

## РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ОРТО- И ПАРАЭКСИТОНАМИ В КРИСТАЛЛЕ ЗАКИСИ МЕДИ $\text{Cu}_2\text{O}$ С УЧАСТИЕМ ФОНОНОВ

Е. Ф. Гросс, Ф. И. Крейнгольд, В. Л. Макаров

Как известно, в кристалле  $\text{Cu}_2\text{O}$  помимо трехкратно вырожденного экситонного состояния  $n = 1$  "желтой" серии с симметрией  $\Gamma_{25}^+$  (орто-экситон) должно существовать невырожденное состояние  $n = 1$  с симметрией  $\Gamma_2^+$  (параэкситон) [1]. В спектрах люминесценции и поглощения удается наблюдать переходы только на уровни ортоэкситона  $\Gamma_{25}^+$ , которые разрешены в квадрупольном приближении [2, 3]. Переход в состояние  $\Gamma_2^+$  запрещен в дипольном и квадрупольном приближении, поэтому это состояние до сих пор не наблюдалось.

В спектре люминесценции  $\text{Cu}_2\text{O}$  наряду с резонансным излучением экситона  $\Gamma_{25}^+$  наблюдается ряд полос, возникающих вследствие аннигиляции экситона с одновременным возбуждением (или исчезновением) фононов. Согласно [1], переходы на уровень  $\Gamma_{25}^+$  с участием фононов  $\Gamma_{25}^-$ ,  $\Gamma_{12}^-$ ,  $\Gamma_2^-$  и  $\Gamma_{15}^-$  разрешены в дипольном приближении. Исследование спектров экситонной люминесценции  $\text{Cu}_2\text{O}$  позволило определить частоты всех оптических фононов, в том числе колебания активного в комбинационном рассеянии  $\Gamma_{25}^+$  (таблица). Подробному обсуждению результатов исследования фононных спектров  $\text{Cu}_2\text{O}$  будет посвящена отдельная работа.

### Частоты оптических фононов закиси меди, измеренные по спектрам люминесценции, и их интерпретация

Тип колебания	$\Gamma_{25}^-$	$\Gamma_{12}^-$	$\Gamma_2^-$	$\Gamma_{25}^+$	$\Gamma_{15}^-$		$\Gamma_{15}^-$	
					прод.	попер.	прод.	попер.
Частота, $\text{см}^{-1}$	84	110	350	515	150	—	640	610

Кроме фононных повторений перечисленных в таблице, мы наблюдали еще одну полосу излучения, которая находится на расстоянии около  $180 \text{ см}^{-1}$  от линии ортоэкситона, и, которая имеет характерную форму фононного повторения свободного экситона. Эта полоса не укладывается в общую схему фононного спектра закиси меди. Зависимость интенсивности люминесценции этой полосы от температуры резко отличается от температурной зависимости остальных фононов. Кроме того фононное повторение с частотой  $180 \text{ см}^{-1}$  никогда не встречается в спектре излучения связанных экситонов закиси меди.

Все это позволяет нам предполагать, что наблюдаемая полоса возникает в результате взаимодействия фонона с другим (не  $\Gamma_{25}^+$ ) экситонным состоянием. Естественно предполагать, что этим состоянием

является  $\Gamma_2^+$  - параэкситон. Из теоретико-групповых соображений следует, что переход на уровень параэкситона возможен в дипольном приближении при участии только одного фонона  $\Gamma_{25}^-$ . Зная энергию фонона  $\Gamma_{25}^-$  ( $\omega = 84 \text{ см}^{-1}$ ) мы определили положение уровня параэкситона ( $\lambda = 6135 \text{ \AA}$  при  $T = 4,2^\circ\text{K}$ ) и энергию орто- парарасщепления  $\epsilon = 96 \text{ см}^{-1}$ . Заметим, что согласно оценке, приведенной в работе [1], величина орто- парарасщепления должна быть около  $15 \text{ см}$

Хотя мы знали где должен был находиться уровень параэкситона, ни в поглощении ни в люминесценции его обнаружить не удавалось.



Микрофотограммы спектров люминесценции монокристалла  $\text{Cu}_2\text{O}$  при давлении: 1 -  $P \approx 7 \text{ кг/мм}^2$ , 2 -  $P \approx 10 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\nu_0$  и  $\nu_0'$  обозначены линии ортоэкситона,  $\nu_{\text{п}}$  - линия параэкситона. Частота фононов  $\omega$  отсчитывается от несмещенного положения уровня ортоэкситона.  $T = 1,8^\circ\text{K}$ ,  $P \parallel C_4$

Нам удалось его обнаружить только в кристаллах, подвергнутых деформации. Новая линия появлялась в спектре люминесценции  $\text{Cu}_2\text{O}$  при сжатии кристалла вдоль оси симметрии четвертого порядка  $C_4$

точно на том месте, которое было определено заранее, т. е. с длинноволновой стороны от линии ортоэкситона на расстоянии  $96 \text{ см}^{-1}$ . Оказалось, что разгорание линии параэкситона происходит не при любом давлении, а только начиная с определенного значения, причем дальнейшее увеличение давления мало меняет ее интенсивность.

На рисунке приведены микрофотограммы спектров излучения экситона при давлении  $P \approx 7 \text{ кг/мм}^2$  (кривая 1) и  $P \approx 10 \text{ кг/мм}^2$  (кривая 2). Из рисунков видно, что линия параэкситона появляется только при давлении около  $10 \text{ кг/мм}^2$ . Из работы [4] известно, что при деформации  $\text{Cu}_2\text{O}$  вдоль оси  $C_4$  уровень экситона  $\Gamma_{25}^+$  расщепляется на две компоненты, которые смещаются в противоположные стороны от начального положения. Соответствующее расщепление и смещение претерпевают и фоновые повторения. В спектре люминесценции при низких температурах ( $T \approx 1,8^\circ\text{K}$ ) коротковолновая компонента излучения экситона очень слаба, так как она почти не заселена. Соответственно, слабы и коротковолновые компоненты фоновых повторений поэтому в спектрах люминесценции, приведенных на рисунке, они не видны. Однако, с увеличением давления (кривая 2) в спектре люминесценции с коротковолновой стороны от фона  $\Gamma_{12}^-$  появляется новая узкая линия – линия параэкситона.

Разгорание линии параэкситона в спектре люминесценции  $\text{Cu}_2\text{O}$  не может быть вызвано понижением степени запрета при деформации [1]. Также, нельзя объяснить снятием запрета немонотонный характер зависимости интенсивности линии параэкситона от давления.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что появление линии параэкситона в спектре люминесценции носит резонансный характер. Как было отмечено раньше, линия параэкситона разгорается только тогда, когда расстояние между коротковолновой компонентой ортоэкситона и уровнем параэкситона становится равным энергии фона  $\Gamma_{12}^-$  ( $\omega = 110 \text{ см}^{-1}$ ), т. е. тогда, когда коротковолновая компонента фоновых повторений ортоэкситона попадает на уровень параэкситона. Нами было установлено, что интенсивность фоновых повторений параэкситона не зависит от давления, поэтому разгорание линии  $\Gamma_2^+$  в спектре излучения нельзя объяснить, также, увеличением концентрации параэкситонов.

Мы считаем, что возгорание линии параэкситона в спектре записи меди при деформации, происходит вследствие резонансного рассеяния ортоэкситона на уровень параэкситона с возбуждением фона и, последующего излучательного перехода в основное состояние.

В заключение, авторы выражают глубокую благодарность проф. С.А. Москаленко и М.И. Шмиглюку за обсуждение вопросов теории орто- и параэкситонов в кристалле  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

Ленинградский  
государственный университет  
им. А.А. Жданова

Поступила в редакцию  
23 февраля 1972 г.

#### Литература

- [ 1 ] R.I. Elliott. Phys. Rev., 124, 340, 1961.
- [ 2 ] Е.Ф. Гросс, А.А. Каплянский. ФТТ, 2, 379, 1960.

[ 3 ] Е.Ф.Гросс, Ф.И.Крейнгольд. Письма в ЖЭТФ, 7, 281, 1968.

[ 4 ] Е.Ф.Гросс, А.А. Каплянский, В.Т.Агекян. ФТТ, 4, 1009, 1962.

---