

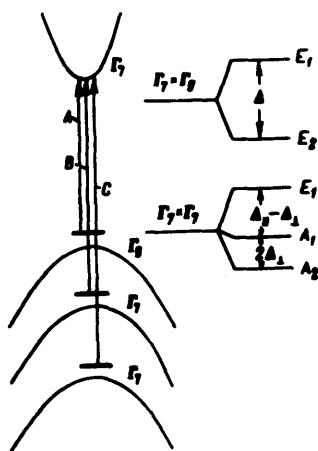
**ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДЕФОРМАЦИИ
НА ОПТИЧЕСКУЮ ОРИЕНТАЦИЮ ЭКСИТОНОВ
В КРИСТАЛЛАХ СО СТРУКТУРОЙ ВЮРЦИТА**

Г. Л. Бир, Г. Е. Лихус

В настоящей работе показано, что при оптической ориентации экситонов должен наблюдаться ряд новых эффектов, отличающих ее от оптической ориентации свободных носителей [1]. Эти эффекты связаны с тем, что в отличие от свободных носителей экситоны имеют целый спин, при этом существенную роль играет обменное расщепление. Поэтому поляризация экситонов может создаваться не только светом круговой поляризации, но и линейно поляризованным светом. Соответственно, будет происходить или ориентация, или выстраивание экситонов, аналогично тому, как это имеет место при оптическом возбуждении атомов в газах [2].

В свою очередь, при рекомбинации поляризованных экситонов в зависимости от их состояния возможно излучение света не только круговой, но и линейной поляризации, что невозможно при рекомбинации ори-

ентированных свободных или связанных носителей тока. Это создает возможность перекачки круговой поляризации экситонной люминесценции в линейную и наоборот под воздействием внешних полей: магнитного, электрического и деформации. Детали этих эффектов определяются симметрией кристалла и типом зонной структуры, от которых зависит характер расщепления оптически активного экситонного состояния под действием внешних полей. Мы рассмотрим эти эффекты на примере гексагональных кристаллов со структурой вюрцита, для которых спектр экситонов хорошо изучен и наблюдалась оптическая ориентация экситонов [3].



Зонная структура этих кристаллов изображена на рисунке, где показано так же обменное расщепление основного состояния экситонов $A(\Gamma_7 \times \Gamma_9)$ и $B, C(\Gamma_7 \times \Gamma_7)$.

Мы рассматриваем случай, когда и возбуждающий свет и излучение люминесценции распространяется вдоль гексагональной оси C . При этом оптически активным является только двукратно вырожденный терм E_1 , которому соответствуют состояния с проекцией момента экситона на ось C равной ± 1 . При возбуждении экситона светом круговой поляризации возбуждается одно из этих состояний, а линейно поляризованный свет возбуждает их суперпозицию.

Влияние магнитного поля. Зависимость ориентации экситонов от поперечного магнитного поля H определяется характером эффекта Зеемана. Для экситона $\Gamma_7 \times \Gamma_7$ эффект Зеемана квадратичен: расщепление уровня E_1 в магнитном поле $\delta E_H = 2|\gamma|H^2$, константа γ порядка $\mu_0^2 / (\Delta_{||} - \Delta_{\perp})$, где μ_0 — магнетон Бора, $\Delta_{||}$ и Δ_{\perp} — величины обменного расщепления (рисунок). Для экситона $\Gamma_7 \times \Gamma_9$ эффект Зеемана в поперечном магнитном поле отсутствует [4].

При возбуждении светом круговой поляризации в магнитном поле должно наблюдаться гашение круговой поляризации люминесценции и возникновение линейной поляризации. Если время жизни экситона в оптически активном состоянии τ_1 значительно короче времени спиновой релаксации и $\hbar/\tau_1 \ll \Delta_{||} - \Delta_{\perp}$, $\delta E_H \leq \Delta_{||} - \Delta_{\perp}$, то для эксито-

на $\Gamma_7 \times \Gamma_7$, эти эффекты определяются отношением $K = \delta E_{Hr_1} / \hbar$ и описываются формулами:

$$P_{\text{цирк}} = P_{\text{цирк}}^0 / (1 + K^2), \quad P_{\text{лин}} = P_{\text{цирк}}^0 K / (1 + K^2), \quad (1)$$

где $P_{\text{цирк}}^0$ степень круговой поляризации в отсутствии магнитного поля. При этом плоскость линейной поляризации составляет угол $\pi/4$ с направлением магнитного поля. Заметим, что при непрямом возбуждении экситонов при $g_e, h\mu_0 Hr/\hbar \gg 1$ необходимо учитывать уменьшение степени поляризации электронов и дырок за время связывания в экситон r . Для экситона $\Gamma_7 \times \Gamma_9$ уменьшение круговой поляризации определяется отношением $R = (g_e \mu_0 H / \Delta)^2 (1 + r_2/r_1)$, где r_2 — время жизни экситона в оптически неактивном состоянии E_2 . В сильных магнитных полях, когда $R \gg 1$, $P_{\text{цирк}}(H)$ не уменьшается до нуля, а стремится к величине $P_{\text{цирк}}$, которая зависит от условий возбуждения. При возбуждении светом круговой поляризации для экситона $\Gamma_7 \times \Gamma_9$ линейная поляризация люминесценции не возникает.

При возбуждении светом линейной поляризации в магнитном поле должно наблюдаться гашение линейной поляризации люминесценции и возникновение круговой поляризации. Для экситона $\Gamma_7 \times \Gamma_7$ эти эффекты зависят от угла χ между плоскостью поляризации света и направлением магнитного поля и определяются формулами

$$P_{\text{лин}}(H) = P_{\text{лин}}^0 \{ \cos^2 2\chi + \sin^2 2\chi / (1 + K^2) \}, \quad (2)$$

$$P_{\text{цирк}}(H) = P_{\text{лин}}^0 \{ \sin 2\chi K / (1 + K^2) \}.$$

При этом плоскость поляризации люминесценции в магнитном поле поворачивается по отношению к плоскости поляризации возбуждающего света на угол ϕ_0 :

$$\text{tg}^2 \phi_0 = \frac{\gamma}{|\dot{\gamma}|} \frac{K^2}{2} \sin 4\chi / (1 + K^2 \cos^2 2\chi). \quad (3)$$

Для экситона $\Gamma_7 \times \Gamma_9$ при возбуждении линейно поляризованным светом круговая поляризация люминесценции не возникает, а линейная поляризация в магнитном поле не изменяется.

Влияние деформации. Анизотропная поперечная деформация вызывает расщепление оптически активного состояния E_1 как для экситона $\Gamma_7 \times \Gamma_7$, так и для экситона $\Gamma_7 \times \Gamma_9$, что приводит к деформационным эффектам, отсутствующим для свободных носителей. Константа C , определяющая деформационное расщепление $\delta E_\epsilon = 2c\epsilon$, где $\epsilon^2 = (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + 4\epsilon_{xy}^2$, пропорциональна отношению обменного расщепления к расщеплению ближайших валентных зон Γ_9 и Γ_7 и в кристаллах A_2B_6 , где это отношение достигает 0,1, она может быть порядка 1 эв. При $\delta E_\epsilon / \Delta$, $\delta E_\epsilon / \Delta_{II} - \Delta_1 \ll 1$ деформационные эффекты для экситонов A , B и C одинаковы.

Поперечная деформация при возбуждении экситонов светом круговой поляризации вызывает гашение поляризованной по кругу и возбуждение люминесценции, линейно поляризованной в плоскости, лежащей под углом $\pi/4$ к главной оси тензора деформации. При возбуждении экситонов линейно-поляризованным светом деформация приводит к гашению линейно-поляризованной и возникновению поляризованной по кругу люминесценции. Эти эффекты определяются формулами (1) – (3), при этом $K = \delta E_{\epsilon} r_1 / \hbar$, а χ – угол между плоскостью поляризации и главной осью тензора деформации. Подобные эффекты могут также вызываться поперечным электрическим полем, аналогично тому, как это имеет место при люминесценции в газах [2]. Указанные эффекты можно наблюдать на кубических кристаллах, деформированных по (100) или (111) направлениям, при этом изменяя знак деформации можно менять расположение зон Γ_9 и Γ_7 .

Отметим, что приведенные выше формулы непосредственно применимы к экситонам, связанным на заряженных донорах или акцепторах или нейтральных ловушках. На свободных экситонах указанные выше эффекты также должны наблюдаться, однако для них количественная теория должна учитывать аннигиляционное взаимодействие, приводящее к дополнительному расщеплению термов в случае, когда волновой вектор экситона $q \parallel C$.

Круговая поляризация люминесценции свободных экситонов $\Gamma_9 \times \Gamma_7$ наблюдалась в n -CdSe [3], при этом эффект Ханле не наблюдался в полях до 10 кэ . Это может быть объяснено тем, что экситоны образовывались связыванием пар и в n -материале ориентированными были только дырки. Как показывает расчет, в этом случае $P_{\text{цирк}}(H)$ не зависит от магнитного поля и равна степени ориентации дырок, если при связывании экситона не происходит изменения степени их ориентации.

Авторы благодарят В.И.Переля и М.И.Дьяконова за полезные обсуждения.

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

Поступила в редакцию
15 мая 1972 г.

Литература

- [1] М.И.Дьяконов, В.И.Перель. ЖЭТФ, 60, 1955, 1971; А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 12, 293, 1970; Б.П.Захарченя, В.Г.Флейшер, Р.И.Джоев, Ю.Вешунов, И.Б.Русанов. Письма в ЖЭТФ, 13, 4, 1971.
- [2] M.Lonbardi. Compt. Rend., 265, B191, 1967; J. de Phys (Paris), 30, 631, 1969; O.Nedelec, P.Baltayen, A.Orizet. Compt. Rend., 265, B542, 1967.
- [3] Е.Ф. Гросс, А.И.Екимов, Б.С.Разбирин, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 14, 108, 1971.
- [4] D.G.Thomas, I.I.Hopfield. Phys. Rev., 128, 2135, 1962; Г.Л.Бир, Б.С.Разбирин, И.Н.Уральцев. ФТТ, 14, 433, 1972.
- [5] D.W.Langer, R.N.Euwema, K. Era, T.Koda. Phys. Rev., B2, 4005, 1970; Г.Л.Бир, Г.Е.Пикус, Л.Г.Суслина, Д.Л.Федоров, Е.Б.Шадрин. ФТТ, 13, 3551, 1971.