

## ГЛУБОКИЕ СВОБОДНЫЕ И СВЯЗАННЫЕ ЭКСИТОНЫ И БИЭКСИТОНЫ В GaSe И ИХ КОЛЛЕКТИВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

*Ю.Ф.Соломонов, В.К.Субашиев*

Впервые обнаружено связывание глубоких экситонов в молекулу, взаимодействие этих образований между собой и носителями, а также с глубокими экситонно-примесными комплексами (ЭПК). Определены параметры состояний и процессов.

В работах [1, 2] наблюдалось проявление глубоких экситонов (экситонных состояний, связанных с экстремумами зон более глубоких, чем зоны, образующие край фундаментального поглощения) в спектрах поглощения GaSe. В [3, 4] наблюдали фотолюминесценцию в той же области спектра. Трактовка результатов [3, 4], связанная с неполнотой экспериментальных данных, не представляется удовлетворительной

В данной работе исследовались спектры фотолюминесценции GaSe при 4,2 и 77 К при возбуждении второй гармоникой рубинового лазера с максимальной интенсивностью излучения  $2 \cdot 10^{24}$  фот  $\cdot$  см $^{-2}$  сек $^{-1}$  (1 МВт/см $^2$ ) в импульсе 40 нсек. Сигнал люминесценции после спектрографа ДФС-12 регистрировался системой импульсного синхронного детектирования.

На рис. 1 (а, в) представлены типичные спектры излучения для разных интенсивностей возбуждения при 4,2 и 77 К. Там же, рис. 1, б, приведен участок дифференциального спектра поглощения тех же образцов при 4,2 К, полученный путем модуляции длины волны излучения.

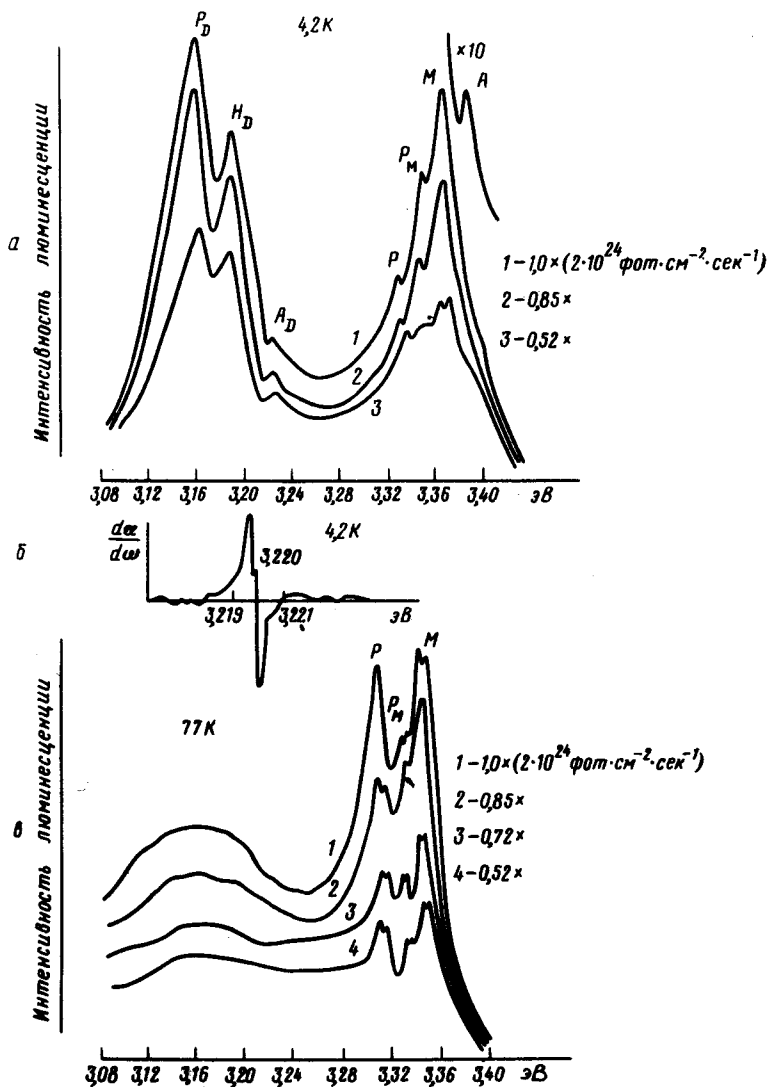


Рис.1.

Зависимости интенсивности линий излучения от накачки при 4,2 и 77 К представлены на рис.2.

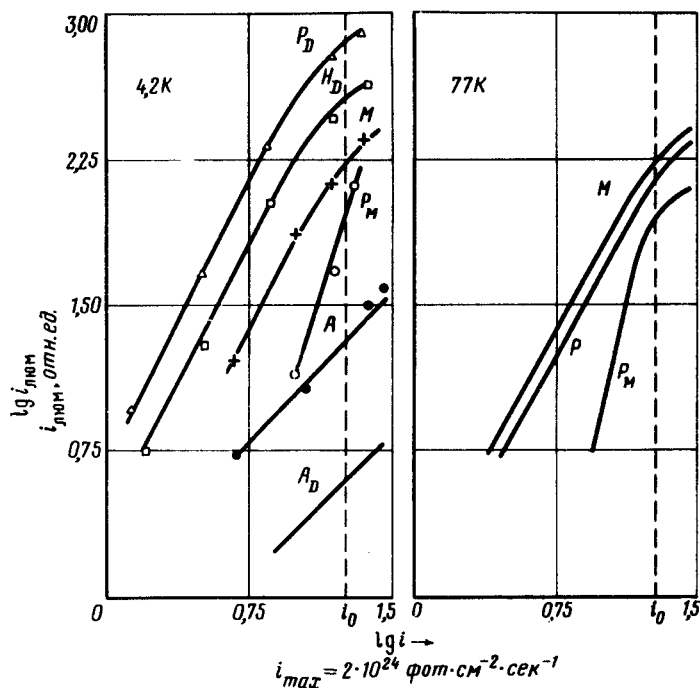


Рис.2.

Трактовка экспериментальных данных велась на основе представлений о взаимодействии глубоких экситонов при большой концентрации, аналогично используемым для краевых экситонов. Рассмотрим каждую из линий в отдельности:

**Линия А**, 3,385 эВ при 4,2 К, имеет линейную зависимость интенсивности излучения от накачки, совпадает с пиком поглощения экситона [1], и следует за ним с изменением температуры, т.е. она является резонансным излучением глубокого экситона. Отнесение авторами [3] линии рекомбинационного излучения 3,361 эВ к резонансной люминесценции экситона неверно по следующим причинам: во-первых, это излучение не совпадает по энергии с линией поглощения; во-вторых, поскольку возбуждение в [3] было двухфотонным ( $2 \times 2,34$  эВ), то в этом случае линия излучения свободного экситона не должна наблюдаться из-за сильного самопоглощения в объеме кристалла.

**Линия М** (3,365 эВ при 4,2 К и 3,355 эВ при 77 К). Интенсивность линии  $M$  пропорциональна примерно квадрату интенсивности возбуждения,  $i_M \sim i^2$ , до значения  $i = i_0$ , а затем линейризуется. Эти данные позволяют связывать  $M$ -линию с излучением глубокого биэкситона, рекомбинация которого происходит по механизму, предложенному для краевого биэкситона Никитиным [5], а кинетика процесса сходна с данной Ноксом [6]. Тогда энергия связи экситонной молекулы  $E_B = \hbar \omega_A - \hbar \omega_M = 20$  мэВ. Приведенная интерпретация подтверждается асимметрией контура  $M$ -линии (резкая коротковолновая часть и затянута длинноволновая) и независимостью ее ширины от температуры.

Контур хорошо аппроксимируется выражением из [7] с параметрами  $\Gamma / kT = 0,9$  и  $T = 70$  К. Отождествление линии  $M$  с фоновым повторением [4] представляется в свете новых данных неудовлетворительным.

Линия  $P_M$  (3,345 эВ при 4,2 К и 3,335 эВ при 77 К). Интенсивность  $i_{P_M} \sim i^4$  до  $i = i_0$ , а затем показатель степени уменьшается, что согласуется с кинетикой излучательной рекомбинации при неупругом соударении двух биэкситонов с образованием трех экситонов и фотона [7]. Это же подтверждается и энергетическим положением линии  $P_M$ , отстоящей от линии  $M$  на  $\hbar\omega_M - \hbar\omega_{P_M} = 20$  мэВ, энергию связи биэкситона.

Подобное же положение максимума излучения могла бы иметь и  $H$ -линия, обусловленная соударениями глубоких экситонов с носителями, по аналогии с этим процессом на краю [7], интенсивность которой зависит квадратично от накачки. Поскольку экспериментально наблюдается только линия с интенсивностью  $i^4$ , следует думать, что  $i_H$  значительно меньше интенсивности линии, связанной с соударениями биэкситонов.

Линия  $P$  (3,325 эВ при 4,2 К и 3,315 эВ при 77 К),  $i_P \sim i^2$  до  $i = i_0$ , затем линейризуется. Форма контура  $P$ -линии сходна с контуром линии биэкситонов. Эту линию можно отождествить с рекомбинационным излучением, обусловленным соударениями глубоких экситонов, по аналогии с [7], что подтверждается сдвигом максимума  $P$ -линии в сторону низких энергий при увеличении накачки, связанным с возрастанием кинетической энергии носителей, рождающихся в процессе взаимодействия экситонов. Тогда энергия связи экситона  $E_{ex} = \hbar\omega_A - \hbar\omega_P = 60$  мэВ. С увеличением температуры от 4,2 до 77 К, вследствие диссоциации ЭПК и связанного с этим возрастания концентрации свободных экситонов, интенсивность линии  $P$  по сравнению с  $M$  — должна возрасти, что действительно наблюдается. Указанная температурная зависимость говорит также о невозможности интерпретации линии  $P$ , как второго фонового повторения излучения свободного экситона [8]. В ряде случаев у  $M$ -,  $P_M$ -, и  $P$ -линий наблюдалась дублетная структура.

Линии  $A_D$ ,  $H_D$ ,  $P_D$  наблюдаются при 4,2 К и с повышением температуры уширяются и ослабляются. Их интенсивность меняется от образца к образцу.

Линия  $A_D$  3,220 эВ соответствует узкий пик в спектре поглощения (рис.1, б),  $i_{A_D} \sim i$ . Все это позволяет отождествлять линию  $A_D$  с излучением глубокого экситона, связанного на локальном центре.

Линия  $H_D$ , 3,180 эВ,  $i_{H_D} \sim i^2$ , и может быть отнесена к излучательной рекомбинации ЭПК при неупругом соударении с носителями. Энергия фотона, излучаемого в этом акте [7]:  $\hbar\omega_{H_D} = E_g - E_{ex} - E_D -$

$$- \frac{1}{2} \frac{m_e + m_h}{m_e} kT, \quad m_e \text{ и } m_h - \text{массы электрона и дырки. Так как}$$

$\hbar\omega_{AD} = E_g - E_{ex} - E_D = 3,220 \text{ эВ}$ , то  $\frac{m_e + m_h}{m_e} kT = 80 \text{ мэВ}$ . Ис-

пользуя  $\mu_{ex} = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h} = 0,089 m_0$  [9], получим  $m_e = 0,089 m_0$ ,

$m_h = 20 m_0$ .

Линию  $P_D$ , 3,160 эВ, следует отнести к рекомбинационному излучению при соударении свободного глубокого экситона и ЭПК. Такая интерпретация отвечает ее спектральному положению, зависимости от интенсивности и температуры.

По найденным  $E_{ex} = 60 \text{ мэВ}$  и  $\sigma = m_e/m_h = 0,0045$  была определена энергия связи экситона по формуле Венера [7],  $E_B^{\text{теор}} = 19 \text{ мэВ}$ , что хорошо согласуется с выше найденным значением.

Таким образом, впервые удалось наблюдать связывание глубоких экситонов в молекулу, взаимодействие этих образований между собой и носителями, а также с глубокими экситонно-примесными комплексами.

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

Поступила в редакцию  
19 января 1980 г.

## Литература

- [1] V.K.Subashiev, Le-Khac-Binh, L.S.Chertkova. Solid State Comm., 9, 369, 1971; V.I.Sokolov, V.K.Subashiev. Phys. Stat. sol., 65B, K47, 1974.
- [2] A.Balzarotti, M.Piacentini, E.Burattini, P.Picozzi. J.Phys., C4, 273, 1971.
- [3] Д.П.Дворников, В.М.Салманов, И.Д.Ярошецкий. Письма в ЖЭТФ, 20, 17, 1974.
- [4] В.Т.Агекян, Ю.Ф.Соломонов, Ю.А.Степанов, В.К.Субашиев. ФТП, 10, 1776, 1976.
- [5] S.Nikitine, A.Mysyrowiez, J.B.Grun. Helv. Phys. Acta, 41, 1058, 1968.
- [6] R.C. Knox, S.Nikitine, A.Mysyrowiez. Optics Comm., 1, 19, 1969.
- [7] R.Levy, J.B.Grun. Phys. Stat. sol., 22A, 11, 1974.
- [8] Е.Ф.Гросс, С.А.Пермагоров, Б.С.Разбирин. УФН, 103, 431, 1971.