ЭФФЕКТЫ УШИРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЛЕГИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТОК

Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко, И.С. Манак
Белгосуниверситет, г. Минск

Легированные полупроводниковые сверхрешетки относятся к квази-двухмерным электронным системам, в которых края зоны проводимости и валентной зоны промодулированы периодическим электростатическим потенциалом, созданным заряженными примесями *n*- и *p*-типа, а также свободными электронами и дырками. В зависимости от степени легирования и уровня накачки кристалла глубина и форма потенциального рельефа изменяются, что влияет на свойства и характеристики легированных сверхрешеток со структурой типа *n-i-p-i*-кристалла.

Обычно *n-i-p-i*-кристаллы относятся к сильно легированным полупроводникам, поэтому при определении их параметров и характеристик необходимо учитывать уширение энергетических уровней в результате флуктуаций электростатического потенциала из-за хаотического распределения заряженных примесей. При перекрытии примесных и собственных энергетических зон кристалла возникают хвосты плотности состояний.

Используя подход Кейна, развитый для объемных полупроводников, в работе [1] для двумерной плотности состояний в зоне проводимости $\rho_c(E)$ получено следующее выражение:

$$\rho_c(E) = \frac{m_c}{2\pi\hbar^2 N_p} \sum_n \sum_\nu \operatorname{erfc} \left(\frac{E_{c0} + E_{c\nu} - E}{\sigma_c} \right), \quad (1)$$

где N_p - число периодов сверхрешетки, E_{c0} - энергия дна зоны проводимости, $E_{c\nu}$ - уровни размерного квантования, m_c - эффективная масса электронов, σ_c - характеристический параметр хвоста плотности состояний в зоне проводимости. При $\sigma_c \rightarrow 0$ данная формула переходит в известное выражение для ступенчатообразной плотности состояний. Аналогичное выражение получается для плотности состояний в валентной зоне с характеристическим параметром σ_v . Параметры хвостов плотности состояний σ_c и σ_v определяются как концентрациями легирующих примесей, так и длиной экранирования электростатического потенциала.

В рамках самосогласованного расчета с учетом уширения энергетического спектра состояний найдены длины экранирования электронами и дырками. При этом из-за пространственного разнесения свободных носителей тока в *n-i-p-i*-кристаллах экранирование флуктуирующего элек-

тростатического потенциала осуществляется, в отличие от объемных кристаллов, отдельно электронами в п-областях и дырками в р-областях.

Для легированных полупроводниковых сверхрешеток рассчитаны также спектры спонтанного испускания. Выражение для скорости излучательной рекомбинации с сохранением волнового вектора электрона имеет вид

$$\tau_{sp}(h\nu) = \frac{A_{cv}}{2\pi\hbar^2 N_p d} \sum_{i=h,l} m_{ri} \sum_{\nu} \sum_m \sum_n f_e(E_{cnm\nu}) \times \\ \times f_h(E_{vnm\nu}) |I_{nm\nu}|^2 \operatorname{erfc} \left(-\frac{h\nu - (E_g^i + E_{cn\nu} + E_{vm\nu})}{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_v^2}} \right). \quad (2)$$

Здесь A_{cv} - коэффициент Эйнштейна, d - период сверхрешетки, m_{ri} - приведенная масса, $I_{nm\nu}$ - интеграл перекрытия волновых функций электронов и дырок, $f_e(E_{cnm\nu})$ и $f_h(E_{vnm\nu})$ - функции распределения Ферми-Дирака для электронов и дырок с энергиями, определяемыми как

$$E_{cnm\nu} = E_{c0} + \frac{m_{ri}}{m_c} (h\nu - E_g^i) + \frac{m_{ri}}{m_{vi}} E_{cn\nu} - \frac{m_{ri}}{m_c} E_{vm\nu}, \\ E_{vnm\nu} = E_{v0} - \frac{m_{ri}}{m_{vi}} (h\nu - E_g^i) + \frac{m_{ri}}{m_{vi}} E_{cn\nu} - \frac{m_{ri}}{m_c} E_{vm\nu}, \quad (3)$$

где E_{v0} - потолок валентной зоны, $E_g^i = E_{c0} - E_{v0}$ - эффективная ширина запрещенной зоны полупроводника, m_{vi} - продольные эффективные массы тяжелых ($i = h$) и легких ($i = l$) дырок, $E_{vm\nu}$ - уровни энергии размерного квантования, определяемые поперечными компонентами эффективных масс дырок. Суммирование в (2) по квантовым числам n , m и ν учитывает вклад в излучение переходов между разными подзонами и миниподзонами электронов и дырок.

Полученное выражение для скорости излучательной рекомбинации легированных полупроводниковых сверхрешеток позволяет описать длинноволновое крыло спектров фото- и электролюминесценции и их форму. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными для различных уровней возбуждения легированных сверхрешеток на GaAs [2].

1. Д.В. Ушаков, В.К. Кононенко, И.С. Манак. Тр. III Конф. по лазерной физике и спектроскопии (Гродно, 1997). Минск, 1997. Т.1. С.384-386.
2. С. Metzner, K. Schrüfer, U. Wieser, M. Lubert, M. Kneissl and G.H. Döhler // Phys. Rev. B. 1995. Vol.51, No.8. P.5106-5115.