

ТОНКАЯ СТРУКТУРА УРОВНЕЙ СВЯЗАННОГО ЭКСИТОНА И МНОГОЭКСИТОННЫХ КОМПЛЕКСОВ В ГЕРМАНИИ

Г.Е.Пикус, Н.С.Аверкиев

Предложена модель, объясняющая тонкую структуру экситона, связанного на нейтральном доноре в германии, обнаруженную недавно в [1]. Указанное расщепление уровней объясняется тем, что в германии, в отличие от кремния, наряду с орбитально-долинным взаимодействием существенную роль играют также обменно-долинное и кристаллическое расщепления.

Для описания состояний связанного экситона и многоэкситонных комплексов (СМЭК) в настоящее время используется одноэлектронная модель, получившая в теории СМЭК [2] название оболочечной модели. В соответствии с [2] электроны в СМЭК в германии последовательно заполняют состояния Γ_1 и Γ_5 ND, расщепленные в результате орбитально-долинного взаимодействия на величину Δ . Основным состоянием для связанного экситона NDE₁ является состояние $\Gamma_1 \times \Gamma_1$, в возбужденных состояниях $\Gamma_1 \times \Gamma_5$ и $\Gamma_5 \times \Gamma_5$ один или два электрона заполняют состояние Γ_5 . Недавно в работах [1] была обнаружена тонкая структура состояния $\Gamma_1 \times \Gamma_5$.

Ранее в работе [3], выполненной при участии одного из авторов настоящей статьи, было высказано предположение о том, что одно- и двухдолинные двухэлектронные состояния должны отличаться по энергии подобно тому, как это имеет место для двухзарядных состояний D^- [4]. Причиной этого обменно-долинного расщепления является уменьшение кулоновского взаимодействия двухдолинных состояний из-за сильной анизотропии эффективных масс в каждой долине, приводящей к соответствующей анизотропии волновых функций электронов.

При учете обменно-долинного расщепления энергия состояния $\Gamma_1 \times \Gamma_1$ равна:

$$E = \frac{1}{2} \left[(\delta - 2\Delta) - 2 \left(\Delta^2 + \frac{\delta^2}{4} + \frac{\Delta\delta}{2} \right)^{1/2} \right]. \quad (1)$$

Состояние $\Gamma_1 \times \Gamma_5$ должно расщепляться на два терма Γ_5^c и Γ_5^a с энергиями

$$E_c = -\Delta + \frac{1}{2} \left[(\delta + \Delta) - (\Delta^2 + \delta^2)^{1/2} \right], \quad (2)$$

$$E_a = -\Delta.$$

Нижним является антисимметризованное состояние Γ_5^a , не содержащее однодолинных функций.

Состояние $\Gamma_5 \times \Gamma_5$ расщепляется на четыре терма: Γ_5^c , Γ_4^a , Γ_1^c , Γ_3^c с энергиями:

$$E_{\Gamma_3^c} = 0; \quad E_{\Gamma_4^a} = 0; \quad E_{\Gamma_5^c} = \frac{1}{2} [(\delta - \Delta) + (\Delta^2 + \delta^2)^{1/2}], \quad (3)$$

$$E_{\Gamma_1^c} = \frac{\delta}{2} - \Delta + \left(\Delta^2 + \frac{\delta^2}{4} + \frac{\Delta\delta}{2} \right)^{1/2}.$$

Здесь δ — разность энергий двухдолинного и однодолинного состояний.

Для всех симметризованных состояний полный спин электронов $s = 0$, для антисимметризованных $S = 1$ и $S_z = 0, \pm 1$. Как известно, состояние дырки Γ_8 свободного экситона из-за анизотропии волновой функции электрона расщепляется на два терма с моментами $J_z = \pm 3/2$, $J_z = \pm 1/2$, ось z' направлена вдоль главной оси соответствующего экстремума. Величина кристаллического расщепления $\Delta_{cr} = E_{\pm 3/2} - E_{\pm 1/2}$ для свободного экситона в германии составляет около 1 мэВ [5]. Кристаллическое расщепление должно приводить также к расщеплению состояний $\Gamma_{5(4)} \times \Gamma_8 = \Gamma_6 + \Gamma_7 + 2\Gamma_8$ и $\Gamma_3 \times \Gamma_8 = \Gamma_6 + \Gamma_7 + \Gamma_8$ связанного экситона в СМЭК и частичному смешиванию одинаковых представлений, произошедших из разных термов.

Схема расщепления уровней NDE_1 с учетом орбитально-долинного, обменно-долинного и кристаллического расщеплений показана на рис.1. На этом рисунке указана энергия соответствующих состояний, рассчитанная в приближении $\delta, \Delta_{cr} \ll \Delta$, для состояний $\Gamma_5 \times \Gamma_5$ также предполагалось, что $\Delta_{cr} \ll \delta$. Если эти условия не выполняются, то трех-

кратно вырожденные состояния $\Gamma_6^a + \Gamma_7^a$, $\Gamma_6^c + \Gamma_7^c$ и Γ_8^c расщепляются на три терма. Заметим, что учет только кристаллического расщепления при Δ_{cr} сравнимом с Δ и $\delta = 0$, также приводит к расщеплению состояний $\Gamma_1 \times \Gamma_5 \times \Gamma_8$ на шесть термов и $\Gamma_5 \times \Gamma_5 \times \Gamma_8$ на девять термов.

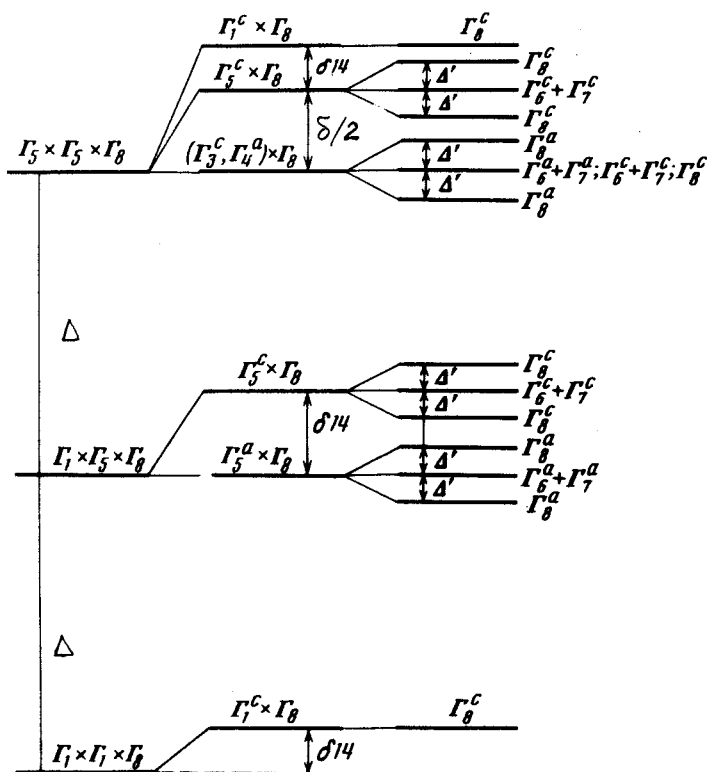


Рис.1. Схема расщепления уровней экситона, связанного на ND в германии. $\Delta' = \Delta_{cr} / 2$

Правила отбора для NP переходов для свободных экситонов в германии совпадают с правилами отбора для LA -линии и определяются табл. 1 работы [5], отличаясь лишь заменой констант λ и η на $\bar{\lambda}$ и $\bar{\eta}$. Для LA -линий связанного экситона правила отбора не зависят от состояния и совпадают с правилами отбора для свободного экситона (усредненными по всем четырем долинам). Для NP -линий правила отбора, как и в кремнии [6], различны для состояний Γ_1 и Γ_5 . На рис. 2 указана относительная интенсивность переходов из расщепленных состояний NDE_1 в состоянии Γ_1 и Γ_5 ND и переходов из основного состояния NDE_2 в состояние NDE_1 также наблюдавшихся в [1]. При этом предполагалось, что нижним уровнем NDE_2 является состояние электронов $\Gamma_1 \times \Gamma_1 \times \Gamma_5$ и состояние дырок Γ_1 с полным моментом $J = 0$.

При переходах через ближайшую зону $\Gamma_2' \cdot \bar{\eta} = \lambda'$ и $\eta = \lambda'$ [5]. Отношение $(\bar{\eta} - \lambda') / \bar{\eta}$ должно быть малым не только из-за увеличения энергетического знаменателя при переходах через более далекие зоны, но также и потому, что эти переходы связаны с рассеянием электронов Γ_2' ,

или Γ_{15} в L -точку на потенциале примеси. Волновые функции для всех представлений, кроме Γ_1 и Γ_2' , равны нулю в центре иона, где его потенциал максимален. Поэтому NP -переходы с рекомбинацией электрона Γ_5 и дырки Γ_8 практически запрещены и указанные переходы наблюдались в [1] только в LA спектрах поглощения.

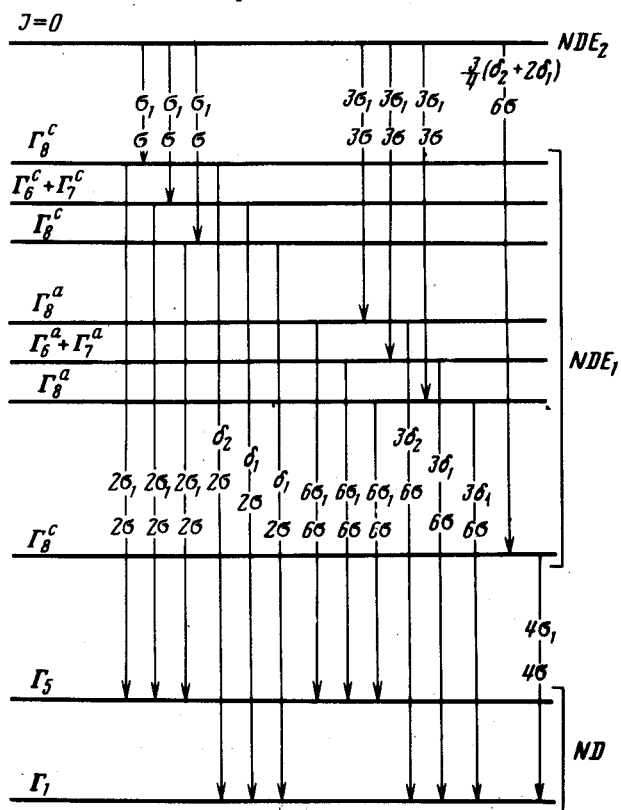


Рис.2. Схема NP - и LA -переходов $NDE_2 (J = 0) \rightarrow NDE_1 \rightarrow ND$ в гер-

$$\text{мании: } \sigma_1 = \frac{8}{27} (2\bar{\eta} + \bar{\lambda})^2 \quad \delta_1 = \frac{4}{27} (\bar{\eta} - \bar{\lambda})^2 \left(1 + \frac{5 + \sqrt{27}}{3}\right);$$

$$\delta_2 = \frac{4}{27} (\bar{\eta} - \bar{\lambda})^2 \left(1 + \frac{5 - 2\sqrt{27}}{3}\right); \quad \sigma = \sigma_{LA} = \frac{2}{9} (2\eta^2 + \lambda^2)$$

В соответствии с рис.1 состояние $\Gamma_5 \times \Gamma_5' \times \Gamma_8$ NDE_1 в германии должно расщепляться на шесть подуровней. В работах [1] наблюдались четыре уровня для мышьяка и пять для фосфора.

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

Поступила в редакцию
28 июня 1980 г.

Литература

- [1] A.E.Mayer, E.C.Lightowers. J. Phys. C12, L507, L539, L945, 1979.
[2] G.Kirczenow. Solid Stat. Comm., 21, 713, 1977; Canad. J. Phys., 55, 1787, 1977.

- [3] П.Д.Алтухов, Е.Н.Ельцов, Г.Е.Пикус, А.А.Рогачев. Письма в ЖЭТФ, 26, 468, 1977.
- [4] S.Narita, M.Taniguchi. Phys. Rev. Lett., 35, 1095, 1975; 36, 913, 1976.
- [5] В.М.Аснин, Г.Л.Бир, Ю.Н.Ломасов, Г.Е.Пикус, А.А.Рогачев. ЖЭТФ, 71, 1600, 1976.
- [6] Г.Е.Пикус. ФТТ, 19, 1653, 1977.
-