

Неоднородное уширение энергетических уровней при флуктуации концентрации легирования в квантово-каскадных лазерах

Ан. А. Афоненко¹, А. А. Афоненко^{1*}, Д. В. Ушаков¹, Р. А. Хабибуллин²

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

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105, Россия
*afonenko@bsu.by

Метод анализа квантово-каскадных лазеров (ККЛ) на основе балансных уравнений с модифицированными базисными волновыми функциями позволил описать известные экспериментальные результаты и предложить новый двухфотонный дизайн с улучшенной эффективностью генерации [1, 2]. При этом количественное соответствие расчетных и экспериментальных вольтамперных характеристик не всегда является достаточно точным, что делает актуальным детальное исследование механизмов рассеяния и спектрального уширения. В работе проведен анализ влияния флуктуаций концентрации заряженных примесей на спектральные и вольтамперные характеристики ККЛ.

При процедуре локализации [2] собственные волновые функции гамильтониана с близкими энергиями комбинируются с помощью унитарного преобразования таким образом, что перекрестные дипольные моменты и, соответственно, вероятности рассеяния значительно уменьшаются. Диапазон вовлекаемых энергий определяется шириной уровня. Таким образом, снижается протяженность волновых функций нового базиса вдоль нормали к плоскости слоев. Можно провести аналогичную процедуру локализации для координатной зависимости волновых функций в плоскости слоев. Считаем, что из-за конечного времени жизни электронов в подзонах τ длина когерентности их волновых функций в плоскости слоя составляет $L = \tau v_x$, где v_x – среднеквадратичная проекция тепловой скорости. Количество примесей, которые взаимодействуют с электроном в одном каскаде на площади $L \times L$, определяется распределением Пуассона, дисперсия которого составляет $N_d L^2$ (N_d – слоевая концентрация легирования). С учетом средней энергии взаимодействия электрона с экранированной заряженной примесью, обратно пропорциональной анализируемой площади L^2 , среднеквадратичный разброс энергии взаимодействия оказывается обратно пропорциональным длине когерентности и прямо пропорциональным квадратному корню из концентрации примесей. При расчете уширения конкретного перехода в флуктуациях необходимо учитывать разность энергий взаимодействия выбранных состояний примесью в заданной точке. Поэтому неоднородное уширение перехода увеличивается при удалении волновых функций друг от друга.

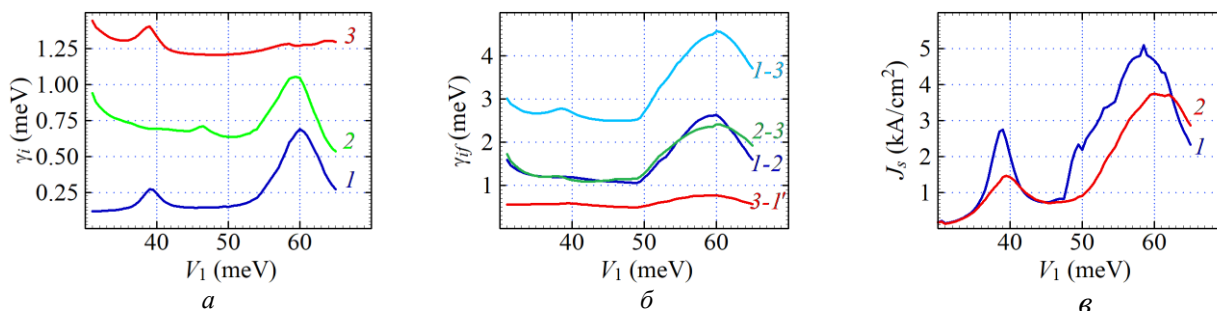


Рис. 1. Зависимость однородного уширения уровней 1, 2, 3 (а) и неоднородного уширения переходов 1–2, 1–3, 2–3, 3–1' (б) от напряжения на одном каскаде. Зависимость плотности тока J_s в режиме генерации (в) от напряжения на одном каскаде без учета (1) и с учетом (2) неоднородного уширения энергетических уровней при флуктуации концентрации легирования

В качестве примера проанализирована структура лазера $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ с периодом из 4 слоев 3,26/7,99/1,90/16,46 нм, генерирующего излучение с частотой около 3,9 ТГц [3]. Волновые функции 1 и 3 локализуются преимущественно в широкой квантовой яме, волновая функция 2 – в узкой. Величина неоднородного уширения энергетических уровней может превышать значения для однородного уширения (рис. 1, а, б). Среднеквадратичные флуктуации энергии перехода возрастают при разнесении в пространстве соответствующих волновых функций. Например, для перехода 1–3 между состояниями, локализованными в разных квантовых ямах, неоднородное уширение в ~5 раз больше уширения для перехода 3–1' между состояниями одной квантовой ямы. Это приводит к частичному сглаживанию первого туннельного резонанса (переход 1–3) на вольтамперных характеристиках квантово-каскадных лазеров (рис. 1, в).

Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ №23РНФМ-064.

1. Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов и др. // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 10. С. 913–918.
2. R.A. Khabibullin, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, et al. // J. Appl. Phys. 2024. Vol. 136, no. 19. 194504.
3. M. Bosco, M. Franckie, G. Scalari, et al. // Appl. Phys. Lett. 2019. Vol. 115, no. 1, 010601.