

УДК 621.315.592.2

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ГАЛЛИЙ-ИНДИЙ-МЫШЬЯК

Манего С.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведены экспериментальный и теоретические исследования влияния неоднородностей состава на люминесцентные характеристики твердых растворов индий-мышьяк-фосфор. Показано, что структура спектров люминесценции определяется флуктуацией основного и примесного составов. Разработаны программы расчета формы спектров люминесценции неоднородных твердых растворов $InAs_xP_{1-x}$, позволившие рассчитать среднеквадратичную флуктуацию гетерогенного потенциала для тройного твердого раствора $InAs_xP_{1-x}$ и установить связь между характеристическими параметрами краевой полосы люминесценции, концентрацией носителей заряда и величиной гетерогенного потенциала.

Ключевые слова: тройные твердые растворы $InAs_xP_{1-x}$, спектры люминесценции неоднородных твердых растворов, среднеквадратичная флуктуация гетерогенного потенциала.

RADIATIVE RECOMBINATION OF INHOMOGENEOUS SOLIDS SOLUTIONS OF GALLIUM-INDIUM-ARSENIC

Manego S.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. Experimental and theoretical studies of the effect of inhomogeneities of the composition on the luminescent characteristics of solid solutions of indium-arsenic-phosphorus were carried out. It is shown that the structure of luminescence spectra is determined by the fluctuation of the basic and impurity compositions. Theoretical studies of the effect of inhomogeneities of the composition on the luminescent characteristics of solid solutions of indium-arsenic-phosphorus were carried out. Programs for calculating the shape of the luminescence spectra of inhomogeneous solid solutions $InAs_xP_{1-x}$ have been developed, which made it possible to calculate the root mean square fluctuation of the heterogeneous potential for a triple solid solution $InAs_xP_{1-x}$ and to establish a relationship between the characteristic parameters of the luminescence margin band, the concentration of charge carriers and the value of the heterogeneous potential.

Keywords: triple solid solutions $InAs_xP_{1-x}$, luminescence spectra of heterogeneous solid solutions, mean square fluctuation of heterogeneous potential.

Адресс для переписки: Манего С.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Исследование формы краевой полосы люминесценции (КПЛ) полупроводниковых материалов соединений $A^{III}B^V$ позволяет получать важную информацию о структуре зон и механизмах рекомбинации неравновесных носителей заряда. При анализе экспериментальных спектров КПЛ неоднородных твердых растворов соединений $A^{III}B^V$ предполагалось, что в широких пределах температур и уровней возбуждения форма спектров люминесценции определяется практически только распределением комбинирующих носителей заряда по энергиям и функцией плотности вероятности распределения локальной ширины запрещенной зоны полупроводника. Данный подход обусловлен предположением, что вероятность излучательных переходов через набор уровней локального объема полупроводника не зависит от энергии. Основанием для такого предположения является как относительно слабая энергетическая зависимость матричного элемента перехода, так и не сохранение правила отбора при нарушении дальнего порядка в разупорядоченных полупроводниках. Детальный анализа

спектрального распределения и таких характеристических параметров формы КПЛ как полуширина (ΔE), наклон высоко- и низкоэнергетического фронта (α_1, α_2) и энергетического положения максимума спектра (E_{max}) от степени неоднородности и концентрации основных носителей заряда для неоднородных полупроводников $InAs_xP_{1-x}$ не проводился. Поэтому представляется интересным провести теоретическое исследование изменений характеристических параметров и общей формы КПЛ неоднородных полупроводников для некоторых механизмов рекомбинации, при различной степени неоднородности и концентрации носителей в твердых растворах $InAs_xP_{1-x}$.

Для теоретического описания формы линии краевой полосы люминесценции рассматривают различные модели излучательных переходов для идеального полупроводника с последующим вводом поправок, отражающих неоднородность полупроводника. Это может быть размытие краев зон, либо флуктуация ширины запрещенной зоны. Влияние концентрации примеси, очевидно, должно отражаться на законе дисперсии краев зон

и на изменении матричного элемента $M_{eh}(\hbar\omega)$. Известно, что флуктуации состава и примеси вызывают размытие краев зон неосновных носителей, т. е. в нашем случае это ведет к появлению хвостов плотности состояний V -зоны и размытию акцепторных уровней. Поэтому, в первом приближении как для зоны проводимости, так и для валентной зоны наличием «хвостов» зон будем пренебрегать, а акцепторные уровни будем считать размытыми. Следует также отметить, что в данной работе исследовались нелегированные эпитаксиальные слои твердых растворов $(InAs_xP_{1-x}, n < 10^{17} \text{ см}^{-3})$, поэтому излучательные каналы, связанные с непрямыми переходами, не рассматривались. Таким образом, для неоднородных твердых растворов соединений $InAs_xP_{1-x}$ имеет смысл рассмотреть прямые излучательные переходы зона-зона и донор-акцептор.

Общее выражение для скорости спонтанной рекомбинации имеет вид

$$I(\hbar\omega) = \int d^3r \int dE_e \int dE_h W(E_e, E_h) f_e(r, E_e) \times f_h(r, E_h) \times \rho_e(E_e) \times \rho_h(E_h) \times \delta(\hbar\omega - E_g(r) - E_e - E_h), \quad (1)$$

где $E_e, (E_h)$ – кинетическая энергия свободных носителей либо энергия связи локальных состояний; ρ_e, ρ_h – плотности энергетических состояний в зоне проводимости и в валентной зоне в точке r ; f_e, f_h – функции вероятности заполнения состояний с энергией $E_e (E_h)$ в точке r , $W(E_e, E_h)$ – матричный элемент вероятности перехода, который будем считать не зависящий от E_g ; $\delta(\hbar\omega - E_g(r) - E_e - E_h)$ – дельта функция, выражающая закон сохранения энергии. Так как эксперименты проводились при низких уровнях накачки $\Delta p < n_0$ (n_0 – равновесная концентрация электронов), низких температурах, а неоднородности полупроводника имеют достаточно большие размеры, то можно предположить, что неравновесные носители практически рекомбинируют в тех же областях пространства, где происходит их генерация. Перехода от интегрирования по d^3r к интегрированию по E_g , получаем:

$$I(\hbar\omega) = \int I_{cv}(\hbar\omega) \cdot F(E_g) dE_g, \quad (2)$$

где $F(E_g)$ – функция распределения локальной ширины запрещенной зоны. Таким образом, экспериментально наблюдаемая форма линии люминесценции представляет собой статистическое усреднение по всем наблюдаемым областям неоднородностей, в которых происходят акты рекомбинации. Перераспределения неравновесных носителей между локальными минимумами приводит к добавлению в уравнение $I(\hbar\omega)$ для случая равновесного распределения носителей, $\exp(-E_g/kT)$ и частично равновесного распределения носителей

$(E_g - E_{gm}) \cdot \exp(-(E_g - E_{gm})/kT)$. Спектры люминесценции неоднородных твердых растворов $InAs_xP_{1-x}$ при температурах 4,2 и 78°K, представлены на рисунке. Анализ характеристических параметров кривых показывает, что с ростом уровня легирования и амплитуды флуктуации ширины запрещенной зоны форма КПЛ меняется, т.е. происходит увеличение полуширины краевой полосы и сдвигу его максимума в высокоэнергетическую сторону. При больших величинах амплитуды флуктуации ($Q > 3,5$ мэВ) полуширина краевой полосы начинает возрастать при концентрациях носителей более $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, тогда как изменение полуширины КПЛ при малых концентрациях носителей в твердых растворах ($n < 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) определяется только амплитудой флуктуационного потенциала и имеет линейную зависимость от Q . При низких уровнях легирования уширение КПЛ обусловлено, главным образом, ее высокоэнергетическим фронтом.

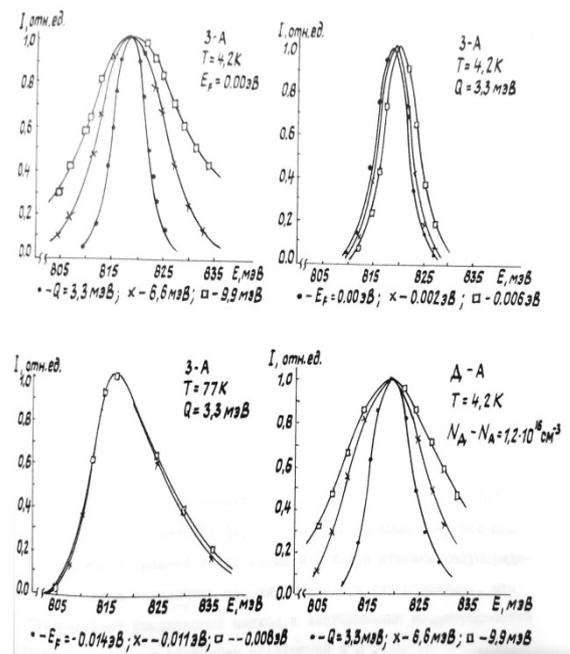


Рисунок 1

Оценка величины амплитуды флуктуации состава в твердых растворах $InAs_xP_{1-x}$ была проведена с помощью подгонки теоретических кривых к экспериментальным данным.

Анализ экспериментальных и теоретических спектров люминесценции эпитаксиальных слоев $InAs_xP_{1-x}$ показывает, что для излучательных переходов зона-зона ($n = 7,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) амплитуда флуктуационного потенциала равна 4,0 мэВ, а для зона-акцепторных переходов – 7,3 мэВ.