

ЭКСИТОННАЯ МОЛЕКУЛА, СВЯЗАННАЯ НА НЕЙТРАЛЬНОМ АКЦЕПТОРЕ, В ГЕКСАГОНАЛЬНОМ КРИСТАЛЛЕ CdS

Б.С.Разбирин, Д.К.Нельсон

*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН
194021, Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 26 августа 1992 г.

В спектрах люминесценции сильно возбужденного кристалла CdS обнаружена новая линия излучения, которая интерпретирована как излучательный распад экситонной молекулы, связанной на нейтральном акцепторе.

Взаимодействие между экситонами в плотном экситонном газе при определенных условиях приводит к образованию экситонной молекулы – биэкситона. К настоящему времени имеются убедительные доказательства их существования в целом ряде прямозонных кристаллов, в том числе и в CdS. В сильно возбужденном полупроводнике могут возникать и биэкситоны, связанные на примесных центрах, образовываться многоэкситонные примесные комплексы. Такого рода комплексы наблюдались в непрямых полупроводниках, например, в Ge и Si ¹. В то же время для прямозонных полупроводников вопрос существования многоэкситонных примесных комплексов остается открытым.

Следует отметить, что согласно принципа Паули, электроны (дырки), входящие в многоэкситонный примесный комплекс, не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии, и поэтому для прямозонных полупроводников с невырожденными зонами только одна пара электронов (дырок) может находиться в низшем энергетическом состоянии. Для непрямых полупроводников типа Ge и Si это ограничение снимается из-за наличия нескольких долин в зоне проводимости, так что электроны, входящие в комплекс, находятся в низшем энергетическом состоянии, но располагаются в различных долинах. Для прямозонных полупроводников ограничения, накладываемые принципом Паули, приводят к тому, что третий, четвертый и т. д. входящий в многоэкситонный примесный комплекс электрон (или дырка) должен находиться в возбужденном состоянии. Вопрос энергетической устойчивости таких комплексов требует дополнительного анализа.

Рассмотрим структуру экситонно-примесных комплексов в гексагональных кристаллах A_2B_6 . Комплекс D^0X -экситон, связанный на нейтральном доноре, представляет собой положительно заряженный центр, около которого находятся два электрона и одна дырка. Схематически он изображен на рис.1(1)). В работе ² было показано, что в гексагональном кристалле CdS входящая в комплекс дырка может находиться не только в основном $1S$ -состоянии, но и в возбужденном $2P$ - или $3D$ -состоянии (имеются в виду именно возбужденные состояния дырки, а не возбужденные состояния экситона в целом). Энергия активации этих состояний составляет величину порядка нескольких мэВ и они, следовательно, устойчивы при низких температурах. У комплекса A^0X -экситона, связанного на нейтральном акцепторе, имеются неподвижный отрицательно заряженный центр, две дырки и электрон (см. рис.1(2)). Если теперь представить себе, что к такому комплексу присоединился еще один экситон, то получится комплекс, изображенный на рис.1(3). Обведенную

пунктиром часть комплекса можно рассматривать как неподвижный положительно заряженный центр, и, соответственно, весь комплекс можно считать аналогичным экситону, связанному на нейтральном доноре, с тем только отличием, что только две дырки могут находиться в основном $1S$ -состоянии, а третья должна быть в упомянутом выше возбужденном $2P$ - или $3D$ -состоянии. С другой стороны этот комплекс представляет собой биэкситон, связанный на нейтральном акцепторе, поэтому обозначим его A^0M .

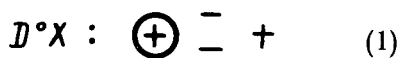


Рис.1

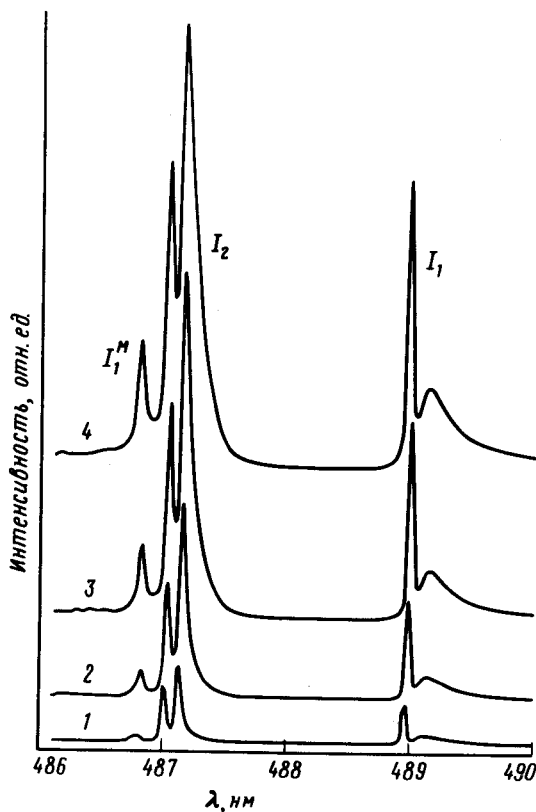
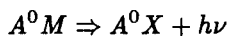


Рис.2

Рис.1. Схемы строения экситонно-примесных комплексов

Рис.2. Спектры люминесценции кристалла CdS. Плотность возбуждения, Вт/см²: 1 - 200, 2 - 500, 3 - 1000, 4 - 2000

Рассмотрим теперь излучательный переход



и оценим энергию соответствующего кванта. При аннигиляции одного из входящих в комплекс экситонов освобождается энергия

$$h\nu = E_g - R - E_b - \Delta E,$$

где E_g - ширина запрещенной зоны, R - экситонный ридберг, E_b - энергия связи экситона на примесном центре, ΔE - разность энергии $2P$ - (или $3D$ -)

и 1S-состояний дырки. Если предположить, что в силу упомянутой выше аналогии энергия связи присоединенного к комплексу A^0X экситона примерно равна энергии связи экситона на нейтральном доноре ($\approx 6 \div 7$ мэВ для CdS) и учесть, что ΔE , как указывалось выше, имеет величину порядка нескольких мэВ, то можно ожидать появления в спектре люминесценции линии, соответствующей переходу $A^0M \Rightarrow A^0X + h\nu$, в окрестности хорошо известной линии I_2 . В данной работе сообщается об обнаружении в спектре люминесценции сильно возбужденного кристалла CdS новой линии излучения, которая может быть интерпретирована как излучательный распад биэкситона, связанного на нейтральном акцепторе.

В работе исследовались спектры люминесценции чистых (специально не легированных) монокристаллов CdS. Образцы представляли собой кристаллические пластинки толщиной порядка 10 мкм с осью C , лежащей в плоскости пластинки. Для возбуждения люминесценции использовалось излучение азотного ($\lambda = 337,1$ нм) и аргонового ($\lambda = 476,5$ нм) лазеров. Исследования проводились при температуре жидкого гелия ($T = 2$ К).

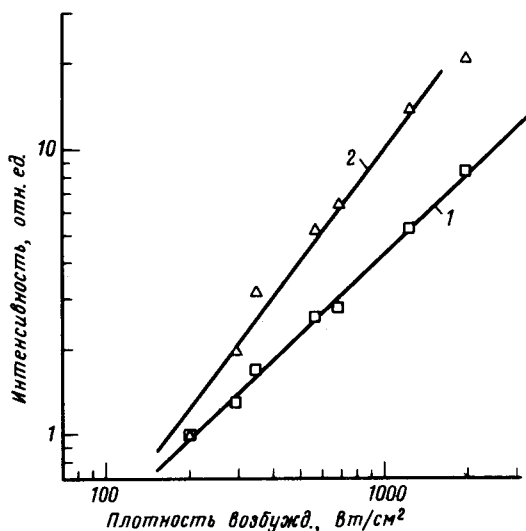


Рис.3. Зависимость интенсивности линий люминесценции кристалла CdS от плотности накачки: 1 — линия I_1 , 2 — линия I_1^M

Спектры люминесценции одного из исследованных образцов при возбуждении азотным лазером приведены на рис.2. На рисунке видно, что при повышении плотности возбуждения в спектре люминесценции разгорается новая, отсутствующая в спектрах слабого возбуждения, линия излучения, длина волны которой $\lambda \approx 486,8$ нм. Эта линия отчетливо видна в спектре при плотности возбуждения $P \approx 10^2 \div 10^4$ Вт/см². При дальнейшем повышении интенсивности возбуждения эта линия становится плохо различимой на фоне хорошо известной полосы M^3 .

Интересно отметить, что интенсивность обсуждаемой линии (назовем ее I_1^M) коррелирует с интенсивностью линии I_1 , обусловленной излучательным

распадом экситона, связанного на нейтральном акцепторе. Так, линия I_1^M отчетливо наблюдалась в образцах, обладающих сильной линией I_1 , в то же время в образцах, в которых линия I_1 отсутствовала, линию I_1^M обнаружить не удалось. Таким образом, рассматриваемая линия I_1^M действительно связана с наличием в кристалле центров акцепторного типа.

Существенным аргументом в пользу того, что линия I_1^M обусловлена межэкситонными взаимодействиями в сильно возбужденном кристалле может служить сверхлинейная зависимость ее интенсивности от плотности накачки. На рис.3 в логарифмическом масштабе приведены зависимости интенсивности линии I_1 и обсуждаемой линии I_1^M от плотности возбуждения. Как видно из рисунка, в рассматриваемом диапазоне накачек интенсивность линии I_1 растет с ростом накачки практически линейно, в то же время интенсивность линии I_1^M испытывает четко выраженный сверхлинейный рост. Появление линии I_1^M только при сильном возбуждении, сверхлинейный рост ее интенсивности с ростом накачки и спектральное положение, близкое к ожидаемому, позволяют интерпретировать ее как излучательный распад экситонной молекулы, связанной на нейтральном акцепторе.

-
1. В.Д.Кулаковский, Г.Е.Пикус, В.Б.Тимофеев, УФН **135**, 237 (1991).
 2. J.Puls, F.Henneberger, and J. Voigt, Phys. Stat. Sol. (b), **119**, 291. (1983).
 3. C.Klingshirn and H.Haug, Phys. Rep. **70**, 315 (1981).