

## АСИММЕТРИЯ $p$ - $d$ -ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МАГНИТОСМЕШАННЫХ КРИСТАЛЛАХ $Cd_{1-x}Mn_xS$

С.И.Губарев, М.Г.Тяжлов

Обнаружено аномальное поведение ширины экситонных резонансов в магнитосмешанных кристаллах  $Cd_{1-x}Mn_xS$  ( $x=0,001$ ). В условиях гигантских спиновых расщеплений экситонных состояний, ширина  $\Gamma_5^+$  и  $\Gamma_5^-$  экситонных резонансов меняется почти на порядок величины от 1,2 мэВ до 8 мэВ. Наблюдаемое поведение указывает на асимметрию обменного взаимодействия для состояний носителей с различным направлением спина.

Обменное взаимодействие с магнитопримесной подсистемой приводит к гигантским спиновым расщеплениям (ГСП) экситонных состояний в магнитосмешанных полупроводниках (МСП) на основе  $A_2B_6$  полупроводниковых соединений<sup>1-3</sup>. Среди изученных к настоящему времени полупроводников этого класса кристаллы  $Cd_{1-x}Mn_xS$  занимают особое положение, поскольку отличаются аномально большой константой  $p$ - $d$ -обменного взаимодействия<sup>4-7</sup>. Наличие в матрице полупроводника случайно расположенных магнитных моментов помимо эффектов ГСП приводит также к флуктуациям обменного взаимодействия в системе экситон-магнитная примесь и к дополнительному уширению экситонных резонансов. В настоящей работе исследуется влияние флуктуаций  $p$ - $d$ -обменного взаимодействия на ширину экситонных термов в зависимости от намагниченности магнитной подсистемы.

Эксперименты проводились на кристаллах  $Cd_{1-x}Mn_xS$   $x=0,001$ , выращенных по методу Бриджмена из расплава. Исследовались спектры отражения кристалла при нормальном падении света. Измерения проводились в  $\sigma^+$ - и  $\sigma^-$ -поляризациях в направлении магнитного поля, вдоль гексагональной оси кристалла  $C_6$ . Измерения проводились при температуре жидкого гелия в магнитных полях до 5 Т.

В спектрах отражения кристалла в отсутствие магнитного поля отчетливо проявляются особенности, связанные с  $A$ -,  $B$ - и  $C$ -экситонными состояниями. Наиболее ярко в спектрах отражения проявляется особенность, связанная с  $A$ -экситонным термом, который отвечает оптическим переходам из верхней валентной зоны и определяет оптические свойства кристаллов вблизи края фундаментального поглощения. В магнитном поле линия  $A$ -экситона расщепляется на две линии  $\Gamma_5^+$  и  $\Gamma_5^-$ , активные в  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$ -поляризациях (рис. 1а). Одна из компонент экситонного терма  $\Gamma_5^+$  смещается в область меньших энергий и уширяется, в то время как  $\Gamma_5^-$ -экситонный терм смещается в сторону больших энергий и существенно обостряется. Изменение ширины  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$ -поляризованных экситонных резонансов наиболее отчетливо проявляется в спектрах дифференциального отражения  $dR/d\lambda$ , представленных на рис. 1б. Следует подчеркнуть, что в отличие от экспериментов, выполненных на других магнитосмешанных полупроводниках, такие как  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ <sup>8</sup> и  $Cd_{1-x}Mn_xSe$ <sup>9</sup>, в нашем случае существенно обостряется экситонный терм, сдвигающийся в сторону высоких энергий, т. е. в сторону энергий, отвечающих диссоциированным состояниям  $\Gamma_5^+$ -экситона. На рис. 2 изображена зависимость ширины экситонного резонанса  $\Gamma$ , определенная из спектров дифференциального отражения  $dR/d\lambda$ , как функция энергетического сдвига экситонного терма относительно положения в нулевом магнитном поле. Из рисунка видно, что зависимость носит монотонный характер, причем ширины экситонных резонансов в насы-

шающих магнитных полях отличаются более чем в 7 раз и составляют 1,2 мэВ для  $\sigma^-$ -компоненты и 8 мэВ для  $\sigma^+$ -поляризованной компоненты  $A$ -экситона. Надо отметить также, что резкость и величина размаха дисперсии  $\Gamma_5^-$ -экситонного термина в насыщающих магнитных полях сравнима с качеством спектров экситонного отражения, наблюдаемых в совершенных, кристаллах CdS. Это, с одной стороны, говорит о структурном совершенстве исследованных нами кристаллов, а с другой стороны указывает на то, что наблюдаемые нами аномальные изменения ширины экситонных резонансов обусловлены исключительно обменным взаимодействием с магнитопримесной подсистемой.

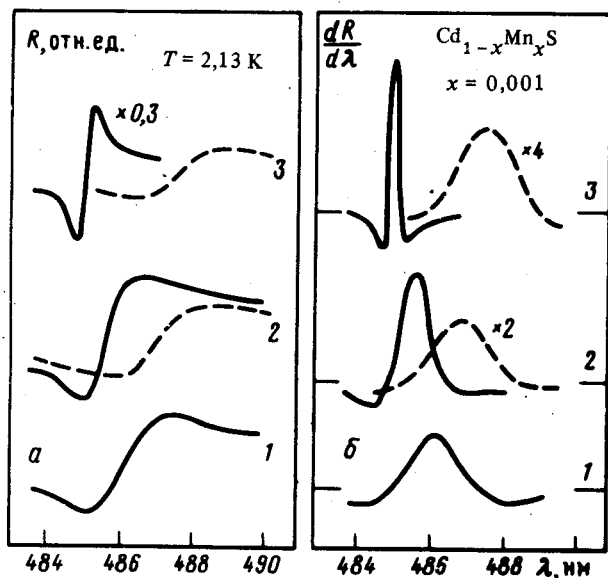


Рис. 1. Спектры отражения  $R$  (а) и спектры дифференциального отражения ( $dR/d\lambda$ ) (б)  $A$ -экситонного термина в  $\sigma^+$  (сплошная) и  $\sigma^-$  (пунктир)-поляризациях в магнитных полях: 1 –  $H = 0$  Т, 2 –  $H = 1$  Т, 3 –  $H = 5$  Т

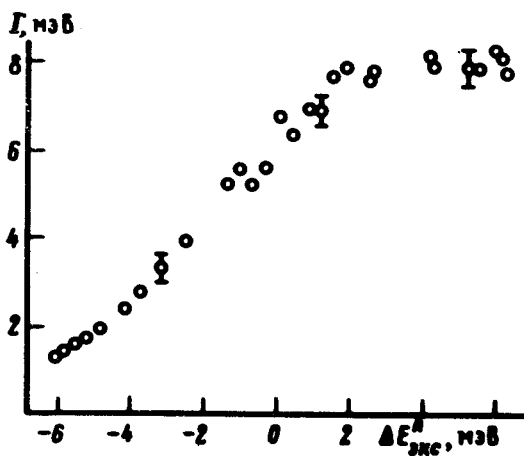


Рис. 2. Зависимость полуширины  $A$ -экситонного резонанса  $\Gamma$ , как функция сдвига экситонного термина относительно положения в нулевом магнитном поле

В работе <sup>7</sup> было показано, что  $p$ - $d$ -обменное взаимодействие в кристаллах  $Cd_{1-x}Mn_xS$  с  $x = 0,001$  почти в 15 раз превосходит  $s$ - $d$ -обменное взаимодействие. Разумно связать, поэтому, наблюдаемое нами изменение ширины экситонных резонансов с флуктуациями энергетического положения именно валентной зоны кристалла.

Природа сильного  $p$ - $d$ -обменного взаимодействия в МСП согласно <sup>10-11</sup> обусловлена гибридизацией  $3d$ -состояний Mn с состояниями валентной зоны кристалла. Валентная зона  $Cd_{1-x}Mn_xS$  образована из  $p$ -орбиталей серы. Что же касается  $3d$ -состояний Mn, то в результате внутриатомных корреляций эти состояния оказываются расщеплены на величину  $U \sim 5 - 7$  эВ <sup>11</sup>, при этом энергетическое положение занятых  $3d_+$ -состояний Mn совпадает с положением валентной зоны кристалла, в то время как незаполненные  $3d_-$ -орбитали расположены существенно выше края валентной зоны и попадают в запрещенную зону или зону проводимости полупроводника.

Спиновое расщепление валентной зоны возникает в результате гибридизации между  $p$ -состояниями серы и  $d_+$  и  $d_-$ -термами Mn. Константа  $p$ - $d$ -обменного взаимодействия записывается в следующем виде <sup>10</sup>:

$$J_{pd} = -2 |V_{pd}|^2 \left[ \frac{1}{\epsilon_p - \epsilon_d} + \frac{1}{\epsilon_d + U - \epsilon_p} \right], \quad (1)$$

здесь  $V_{pd}$  - матричный элемент  $p$ - $d$ -гибридизации,  $\epsilon_p$  - энергия края валентной зоны,  $\epsilon_d$  и  $\epsilon_d + U$  - энергии  $d_+$  и  $d_-$ -термов Mn в кристалле. Первый член в формуле (1) описывает гибридизацию  $p$ -состояний валентной зоны с заполненной оболочкой Mn ( $3d_+$ ), а второй - с пустыми  $3d_-$ -состояниями Mn.

Согласно оценкам, сделанным в <sup>11</sup> величина  $\epsilon_p - \epsilon_d$  в  $Cd_{1-x}Mn_xS$  составляет  $\sim 1,5$  эВ. В этом случае  $\epsilon_p - \epsilon_d \ll \epsilon_d + U - \epsilon_p$ , гибридизация с  $d_+$ -состояниями будет носить резонансный характер, а обменное взаимодействие будет обусловлено главным образом гибридизацией  $p$ -состояний с  $3d_+$ -состояниями Mn. В области больших магнитных полей все спины магнитной примеси поляризованы, при этом  $p\uparrow$ -состояния валентной зоны оказываются сильно возмущены флуктуациями обменного взаимодействия, поскольку они гибридизуются резонансным образом с  $d_+\uparrow$ -состояниями Mn. Уширение  $p\downarrow$ -состояний валентной зоны за счет флуктуаций обменного взаимодействия оказывается гораздо слабее, поскольку  $d\downarrow$ -состояниям отвечают незаполненные орбитали Mn, обменное взаимодействие с которыми ослаблено в силу большой величины знаменателя  $\epsilon_d + U - \epsilon_p$  в выражении (1). Резонансный характер  $p$ - $d$ -обменного взаимодействия таким образом является главной причиной как аномально большой величины  $p$ - $d$ -обменного взаимодействия в кристаллах  $Cd_{1-x}Mn_xS$  так и асимметрии этого взаимодействия относительно спиновых состояний валентной зоны.

#### Литература

1. Комаров А.В., Рябченко С.И., Терлецкий О.В. и др. ЖЭТФ, 1977, 73, 608.
2. Galazka R.R. Proc. 14-th Int. Conf. Phys. Semicond., Edinburgh, 1978, 133.
3. Brand N.V., Moshchalkov V.V. Adv. Phys., 1984, 33, 139.
4. Губарев С.И. ЖЭТФ, 1981, 80, 1174.
5. Абрамишвили В.Г., Губарев С.И., Комаров А.В., Рябченко С.М. ФТТ, 1984, 26, 1095.
6. Nawrocki M., Lascaray J.P., Coquillat D., Demianiuk M. Proc. Mat. Res. Soc., 1986, 89, 65.
7. Губарев С.И., Тяжлов М.Г. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 385.

8. *Gaj J.A., Ginter J., Galazka R.R.* Phys. Stat. Sol (b), 1978, 89, 655.
9. *Комаров А.В., Рябченко С.М., Семенов Ю.С., и др.* ЖЭТФ, 1980, 79, 1554.
10. *Bhattacharjee A.K., Fishman G., Coglein B.* Physica. B, 1983, 117, 118, 449.
11. *Su-Huai Wei, Zunger A.* Phys. Rev. B, 1987, 35, 2340.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
5 сентября 1988 г.