др. // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. С. 913–918.
7. D. Ushakov, A. Afonenko, R. Khabibullin, et al. // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 25371–25382.
8. Д. В. Ушаков, А. А. Афоненко, Д. С. Пономарев и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 5–6. С. 505–515.
9. Т. А. Багаев, М. А. Ладугин, А. А. Мармалюк и др. // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48, вып. 10. С. 16–19.
10. Д. В. Ушаков, А. А. Афоненко, А. А. Дубинов и др. // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. С. 1005–1008.