

## ВЛИЯНИЕ ОДНОМЕРНОГО БЕСПОРЯДКА НА ЭКСИТОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

*А.Ю.Маслов, Л.Г.Суслина, А.Г.Арешкин, В.Г.Мелехин,  
Д.Л.Федоров*

Впервые экспериментально и теоретически показано, что наблюдаемое уширение экситонных состояний в твердых растворах полупроводников в области существования фазового перехода (сфалерит – вюрцит) описывается в модели одномерного беспорядка.

Твердые растворы полупроводников (ТРП) являются классическими неупорядоченными кристаллами, в которых флуктуации концентрации приводят к возникновению случайного потенциала, что является причиной размытия краев зон, возникновения длинноволнового хвоста плотности локализованных состояний<sup>1-4</sup>. Теоретическое рассмотрение влияния флуктуационной неупорядоченности на экситонные состояния (ЭС) в ТРП основано на решении трехмерной задачи и носит приближенный характер<sup>2</sup>. Одномерная задача имеет точное решение, и ЭС в этом случае всегда являются локализованными вдоль направления беспорядка<sup>4,5</sup>. Мы обратили внимание на то, что ряд явлений, наблюдаемых в реальных структурах (при нарушении чередования плотноупакованных слоев в политипах, в кристаллах с дефектами упаковки  $\Delta U$ )<sup>6,7</sup>, в ТРП при смешивании двух соединений с различной кристаллической решеткой (сфалерит и вюрцит), можно описать в модели одномерного беспорядка.

В данной работе впервые теоретически и экспериментально исследовано влияние одномерного беспорядка на ЭС в ТРП на примере системы  $Zn_{1-x}Mg_xS$  в области существования фазового перехода сфалерит – вюрцит<sup>8</sup>.

Одномерный беспорядок, который связан в ТРП с существованием ДУ, был изучен в системе  $Zn_{1-x}Mg_xS$  двумя методами – двойного лучепреломления и экситонной спектроскопии. Величина двупреломления  $\Delta n$  для кристаллов, с ДУ является линейной функцией степени анизотропии  $\alpha$  ( $\alpha = \Delta n / \Delta n_0$ , где  $\Delta n_0$  – двупреломление в  $ZnS$  со структурой вюрцит -

та – W <sup>7)</sup>: измерения  $\Delta n$  для системы  $Zn_{1-x}Mg_xS$  позволили определить  $\alpha$ , и, следовательно, следить за величиной одномерного беспорядка в этих кристаллах. Исследованиями низкотемпературных (77 и 2К) спектров отражения обнаружено существование в них поляризованных экситонных линий. По поляризации и взаимному расположению их в спектре можно было судить о существовании кристаллов с ДУ в области  $0 < x < 0,12$  <sup>8</sup>. В области фазового перехода обнаружено сильное уширение дисперсионной кривой отражения, что свидетельствует о влиянии одномерного беспорядка на экситонные состояния. Максимальная полуширина линии  $A$  наблюдалась при  $\alpha = 0,5$  ( $x = 0,056$  и  $0,062$  – рис. 1) и оказывалась на порядок больше, чем в  $ZnS-W$  ( $\sim 20$  мэВ).

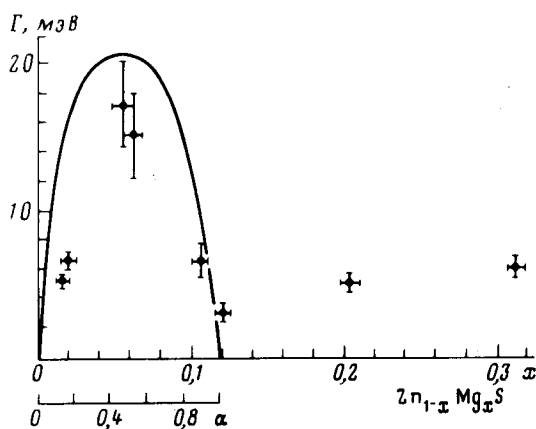


Рис. 1

Рис. 1. Концентрационная зависимость уширения основной экситонной линии отражения в спектрах твердых растворов  $Zn_{1-x}Mg_xS$  при  $T = 2K$ . Интервал  $0 < x < 0,12$  соответствует кристаллам с одномерным беспорядком (с незавершенным фазовым переходом сфалерит – вюрцит), интервал  $0,12 < x < 0,32$  – кристаллам со структурой вюрцита

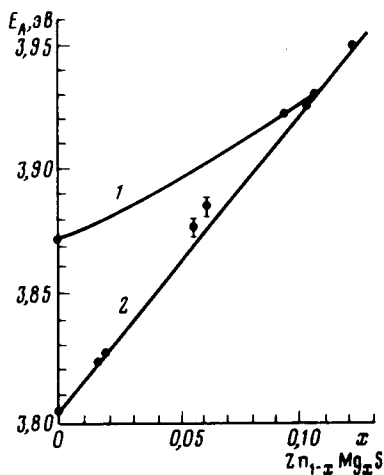


Рис. 2

Рис. 2. Концентрационная зависимость положения основной экситонной линии  $n = 1A$  в спектрах отражения твердых растворов с разной кристаллической структурой ( $T = 2K$ ): (1) – со структурой вюрцита, (2) – с разной степенью анизотропии. Точки – эксперимент, линии – квадратичная зависимость (2) из <sup>8</sup> для (1) и линейная зависимость для (2)

В ТРП с ДУ существует два различных типа беспорядка: объемный, связанный с флуктуациями состава твердого раствора, и одномерный, обусловленный случайным чередованием плотноупакованных слоев. С каждым из них связан случайный потенциал, который изменяет положение краев энергетических зон. Взаимодействие экситона со случайным потенциалом приводит к уширению линии экситонного поглощения (отражения). В области структурного фазового перехода определяющим оказывается взаимодействие экситонов с одномерным случайным потенциалом, который создается локальными флуктуациями ДУ и записывается в виде <sup>4</sup>:

$$V = u \frac{\xi}{N}, \quad (1)$$

где  $u = \partial E_A / \partial \alpha$ ,  $N$  – полное число плоских слоев, а флуктуация определена обычным образом:

$$\xi(z) = N_h - \alpha N \quad (2)$$

$N_h$  — локальная концентрация гексагональных слоев, усредненная по размеру, большему  $(\alpha N)^{-1}$ . Мы будем считать, что корреляции в расположении плотноупакованных слоев отсутствуют, т. е. среднее значение коррелятора

$$\langle \zeta(z)\zeta(z') \rangle = N\alpha(1-\alpha)\delta(z-z'). \quad (3)$$

Уравнение Шредингера, описывающее движение экситона в одномерном случайном потенциале:

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2M} \frac{d^2}{dz^2} + \alpha \frac{\zeta}{N} \right] \Psi = E \Psi \quad (4)$$

с учетом условия (3) можно привести к безразмерному виду при помощи подстановки

$$z = \frac{\hbar}{\sqrt{ME_0}} z'; \quad \zeta = \left( \frac{\hbar}{N\alpha(1-\alpha)\sqrt{ME_0}} \right)^{1/2} \zeta', \quad (5)$$

причем характерная энергия  $E_0$  имеет вид

$$E_0 = \frac{u^{4/3} \alpha^{2/3} (1-\alpha)^{2/3} M^{1/3}}{\hbar^{2/3} N^{2/3}}. \quad (6)$$

Ширины линий поглощения выражаются в единицах  $E_0$ . Решение полученной системы безразмерных уравнений показывает<sup>5, 4</sup>, что для ширины линии можно получить

$$\Gamma = 1,42E_0. \quad (7)$$

Зависимость (6) была использована для анализа экспериментальных данных по уширению экситонных линий в спектрах ТРП  $Zn_{1-x}Mg_xS$  с ДУ; принималось во внимание, что  $M$  — трансляционная масса экситона и  $N$  — полное число слоев вдоль оптической оси — такие же, как для кристаллов  $ZnS$ <sup>4</sup>. Параметр  $u = \partial E_A / \partial \alpha$  определяется градиентом положения основной экситонной линии  $A (E_A)$  с изменением концентрации слоев в области фазового перехода и может быть получен из зависимости

$$\frac{dE_A}{dx} = \frac{\partial E_A}{\partial x} + \frac{\partial E_A}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dx}, \quad (8)$$

где  $dE_A/dx = 1,21$  эВ — определяется из экспериментальной зависимости  $E_A(x)$  для ТРП с ДУ  $Zn_{1-x}Mg_xS$  (рис. 2, прямая 2), а  $\partial E_A/\partial x = 0,5 + 0,92x$  получена из концентрационной зависимости положения линии для гексагональных ТРП  $Zn_{1-x}Mg_xS$ <sup>8</sup> (рис. 2 кривая 1). По нашим экспериментальным данным, скорость протекания фазового перехода  $d\alpha/dx = 8,2$ . Подстановка этих значений в (8) позволяет построить зависимость для величины уширения ( $\Gamma$ ) экситонной линии, связанного с одномерным беспорядком (сплошная кривая, рис. 1), которая удовлетворительно описывает экспериментальные данные (точки на рис. 1). Для области фазового перехода ( $x < 0,12$ ) вклад трехмерного беспорядка мал, так как даже при  $x = 0,12$  уширение, связанное с ним, не превышает  $\sim 5$  мэВ и сильно падает с уменьшением  $x$ <sup>2</sup>.

В заключение следует подчеркнуть, что движение экситона как целого может быть локализовано флуктуациями случайного одномерного потенциала. Различие в энергиях локализации в разных точках кристалла приводит к неоднородному уширению экситонных состояний. При этом в одномерной потенциальной яме всегда имеется уровень связанного состояния, сравнимый с глубиной ямы<sup>4</sup>, в то время как для трехмерной флуктуационной потенциальной ямы он находится высоко<sup>2</sup>. Поэтому энергии локализации в первом случае могут быть существенно больше, чем во втором. Поскольку одномерный беспорядок достаточно часто образуется в структуре реальных кристаллов, его проявление в экситонной спектроскопии должно иметь общий характер.

Авторы приносят благодарность И.П.Ипатовой и А.Л.Эфросу за обсуждение результатов.

## Литература

1. Алферов Ж.И., Портной Е.Л., Рогачев А.А. ФТП, 1968, 12, 1194.
2. Барановский С.Д., Эфрос А.Л. ФТП, 1978, 12, 2233.
3. Суслина Л.Г., Плюхин А.Г., Федоров Д.Л., Арешкин А.Г. ФТП, 1978, 12, 2238.
4. Маслов А.Ю., Суслина Л.Г. ФТТ, 1982, 24, 3394.
5. Halperin V.I. Phys. Rev., 1965, A 139, 104.
6. Верма А., Кришна П. Полиморфизм и политипизм в кристаллах. М.: Мир, 1969.
7. Рыскин А.И., Суслина Л.Г., Хилько Г.И., Шадрин Е.Б. Письма в ЖЭТФ, 1968, 7, 335.
8. Федоров Д.Л., Суслина Л.Г., Арешкин А.Г. ФТТ, 1982, 24, 821.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
24 февраля 1983 г.