

ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ В КРИСТАЛЛЕ CdSe

М.С.Бродин, Н.В.Воловик, М.И.Страшניкова

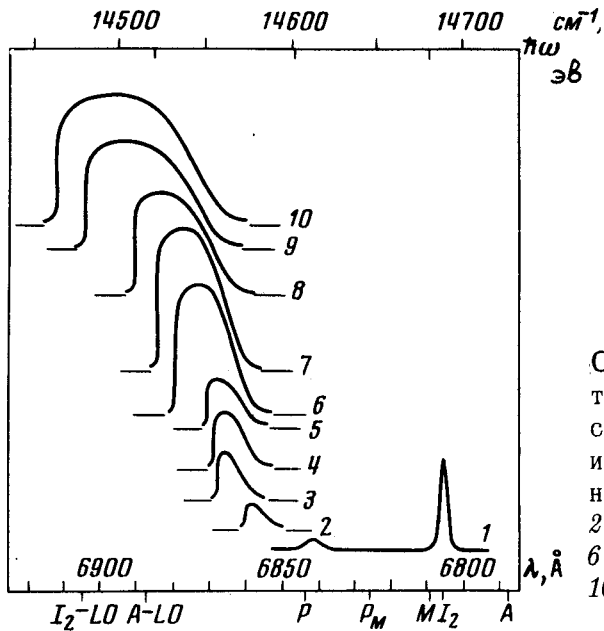
При двухфотонном возбуждении кристаллов CdSe зарегистрировано появление нового свечения, которое по своим свойствам приписывается рекомбинационному излучению электронно-дырочной плазмы.

Имеющиеся многочисленные исследования по спектрам люминесценции сильно возбужденных кристаллов A_2B_6 , особенно CdS, CdSe, пока что не привели к однозначной картине эффектов взаимодействия экситонов в них. С одной стороны, рядом авторов наблюдались новые линии, приписанные экситонным молекулам, неупругому рассеянию экситонов и биэкситонов, экситон-электронному взаимодействию, бозе-эйнштейновской конденсации биэкситонов и экситонов (см. обзор [1] и [2 - 4]). Причем, имеются указания [5], что в кристалле CdS экситоны сохраняются вплоть до концентраций $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$. С другой стороны, в работе [6] на основе спектра люминесценции однофотонно возбужденного кристалла CdS делается вывод, что уже при концентрациях возбуждений 10^{17} см^{-3} экситоны распадаются и образуется электронно-дырочная ($e - h$) плазма. В настоящей работе проведено объемное двухфотонное возбуждение кристалла CdSe и впервые для него показано образование $e - h$ плазмы при концентрациях $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Эксперимент. Было использовано двухфотонное возбуждение кристаллов Nd-лазером, работавшим в режиме модулированной добротности с генерацией одной поперечной моды. Мощность падающего на кристалл сфокусированного пучка изменялась в пределах от 10^7 до 10^8 вт/см^2 . Кристаллы были погружены в жидкий гелий. Рассматривались монокристаллические образцы (выращенные из расплава) толщиной $1,5 - 2 \text{ мм}$ с оптической осью, параллельной поверхности. Регистрация излучения проводилась на спектрографе с дисперсией 4Å/мм фотографическим методом. Возбуждение производилось светом, частично поляризованным $E \perp C$; излучение кристаллов было резко поляризовано $E \perp C$.

На рис. 1 представлены полученные результаты. Нижняя кривая (1) представляет собой спектр люминесценции кристалла CdSe при возбуждении ртутной лампой. Там же стрелкой обозначено положение A -экситона, полученное из спектра отражения. При возбуждении лазером свечение кристалла имеет пороговый характер: пока мощность возбуждения не достигнет 13 Мвт/см^2 , его практически не удастся зарегистрировать. При $I_{\text{возб}} = 13 \text{ Мвт/см}^2$ появляется сравнительно узкая полоса (кривая 2), которая по мере увеличения мощности накачки расширяется и смещается в длинноволновую сторону. По своему спектральному положению возникшее свечение не совпадает ни с одним из известных экситонных и примесных каналов рекомбинации: ни с экситоном A , ни с его повторением на продольном оптическом фоне ($A - LO$), ни со связанным экситоном J_2 и его фонным повторением ($J_2 - LO$), ни

с процессом оже-рекомбинации экситонов (так называемой линией P), ни с возможным излучением биэкситона и его оже-рекомбинацией (линии M и P_M соответственно). Известные из литературы положения всех этих линий обозначены на рис. 1 стрелками. Специфична форма полос излучения, а именно, их резкий красный край и размытый фиолетовый. Такая форма кривых, насколько нам известно, экспериментально не была ранее получена, обычно наблюдается более или менее затянутый длинноволновый "хвост".



Спектры люминесценции кристалла CdSe при возбуждении светом ртутной лампы (кривая 1) и Nd-лазера (мощности возбуждения в $Mвт/см^2$ соответственно: 2 - 13; 3 - 13,5; 4 - 14,5; 5 - 15; 6 - 23; 7 - 15; 8 - 40; 9 - 70; 10 - 120). $T = 4,2K$

Обсуждение результатов. По грубым оценкам нижний предел концентрации экситонов соответствовал $N_{min} = 2 \cdot 10^{16} см^{-3}$, а верхний $N_{max} = 1,4 \cdot 10^{18} см^{-3}$ (предполагалось, что время жизни экситонов $0,5 нсек$, а коэффициент двухфотонного поглощения $0,1 см/Mвт$ [7]). При таких концентрациях экситонов в кристалле CdSe эффекты взаимодействия между ними должны стать очень сильными. Действительно, "предельная" концентрация экситонов, соответствующая случаю "плотной" их упаковки, оценивается из соотношения: $N_{пред} \cdot \frac{4}{3} \pi a^3_{экс} = 1$ и равна $2,4 \cdot 10^{17} см^{-3}$. Если ввести, как это принято, безразмерный параметр $r_s = r/a_{экс}$, где r - расстояние между экситонами, то $N_{пред}$ соответствует $r_s = 2$. В таких условиях эффекты взаимодействия должны привести к разрушению связи между отдельными электроном и дыркой и к образованию $e-h$ плазмы [8]. Теоретически предсказывается (см., например, обзоры [9, 10]), что вследствие обменного и корреляционного взаимодействий электронов и дырок по мере увеличения их концентрации N ширина запрещенной зоны уменьшается, что должно приводить к смещению красной границы рекомбинационного излучения (РИ) в длинноволновую сторону. Одновременно с ростом N увеличивается заполнение зон носителями, а следовательно, должно происходить уширение полосы РИ (грубо равной сумме химпотенциалов элект-

тронов и дырок $\mu_e + \mu_h$). Расчеты показывают также, что при $T = 0$ средняя энергия на пару частиц в зависимости от концентрации должна иметь минимум. Поэтому при высоких концентрациях в принципе возможно образование жидкой фазы (капель) или несконденсированной $e-h$ плазмы. Отличительным спектральным признаком таких образований должно явиться отсутствие зависимости спектрального положения линии РИ от интенсивности возбуждения — в случае капли, и ее наличие — в случае плазмы. По экспериментальным результатам видно, что спектральное положение нового свечения резко зависит от мощности накачки, и следовательно, говорит в пользу образования $e-h$ плазмы.

Мы провели грубый расчет смещения красной границы спектра и его уширения в зависимости от $N e-h$ пар, исходя из предположения о возникновении плазмы. Если сопоставить экспериментально полученную красную границу спектра при минимальном уровне возбуждения с рассчитанной, то она соответствует концентрации $N_{min} = 0,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Максимальная концентрация оценивается $N_{max} = 0,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. По порядку величины эти значения согласуются с оценками, приведенными выше. Дополнительным подтверждением вывода, что мы имеем дело с системой, в которой развалились экситоны и образовалась $e-h$ плазма, является обнаруженное в работе [3] исчезновение экситонных полос в спектрах поглощения и отражения при $N = 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Что же касается ширины полос РИ, то они при всех концентрациях оказываются меньше, чем $\mu_e + \mu_h$. Причина сужения состоит, вероятно, в том, что на толщине кристалла 1,5 – 2 мм существенную роль играют процессы усиления, а контур кривой РИ определяется также спектральным распределением коэффициента усиления. Подчеркнутая выше специфика формы полос РИ: резкий красный край и размытый фиолетовый — также соответствует рассчитанному контуру в предположении $e-h$ плазмы [6]. Такая форма экспериментально зарегистрирована впервые.

Таким образом, мы считаем, что объемно возбуждаемое новое свечение в кристалле CdSe вызвано рекомбинацией образованной электронно-дырочной плазмы.

Институт физики
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
19 января 1976 г. .

Литература

- [1] R.Levy, J.B.Grun. Phys. Stat. Sol., (a), 22, 11, 1974.
- [2] H.Kuroda, S.Shionoya, H.Saito, E.Hanamura. Sol. State Comm., 12, 533, 1973.
- [3] И.Х.Акопян, Б.С.Разбирин. ФТТ, 16, 189, 1974; И.Х.Акопян, Е.Ф.Гросс, Б.С.Разбирин. Письма в ЖЭТФ, 12, 366, 1970.
- [4] J.Vaitkus, R.Baltramiejunas, V.Niunka. J. Phys. Chem. Sol., 35, 159, 1974.

- [5] J.F.Figueira, H.Mahr. Phys. Rev., B7, 4520, 1973.
- [6] В.Г.Лысенко, В.И.Ревенко, Т.Г.Тратас, В.Б.Тимофеев. ЖЭТФ, 68, 335, 1975.
- [7] Ф.Брюкнер, В.С.Днепровский, В.У.Хаттатов. Квантовая электроника, 1, 1360, 1974.
- [8] Л.В.Келдыш. Сб. "Экситоны в полупроводниках". М., изд. Наука, стр. 5.
- [9] Ya.Pokrovskii Phys. Stat. Sol. (a), 11, 385, 1972.
- [10] P.Vashishta, P.Bhattacharyya, K.S.Singwi, Nuovo Cim., 23, B172, 1974.
-