

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКСИТОНОВ НА ЭКСИТОННЫЕ СПЕКТРЫ

А. А. Гоголин, Э. И. Рашба

Рассмотрено поглощение света, сопровождающееся превращением экситонов в биекситоны. Показано, что оно обладает гигантской силой осциллятора.

1. Взаимодействие экситонов может приводить к их агрегации в биекситоны [1], полиэкситоны [2] и капли [3]. Эти объекты интенсивно изучаются (обзоры см. в [4]), преобладающий тип агрегатов определяется детальным видом зонной структуры полупроводника. Однако из-за сложности ситуации и одновременного сосуществования различных агрегатов сопоставление отдельных полос определенным типам агрегатов в ряде случаев остается пока неоднозначным.

Постановка эксперимента при исследовании агрегатов обычно такова, что полное число экситонов либо остается неизменным (инфракрасное поглощение, рассеяние света на каплях и др.), либо убывает на единицу (люминесценция). Между тем, по-видимому, очень полезным может оказаться исследование переходов, при которых полное число экситонов возрастает и в результате фотоперехода образуются более сложные комплексы. По существу речь при этом идет о специальном типе индуцированного поглощения; родственные эффекты уже изучались [5]. Однако очень

существенно, что именно для экситонных переходов это поглощение должно характеризоваться двумя важными особенностями: оно может иметь четкую структуру и должно обладать гигантской силой осциллятора. Рассмотрению этих особенностей и посвящена настоящая статья. Попутно оценивается вероятность излучательной рекомбинации биэкситонов.

2. Рассмотрим сначала полупроводник с прямыми разрешенными переходами, в котором у двух экситонов существует связанное состояние (с энергией связи E_b), отвечающее биэкситону. Тогда при наличии в кристалле экситона с импульсом K возможно поглощение света, при котором рождающийся экситон оказывается связанным с исходным экситоном, т. е. поглощение света приводит к превращению экситона в биэкситон с тем же импульсом K . Если $E_b \ll R$, где R — экситонный ридберг, то можно считать, что экситоны мало деформируются при объединении в биэкситон, и выразить силу осциллятора для рассматриваемого процесса f_b (в расчете на один экситон), через силу осциллятора f_{ex} обычного экситонного поглощения (в расчете на одну элементарную ячейку):

$$f_b = \frac{2}{v} \left| \int d^3r \Phi(r) \exp(iKr/2) \right|^2 f_{ex}. \quad (1)$$

Здесь $\Phi(r)$ — функция внутреннего движения в биэкситоне, а v — объем элементарной ячейки. Если еще считать взаимодействие между экситонами короткодействующим и воспользоваться дейтоновым приближением, то получим

$$f_b(K) = \frac{f_b(0)}{[1 + (K/2\kappa)^2]^2}, \quad f_b(0) = \frac{16\pi}{v\kappa^3} f_{ex}, \quad (2)$$

где $\kappa = \sqrt{mE_b}/\hbar$ — обратный радиус биэкситона, m — масса экситона.

Поскольку при обычных $E_b \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ эв имеем $v\kappa^3 \ll 1$, то $f_b(0) \gg f_{ex}$, т. е. сила осциллятора велика. Природа этого эффекта точно такая же, как для примесных экситонов [6], и поэтому, основываясь на существующих экспериментальных данных, можно ожидать $f_b \sim 10$ и малых времен радиационной рекомбинации $\tau \sim 10^{-9}$ сек.

Единственное существенное отличие от примесных экситонов состоит в том, что частота перехода содержит слагаемое $\hbar^2 K^2 / 2m$, которое приводит к уширению полосы поглощения, сдвигая ее максимум в низкочастотную сторону по отношению к порогу. Контур полосы описывается формулой

$$\sigma \propto \frac{\sqrt{\Omega}}{[1 + \Omega/E_b]^2} \exp\{-2\Omega/T\}, \quad (3)$$

$$\Omega = \omega_{пор} - \omega > 0, \quad \omega_{пор} = E_g - R - E_b.$$

При $T \ll E_b$ наблюдение этой полосы должно позволить определить E_b , причем благодаря высоким значениям f_b такие измерения возможны

при относительно невысоких концентрациях экситонов. Сопоставление со спектрами люминесценции должно позволить надежно выделить спектр биэкситонов.

3. При непрямых переходах аналогичный эффект отсутствует. Однако в кристаллах с непрямыми переходами могут существовать дополнительные экстремумы, отвечающие прямым переходам, как это имеет место в Ge. Тогда возможно фоторождение прямого экситона вблизи термализованного непрямого с образованием из них биэкситона. Сила осциллятора такого перехода также будет гигантской и будет описываться формулой, лишь незначительно отличающейся от (2) (в основном из-за различия масс экситонов).

Ситуация должна быть особенно интересной, если подтвердится концепция полиэкситонов [2], согласно которой в многодолинных кристаллах энергия связи прогрессивно растет по мере увеличения N — числа содержащихся в нем экситонов. В этом случае ширина полосы поглощения, отвечающей "достройке" полиэкситона за счет прямого экситона, должна быть мала ($\sim N^{-1}$) из-за большой массы полиэкситона.

Таким образом, в кристаллах с непрямыми переходами можно ожидать обнаружения агрегатов, которые отсутствуют в условиях квазиравновесия. Поскольку капли не могут порождать рассматриваемых здесь структурных спектров, эти спектры могут быть полезны для изучения состава квази-равновесной фазы.

4. Отметим в заключение, что кроме поглощения, связанного с переходами на дискретный уровень биэкситона, существует поглощение, отвечающее переходам в непрерывный спектр системы двух экситонов. Оно также содержит большой фактор $(\kappa^3 v)^{-1} \gg 1$, и, кроме того, расходится как $[\omega - (E_g - R)]^{-2}$ вблизи частоты, соответствующей рождению свободного экситона (в обе стороны от этой частоты). Хотя расходимость обрезается затуханием экситонов и поляритонным эффектом, интенсивность тем не менее велика. Точно так же велика вероятность обратного процесса — столкновительного высвечивания.

Институт теоретической физики
им. П.Д.Ландау
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
17 мая 1973 г.

Литература

- [1] С.А.Москаленко. ЖОС, 5, 147, 1958; M. A. Lampert. Phys. Rev. Lett., 1, 450, 1958.
- [2] J. Shy-Yin Wang, C. Kittel. Phys. Lett., 42A, 189, 1972.
- [3] Л.В.Келдыш. Труды 9-й Междунар. конф. по физике полупроводников, М., 1968 (изд. Наука, Ленинград 1968).
- [4] С.Никитин, Х.Хакен. Изв. АН СССР, сер. физ., 37, 220, 1973; А.А.Рогачев. Изв. АН СССР, сер. физ., 37, стр. 227, 1973; Ya Pokrovsky. Proc. 11-th Intern. Conf. on Phys. of Semiconductors, Warsaw 1972. Vol. 1, p. 69; C. Benoit a la Guillaume, ibid. p. 659.

- [5] С.М.Рывкин, А.А.Гринберг, Н.И.Крамер. ФТТ, 7, 2195, 1965;
D. W. Langer, T. Gote. Proc. 11-th Intern. Conf. on Phys. of Se-
miconductors, Warsaw 1972. Vol. 1, p. 705.
- [6] Э.И.Рашба, Г. Э.Гургенишвили. ФТТ, 4, 1029, 1962.
-