

ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ В КРИСТАЛЛАХ CdSe

В.С.Днепровский, В.И.Климов, Е.Д.Мартыненко

Исследованы спектры спонтанной экситонной люминесценции монокристаллов CdSe (8K), развернутые во времени с разрешением $2 \cdot 10^{-11}$ сек. Образцы возбуждались мощными ультракороткими импульсами света. Результаты спектрохронографических измерений объяснены образованием электронно-дырочной жидкости в прямозонном полупроводнике.

Исследования экситонов высокой плотности в непрямозонных полупроводниках типа германия и кремния показали, что при температурах ниже некоторого критического значения и достаточно высокой концентрации экситонов происходит их конденсация в капли электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) [1]. Вопрос о существовании ЭДЖ в *прямозонных* полупроводниках до сих пор не решен. Несмотря на большое количество экспериментального материала (см. обзор [2] и ссылки в нем), окончательно не ясно, происходит ли в таких полупроводниках, как CdS и CdSe, конденсация экситонов в капли ЭДЖ с некоторой равновесной концентрацией частиц, или возможно лишь образование неравновесной электронно-дырочной плазмы (ЭПД) с концентрацией, зависящей от интенсивности возбуждения.

В данной работе исследованы спектры спонтанной экситонной люминесценции сильновозбужденных кристаллов CdSe, развернутые во времени с временным разрешением $2 \cdot 10^{-11}$ сек. Результаты экспериментов могут быть объяснены образованием в полупроводнике ЭДЖ.

Исследовались пластинчатые монокристаллы CdSe толщиной 1 – 2 мкм. Возбуждение образцов осуществлялось цугом из 15 – 20 ультракоротких импульсов (УКИ) света ($\lambda_S = 530$ нм), с длительностью отдельного импульса в первой половине цуга $5 \cdot 10^{-12}$ сек. Излучение накачки, поляризованное перпендикулярно оптической оси кристаллов, направлялось под углом 45° к плоскости (1210). Для исключения процессов усиления диаметр области возбуждения выбирался не более 50 мкм.

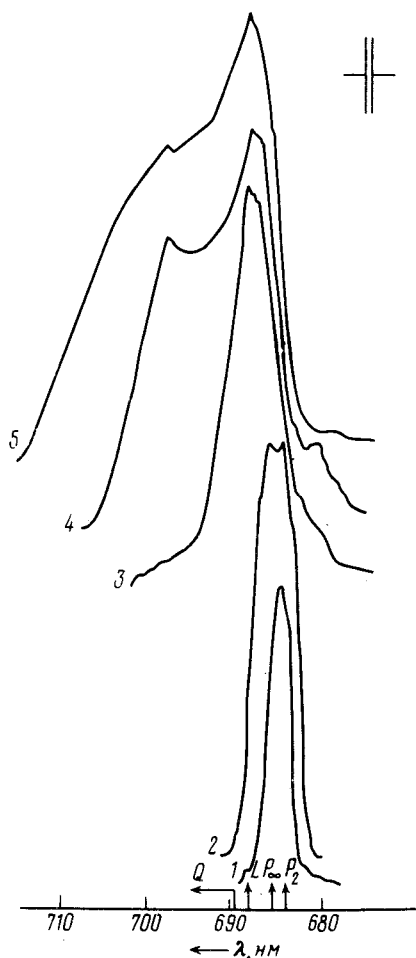


Рис.1. Спектры люминесценции CdSe (8K) при возбуждении цугом УКИ: 1 – $S = 0,006 S_0$, 2 – $S = 0,02 S_0$, 3 – $S = 0,07 S_0$, 4 – $S = 0,5 S_0$, 5 – $S = S_0$; $S_0 = 100$ МВт/см²

На рис.1 приведены спектры люминесценции кристалла CdSe (8K) при различных интенсивностях накачки (S). При высоких уровнях возбуждения ($S > 0,5$ МВт/см²) в спектрах наблюдались три линии – P, L и Q. P-линия ($\lambda = 684,7$ нм при $S \sim 0,6$ МВт/см²; $\lambda = 685,3$ нм при $S \sim 1$ МВт/см²) доминировала в области $S < 1,5$ МВт/см², L-линия –

в интервале $3,5 - 9$ МВт/см², причем ее положение и ширина практически не зависели от мощности накачки ($\lambda = 688$ нм, $\Delta\lambda = 6$ нм), Q -линия появлялась на длинноволновом крыле L -линии при $S \sim 9$ МВт/см², с увеличением уровня возбуждения она существенно уширялась и сдвигалась в длинноволновую сторону.

Спектры люминесценции при $T = 77$ К в области $S > 0,5$ МВт/см² состояли из двух линий — P и Q . P -линия доминировала при $S < 2$ МВт/см², Q -линия — при $S > 5$ МВт/см².

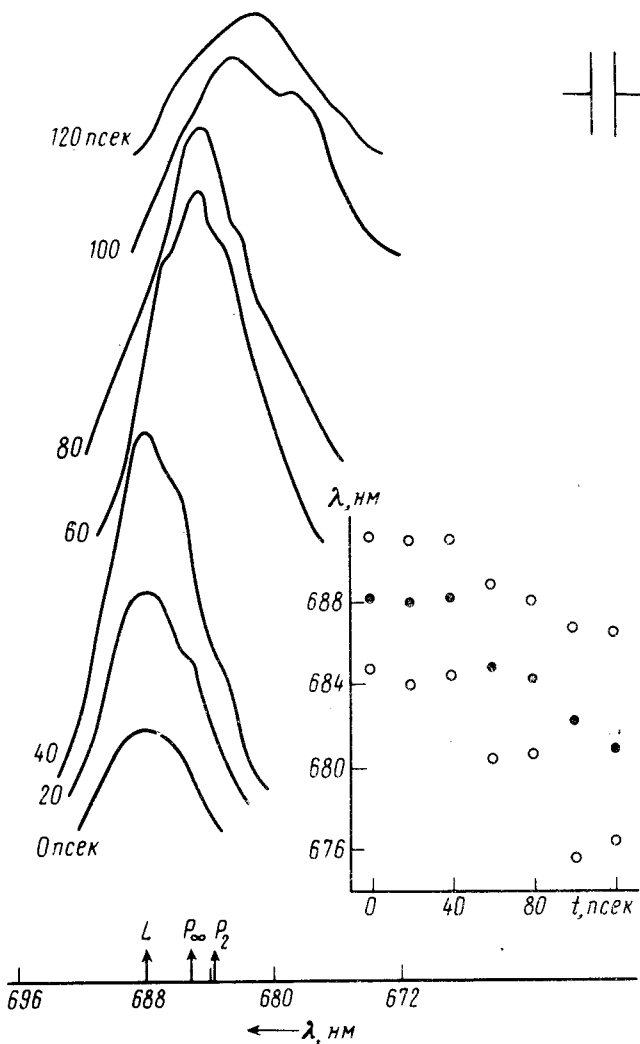


Рис.2. Развернутые во времени спектры люминесценции CdSe (8 К, $S = 20$ МВт/см²) при возбуждении одиночным УКИ и графики изменения положения максимума линии люминесценции (●) и ее фронтов (○) во времени (положение фронтов определялось по уровню 0,5 от максимума интенсивности)

Для исследования развернутых во времени спектров люминесценции кристаллов CdSe (8К) использовался примененный нами ранее [3] специальный светосильный спектрограф, скрещенный со скоростным фотоэлектронным регистратором ФЭР-2 (временное разрешение 20 псек, спектральное — 1,5 нм). При $S \sim 20$ МВт/см² после возбуждения в спектрах доминировала L -линия (рис.2), ширина и положение которой с течением времени практически не изменялась ($\lambda \sim 688$ нм, $\Delta\lambda \sim 6$ нм). Через 40 — 60 псек максимум излучения скачком смещался в коротковолновую сторону до $\lambda \sim 685$ нм. Затем происходило плавное смещение линии люми-

несущей до $\lambda \sim 682$ нм. Были измерены времена запаздывания (Δt) максимума интенсивности люминесценции и характерные времена спада интенсивности люминесценции в e раз (τ) для различных участков спектра (рис.3). Запаздывание L -линии не превышало 20 – 30 псек (временное разрешение метода), P -линия возникала с задержкой 70 – 80 псек. Величина τ для L -линии составила 60 псек, для P -линии ~ 20 псек.

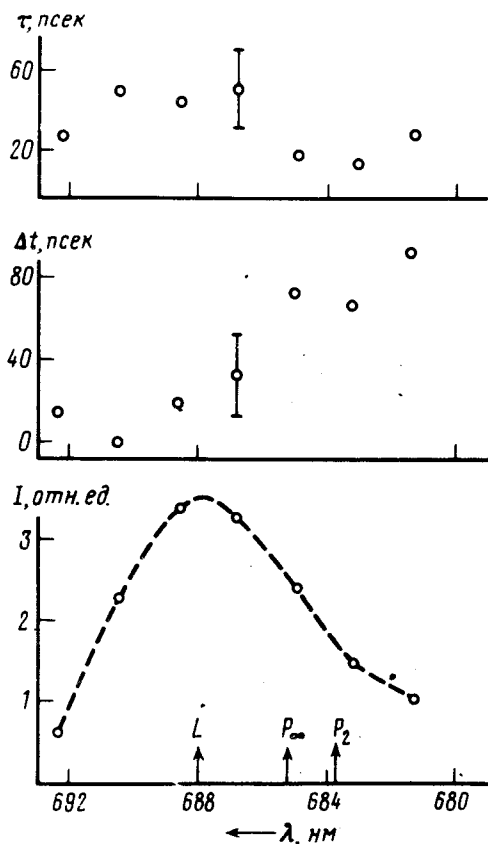


Рис.3. Интегральный спектр люминесценции CdSe (8K) при возбуждении одиночным УКИ и графики зависимости величин τ и Δt от длины волны люминесценции

Свойства P -линии (положение, движение максимума с изменением интенсивности накачки) могут быть объяснены процессом неупругого экситон-экситонного рассеяния [4]. L -линия возникала в области высоких мощностей накачки, при концентрации экситонов $\sim 10^{17}$ см $^{-3}$. Ее спектральные свойства — неизменность положения и ширины при изменении мощности накачки, а также неизменность параметров линии в развернутых во времени спектрах люминесценции могут быть объяснены образованием в полупроводнике капель ЭДЖ. Существованием ЭДЖ можно объяснить и отсутствие L -линии в спектрах, развернутых во времени [3] при $T = 77$ К (температуре выше критической [2]).

Таким образом, до значений $S \sim 1,5$ МВт/см 2 в возбужденном объеме, видимо, существует лишь газ экситонов высокой плотности, излучательная рекомбинация в котором происходит в основном за счет неупругих экситон-экситонных соударений (P -линия). При $S > 1,5$ МВт/см 2 (рис. 1) концентрация экситонов, по-видимому, достигает критического значения, при котором образуются капли ЭДЖ (L -линия). С повышением уровня возбуждения происходит увеличение объема жидкой фазы при некоторой равновесной концентрации частиц в ней (форма и положение ли-

ии излучения не изменяются). Когда весь возбуждаемый объем заполняется ЭДЖ, дальнейшее увеличение мощности накачки приводит к увеличению концентрации частиц — система ведет себя как ЭДП, соответствующая линия излучения (Q) уширяется и сдвигается в длинноволновую сторону. Результаты временных исследований, по-видимому, можно бьяснить следующим образом. Созданные импульсом возбуждения электронно-дырочные пары за время, не превышающее 20 — 30 псек, конденсируются в капли. Число частиц в капле уменьшается в основном за счет действия двух процессов: излучательной рекомбинации электронно-дырочных пар внутри капли и испарения частиц с ее поверхности [1]. Первый процесс приводит к экспоненциальному уменьшению числа частиц в капле и доминирует на начальном этапе ее распада, когда объем капли достаточно велик, второй играет главную роль при малом объеме капли. Таким образом, первые 40 — 60 псек после образования капель соответствуют их экспоненциальному распаду с характерным временем 60 псек, который затем сменяется быстрым испарением (переход от L - к P -линии в спектрах, развернутых во времени). Дальнейший сдвиг линии люминесценции в коротковолновую сторону связан, видимо, с увеличением вероятности рассеяния экситонов в состояния с низкими квантовыми числами по мере уменьшения их концентрации (переход от линии P_∞ к P_2).

Из ширины L -линии и положения ее коротковолнового спада (рис. 1) были оценены концентрация электронно-дырочных пар и энергия связи ЭДЖ: $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и 9 мэВ, соответственно.

В заключение авторы выражают признательность Л.В.Келдышу за обсуждение работы, Г.О.Мюллеру и О.Н.Таленскому за предоставленные образцы CdSe.

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
26 января 1981 г.

Литература

- [1] Т.Райс, Дж.Хенсел, Т.Филлипс, Г.Томас. Электронно-дырочная жидкость в полупроводниках. М., изд. Мир, 1980.
- [2] G.O.Müller, R.Zimmerman. Proc. 14 Int. Conf. Phys. Semicond., p.165, Edinburgh, 1978.
- [3] В.С.Днепровский, В.И.Климов, Е.Д.Мартыненко. ДАН СССР, 253, 1109, 1980.
- [4] Н.Liebing, P.Mengel, W.Ruppel. Phys.Stat.Sol. (b), 72, 431, 1975.