

01;06

Рассмотрение неоднородного уширения излучения гетероструктур на квантовых точках в рамках модели сверхизлучения

© Н.Ю. Гордеев, С.В. Зайцев, В.И. Копчатов, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, В.М. Устинов, П.С. Копьев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Applied Optoelectronics Inc. 242 Kingfisher Dr. Sugar Land, TX 77478

Поступило в Редакцию 10 ноября 1999 г.

На основании простейших выражений теории сверхизлучения двухуровневых систем предложена модель, позволяющая описывать неоднородно уширенные спектры излучения гетероструктур на квантовых точках. Показано совпадение с точностью 98% во всем диапазоне длин волн расчетного и экспериментального спектров для InGaAs/AlGaAs/GaAs гетероструктуры на квантовых точках. Представлены оценки неоднородного уширения и характеристического времени сверхизлучения.

Необходимость моделирования спектров излучения приборов полупроводниковой электроники (лазеров, светодиодов) ставит задачу анализа форм-факторов однородного и неоднородного уширения. В предыдущих работах [1,2] нами было показано, что на базе простейших формул теории сверхизлучения двухуровневых систем удастся получить аналитическое выражение для форм-фактора однородного уширения спектра излучения лазерных полупроводниковых гетероструктур:

$$F(\omega - \omega_0) \propto 2\pi\tau_N \operatorname{sech}(\pi\tau_N(\omega - \omega_0)), \quad (1)$$

где τ_N — характеристическое время сверхизлучения, $\omega - \omega_0$ — частотная расстройка.

Спектр излучения квантовой ямы при низких температурах (77 К), когда неоднородным уширением относительно однородного можно пре-

небрежь, с высокой точностью описывается выражением

$$R(E) = A \cdot \sec h \left(\pi \tau_N \frac{E - E_0}{\hbar} \right), \quad (2)$$

полученным как свертка форм-фактора однородного уширения (1) и неоднородно уширенного спектра R_0 (в данном случае $R_0(E) = \delta(E_0)$).

С точки зрения теории относительно легко должны описываться спектры излучения гетероструктур с активной областью на квантовых точках (КТ). "Идеальные" КТ должны иметь дискретный энергетический спектр плотности состояний (наподобие атомного), фактически представляющий собой δ -функцию [3]. Однако на практике КТ, составляющие активную область, неоднородны по размеру, по составу и по форме [4]. Все это приводит к значительному неоднородному уширению спектров излучения, в том числе и при низких температурах.

Из вышесказанного следует, что при моделировании спектров излучения структур на КТ необходимо ввести форм-фактор неоднородного уширения, отличный от δ -функции. Запишем неоднородное уширение в простейшем виде (прямоугольник единичной высоты и ширины, равной характеристической энергии неоднородного уширения ΔE):

$$R_0(E) = \Theta \left(E - \left(E_0 - \frac{1}{2} \Delta E \right) \right) \cdot \Theta \left(\left(E_0 + \frac{1}{2} \Delta E \right) - E \right), \quad (3)$$

где E_0 — энергия перехода.

Такая аппроксимация позволяет записать спектр излучения в аналитическом виде:

$$R(E) = B \left[\arctg \left(\operatorname{sh} \left(\frac{\pi \tau_N (E_0 - \frac{1}{2} \Delta E - E)}{\hbar} \right) \right) + \arctg \left(\operatorname{sh} \left(\frac{\pi \tau_N (E - E_0 - \frac{1}{2} \Delta E)}{\hbar} \right) \right) \right]. \quad (4)$$

В данной работе исследовались образцы лазерной AlGaAs/GaAs гетероструктуры, выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии и имеющей в качестве активной области массив из 10 слоев вертикально-связанных InGaAs квантовых точек. Подробно о технологии роста и свойствах КТ написано в [5].

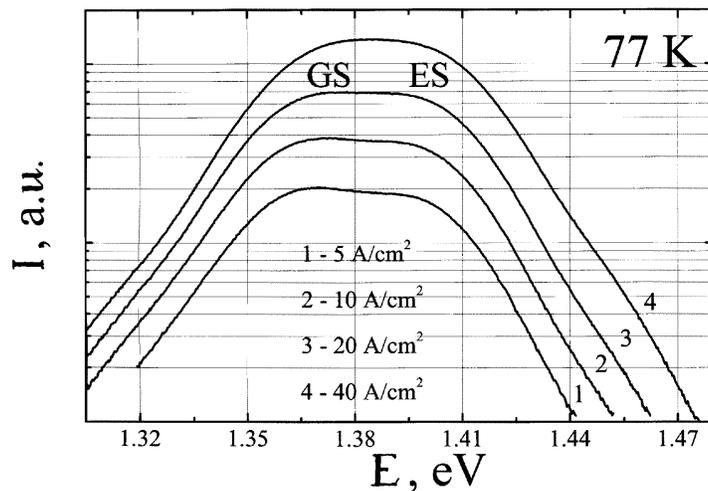


Рис. 1. Спектры спонтанного излучения InGaAs/AlGaAs/GaAs лазерной гетероструктуры на квантовых точках через окно в подложке при различных плотностях тока накачки.

Образцы исследовались при импульсном возбуждении (длительность импульса $3 \mu\text{s}$, частота повторения 5 kHz) при температуре 77 K , для чего образцы напайвались на теплоотвод слоями вниз и помещались в криостат. Излучение измерялось через специальное окно в верхнем контакте лазерной структуры. Особое внимание было уделено подавлению обратной связи, зеркала травились и покрывались затем черной краской с высоким показателем преломления. Этот метод, позволяющий исключить влияние переизлучения, использовался в наших экспериментах и ранее [1,2].

На рис. 1 представлены в полулогарифмическом масштабе спектры спонтанного излучения при различных плотностях тока накачки. Обращает на себя внимание тот факт, что уже начиная с малых плотностей тока инжекции в спектрах наблюдается несколько максимумов. Эта ситуация достаточно типична для структур на КТ и обуславливается рекомбинацией через основное и возбужденное состояние квантовых точек [3].

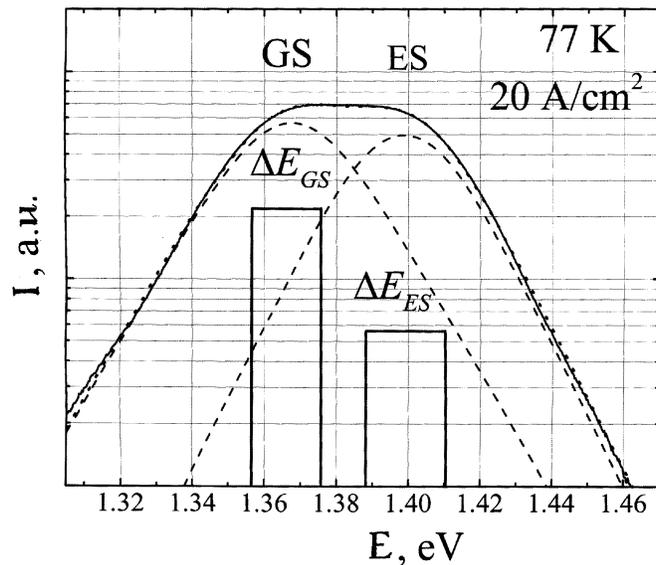


Рис. 2. Спектр спонтанного излучения лазерной гетероструктуры на квантовых точках (сплошная линия). Точками показан модельный спектр и пунктирными линиями его составляющие (*GS* и *ES*). В виде прямоугольников схематически показаны неоднородно уширенные спектры для основного и возбужденного состояний КТ.

Очевидно, что спектр излучения нужно рассматривать как суперпозицию рекомбинации через основное и возбужденное состояние, т. е.:

$$R(\hbar\omega) = R_{GS}(\hbar\omega) + R_{ES}(\hbar\omega), \quad (5)$$

где R_{GS} и R_{ES} представляют собой спектры излучения через основное и возбужденное состояние соответственно. Слагаемые в правой части представляют собой выражения, аналогичные (4) и отличающиеся амплитудами B , характеристической энергией неоднородного уширения ΔE и энергией перехода E_0 .

На рис. 2 приведены экспериментальный спектр и модельный спектр, построенный по формуле (5). Его параметры подбирались с помощью компьютерного моделирования. Видно, что модельный спектр с высокой

точностью (порядка 98%) повторяет экспериментальный. Незначительные отличия видны лишь в области низких энергий. Модельному, а следовательно, и экспериментальному спектрам соответствует характеристическая энергия неоднородного уширения 17 meV для основного состояния, 23 meV — для возбужденного. Эти значения соответствуют оценкам неоднородного уширения для КТ (см., например, обзор [3]). Характеристическое время сверхизлучения τ_N , оцененное по методике, изложенной в [1,2], составило величину 14 fs для основного и 17 fs для возбужденного состояния соответственно. Оно практически не зависело от тока накачки. Инвариантность этого параметра от тока накачки соответствует данным, полученным ранее для структур на квантовых ямах [2].

Таким образом, нами впервые показано, что с помощью выражений теории сверхизлучения двухуровневых систем удастся с высокой точностью описывать экспериментальные спектры излучения гетероструктур на квантовых точках, используя малое число параметров, имеющих ясный физический смысл. Параметры модельного спектра позволили оценить характеристическое время сверхизлучения, а также характеристическую величину неоднородного уширения, на основании чего можно предложить рассмотренную модель для косвенного исследования механизмов неоднородного уширения излучения в низкоразмерных структурах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 98–02–18212 ”Исследование пространственно-временной структуры излучения гетероструктур на основе квантовых ям и квантовых точек в системе АЗВ5” и Конкурса-экспертизы научных проектов молодых ученых РАН по фундаментальным и прикладным исследованиям.

Список литературы

- [1] Георгиевский А.М., Зайцев С.В., Гордеев Н.Ю., Копчатов В.И., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Копьев П.С. // ФТП. 1999. V. 33(7). P. 847.
- [2] Зайцев С.В., Гордеев Н.Ю., Graham Luke A., Копчатов В.И., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Huffaker Diana L., Копьев П.С. // ФТП. 1999. V. 33(12).
- [3] Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. // ФТП. 1998. V. 32(4). P. 385.

- [4] Leonard D., Fafard S., Pond K., Zhang Y.H., Merz J.L., Petroff P.M. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1994. V. 12. P. 2516.
- [5] Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Maksimov M.V., Tsatsulnikov A.F., Gordeev N.Yu., Zaitsev S.V., Shernyakov Yu.M., Bert H.A., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Böhrer J., Bimberg D., Kosogov A.O., Werner P., Gösele U. // Journal of Crystal Growth. 1997. V. 175/176. P. 689.