

ОПТИЧЕСКАЯ ОРИЕНТАЦИЯ СВОБОДНЫХ И СВЯЗАННЫХ ЭКСИТОНОВ В ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Е. Ф. Гросс, А. И. Екимов, Б. С. Разбирин,
В. И. Сафаров

Недавно было показано [1 - 3], что при межзонных переходах в полупроводниках, вызванных поглощением циркулярно поляризованного света может быть осуществлена оптическая ориентация магнитных моментов носителей относительно направления распространения возбуждающего света. Применение метода оптической ориентации в оптике полупроводников оказывается весьма полезным и позволяет в частности определять такие параметры, как время жизни и время спиновой релаксации свободных электронов, [4] исследовать особенности спиновой релаксации "горячих" электронов [5 - 7] и т. д. Однако до сих пор исследования оптической ориентации проводились только на кристаллах кубической симметрии. В этих кристаллах, вследствие вырождения валентной зоны в точке $k = 0$, происходит сильная спиновая релаксация дырок, [6] и поэтому удавалось наблюдать только ориентацию электронов. В данной работе сообщается об обнаружении оптической ориентации электронов и дырок связанных в экситон в гексагональных кристаллах селенида кадмия. При этом, в отличие от кубических кристаллов, обнаружена анизотропия оптической ориентации и отсутствие деполяризации в поперечном магнитном поле.

По сравнению с кубическими кристаллами, анизотропное кристаллическое поле в гексагональных кристаллах приводит к снятию вырождения в точке $k = 0$ и расщеплению верхней валентной зоны Γ_8 на две подзоны Γ_9 и Γ_7 [8] (см. рис. 1). Рассмотрение правил отбора показывает, что оптическая ориентация магнитных моментов носителей при переходах из *верхней* валентной подзоны Γ_9 в зону проводимости Γ_7 может осуществляться только при возбуждении циркулярно поляризованным светом вдоль гексагональной оси C кристалла. Степень ориентации носителей

$$P = \left| \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-} \right|$$
 (где n_+ и n_- - число

носителей с магнитным моментом направленным по и против направления распространения света) при таких переходах будет составлять $P = 1$. При распространении возбуждающего света перпендикулярно оси кристалла, переходы $\Gamma_9 - \Gamma_7$ разрешены только для линейной поляризации света с $E \perp C$ и поглощение света не будет приводить к ориентации моментов носителей.

Переходы из *двух* валентных подзон Γ_9 и Γ_7 в зону проводимости будут осуществляться при поглощении света с энергией квантов $E_g^B < h\nu < E_g^C$. В случае, когда $\Delta_{cr} \ll \Delta_{so}$ (где Δ_{cr} и Δ_{so} - кристаллическое и спинорбитальное расщепление валентной зоны) и возбуждение осуществляется из глубины валентных подзон Γ_9 и Γ_7 , степень ориентации носителей, создаваемых циркулярно поляризованным

светом распространяющимся вдоль оси кристалла, будет равна 0,5, как для кубических кристаллов. Однако при низких температурах, вследствие межзонной термализации дырок, люминесценция будет обусловлена переходами из зоны проводимости в верхнюю валентную подзону Γ_9 . Циркулярная поляризация люминесценции будет иметь место только при наблюдении вдоль оси кристалла. При этом степень

поляризации $S = \left| \frac{I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}}{I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-}} \right|$ (где I_{σ^+} и I_{σ^-} — интенсивность право

и левциркулярно поляризованного света) будет равна степени ориентации носителей $S = P$ (в отличие от кубических кристаллов, где $S = 0,5P$). Наличие ориентации магнитных моментов свободных носителей при определенных условиях может приводить к ориентации магнитного момента экситона.

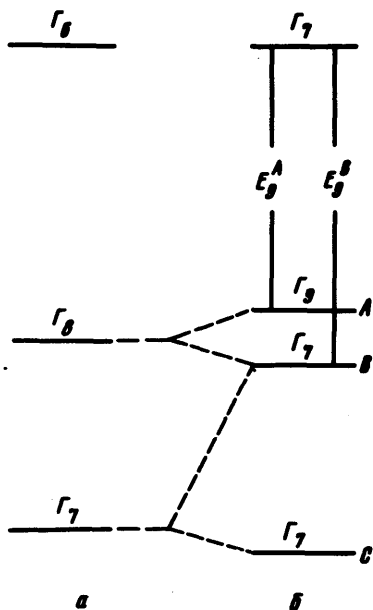


Рис. 1. Расщепление валентной зоны в кубических *a* и гексагональных *б* кристаллах при $k = 0$

Исследования оптической ориентации экситонов в кристаллах селенида кадмия проводились при $T = 4,2^\circ\text{K}$ и при $T = 77^\circ\text{K}$. Возбуждение люминесценции осуществлялось циркулярно поляризованным светом He-Ne лазера с энергией $h\nu = 1,96 \text{ эв}$. При этом возбуждались носители из глубины обеих валентных подзон Γ_9 и Γ_7 (в кристаллах CdSe при $T = 4,2^\circ\text{K}$ $E_9^A = 1,841 \text{ эв}$ и $E_9^B = 1,868 \text{ эв}$).

При $T = 77^\circ\text{K}$ люминесценция кристаллов CdSe обусловлена главным образом аннигиляцией свободных экситонов, связанных с верхней валентной подзоной Γ_9 . Спектры отражения *a* и люминесценции *b* кристаллов, исследованных в этой работе приведены на рис. 2. При возбуждении циркулярно поляризованным светом вдоль оси кристалла нами была обнаружена циркулярная поляризация экситонной люминесценции. Степень поляризации составляла $S = 0,09 \pm 0,02$. Как и следовало ожидать, при возбуждении перпендикулярно оси кристалла циркулярной поляризации люминесценции не наблюдалось.

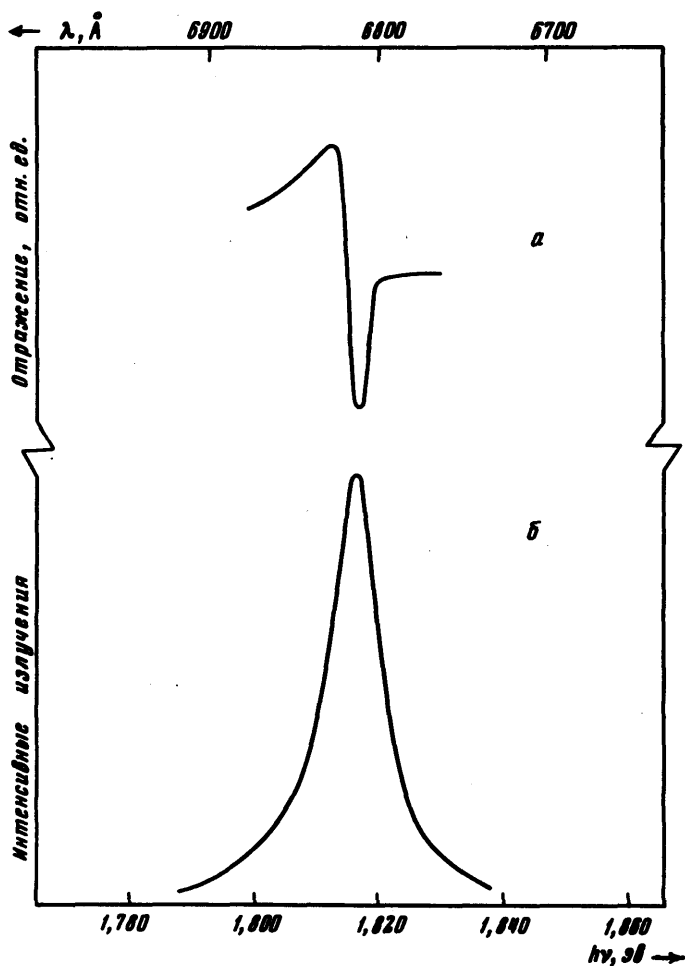


Рис. 2. Спектры отражения *a* и люминесценции *b* кристаллов исследованных в данной работе при $T = 77^\circ\text{K}$

Внешнее магнитное поле, направленное перпендикулярно направлению распространения возбуждающего света, в кубических кристаллах приводит к деполаризации люминесценции, вследствие прецессии спинов (аналог эффекта Ханле) [2, 3]. Необходимая для деполаризации величина магнитного поля определяется временем жизни спина и вели-

чиной g -фактора электрона и для кубических кристаллов была порядка 1 – 1000 гаусс [2, 3]. Однако в наших опытах с гексагональными кристаллами магнитное поле напряженностью вплоть до 10 Кгс не приводило к сколько нибудь заметной деполяризации люминесценции. Это обусловлено по-видимому тем, что в данном случае ориентированными являются не свободные электроны, а экситоны. Действительно, в экситоне магнитные моменты электрона и дырки связаны по направлению¹⁾, и ориентированным оказывается суммарный магнитный момент экситона. Однако в гексагональных кристаллах, как и в деформированных кубических [9], g -фактор дырки, а следовательно и экситона (при сильном обменном взаимодействии) имеет сильную анизотропию и в направлении, перпендикулярном оси кристалла, равен 0. Поскольку в наших опытах возбуждение и наблюдение люминесценции осуществлялось вдоль оси кристалла, а магнитное поле было направлено перпендикулярно оси, оно не приводило к прецессии магнитного момента экситона т. к. $g_1^3 = 0$. Таким образом становится понятным отсутствие эффекта Ханле на экситонах в гексагональных кристаллах.

Остановимся кратко на результатах, полученных для связанных экситонов. При $T = 4,2^\circ\text{K}$ в люминесценции доминирует линия, обусловленная аннигиляцией экситонов, связанных на нейтральном доноре (линия J_2). При возбуждении циркулярно поляризованным светом нами также была обнаружена циркулярная поляризация этой линии. Степень поляризации $S = 0,14 \pm 0,02$. Поскольку для экситона, связанного на нейтральном доноре, магнитный момент системы обусловлен нескомпенсированным магнитным моментом дырки, в данном случае осуществляется оптическая ориентация дырок. Это подтверждается отсутствием эффекта Ханле на этой линии. Таким образом в гексагональных кристаллах оказалось возможным наблюдение оптической ориентации дырок. В кубических кристаллах ориентация дырок не наблюдается вследствие их быстрой спиновой релаксации, обусловленной вырождением валентной зоны в точке $k = 0$ [6]. Однако снятие вырождения валентной зоны при одноосной деформации кубических кристаллов приводит к существенному замедлению спиновой релаксации дырок [10]. В гексагональных же кристаллах вырождение валентной зоны снято анизотропным кристаллическим полем. Таким образом наблюдение оптической ориентации дырок в гексагональных кристаллах оказалось возможным по-видимому из-за медленной спиновой релаксации дырок вследствие отсутствия вырождения валентной зоны в точке $k = 0$.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Е.Пикусу и Г.Л.Бирю за полезные обсуждения.

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

Поступила в редакцию
22 июня 1971 г.

¹⁾ В оптических переходах разрешенными являются только пара-экситоны.

Литература

- [1] G.Lampel. Phys. Rev. Lett., 20, 491, 1968.
- [2] R.R.Parsons. Phys. Rev. Lett., 23, 1152, 1969.
- [3] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 12, 293, 1970.
- [4] Д.З.Гарбузов, А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 13, 36, 1971.
- [5] А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, 13, 251, 1971.
- [6] М.И. Дьяконов, В.И.Перель. ЖЭТФ, 60, вып. 5, 1971.
- [7] Б.П.Захарченя, В.Г.Флейшер и др. Письма в ЖЭТФ, 13, 195, 1971.
- [8] Физика и химия соединений $A^{II}B^{VI}$. Изд-во Мир, стр. 261.
- [9] G.E.Pikus. Phys. Rev. Lett., 6, 103, 1961.
- [10] G.L.Bin, S.G.E.Pikus. Proc VIIth Internat. Conf. on the Phys. of Semiconductors. Paris, стр 789, 1964.