

*Письма в ЖЭТФ, том 10, стр. 219 – 223*

*5 сентября 1969 г.*

**ВРЕМЯ ЖИЗНИ СВОБОДНОГО И СВЯЗАННЫХ ЭКСИТОНОВ  
В КРИСТАЛЛАХ  $\text{Cu}_2\text{O}$**

*Е.Ф.Гросс, Ф.И.Крейнольд*

10

Оптические свойства экситона в кристалле закиси меди исследованы очень подробно [1]. При низких температурах, на длинноволновом краю основного поглощения видны две водородоподобные серии линий экситона – желтая и зеленая. Линия поглощения с  $n = 1$  желтой серии,

как было установлено в работах [2,3] обусловлена квадрупольным переходом. Согласно [4] излучательное время жизни экситона с  $n = 1$  порядка  $10$  сек.

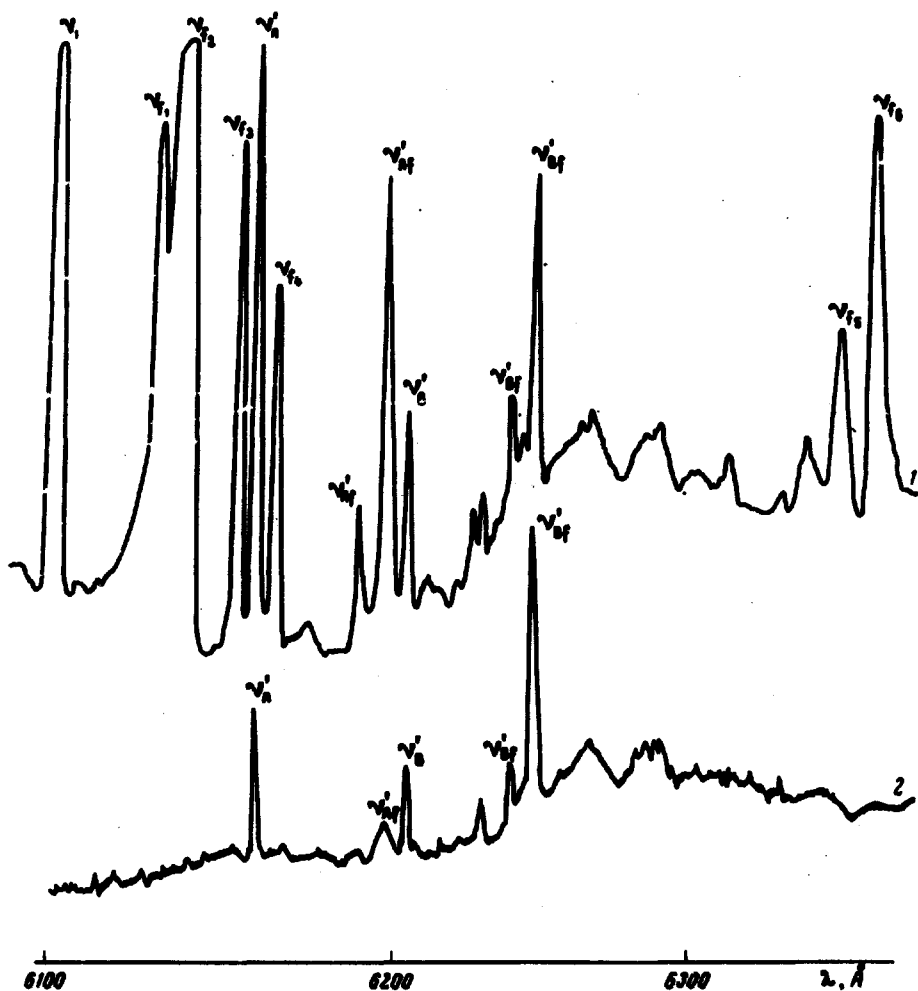


Рис.1. Микрофотограмма спектра люминесценции кристалла  $\text{Cu}_2\text{O}$  №1П при: 1 - непрерывном возбуждении, 2 - послесвечении. Температура  $T = 2^\circ\text{K}$ .  $\nu_1$  - линия  $n = 1$ ,  $\nu_{f1}$  - ее фоновые повторения,  $\nu'_A, \nu'_B$  - связанные экситоны,  $\nu'_{Af}$  и  $\nu'_{Bf}$  - фоновые повторения связанных экситонов

После того как была обнаружена резонансная люминесценция экситона [5]  $n = 1$  в  $\text{Cu}_2\text{O}$ , стало возможным исследовать излучательное время жизни экситона и сопоставить его с вычисленным значением.

Кристаллы закиси меди, использованные в этой работе выращивались также как и в [5]. Исследования проводились при температурах 2 – 4,2°К. Время затухания люминесценции определялось по спектрам послесвечения. Минимальное время затухания, которое можно было определять в наших опытах по спектрам послесвечения составляло  $10^{-4}$  сек.

Краевая люминесценция наиболее чистых кристаллов  $\text{Cu}_2\text{O}$  содержит только излучение свободного экситона и его фононных повторений и была описана нами ранее [6].

При исследовании спектров послесвечения таких (наиболее чистых) кристаллов  $\text{Cu}_2\text{O}$  мы не обнаружили послесвечения свободного экситона со временем жизни  $10^{-4}$  сек или больше. Из сопоставления этого результата с вычисленным значением для излучательного времени жизни экситона  $n = 1$  ( $\tau_{\text{изл}} \sim 10$  сек) следует, что вероятность безызлучательных переходов для свободного экситона, по крайней мере, в  $10^5$  раз больше вероятности излучательных переходов.

Существенно иной результат был получен на кристаллах с примесями. В результате исследования примесных кристаллов было замечено послесвечение ряда узких линий и полос. В то же время все линии принадлежащие излучению свободного экситона в спектре послесвечения отсутствовали. На рис.1 приведены микрофотограммы спектров люминесценции одного из кристаллов  $\text{Cu}_2\text{O}$  при температуре  $T = 2^\circ\text{K}$ , полученные при непрерывном возбуждении (кривая 1) и в послесвечении (кривая 2).

Узкие линии, которые наблюдаются в спектре люминесценции кристаллов с примесями, обусловлены аннигиляцией связанных экситонов. Также как и в случае излучения свободного экситона наблюдается люминесценция связанных экситонов с одновременным возбуждением фононов. В кристалле, спектр которого приведен на рис.1, частоты фононов взаимодействующих как со связанными так и со свободными экситонами одинаковы. Частота фонона, наиболее сильно взаимодействующего со свободным и связанными экситонами этого кристалла, равна  $105 \text{ см}^{-1}$ . Исследование послесвечения показало, что в спектре данного кристалла присутствуют две группы линий связанных экситонов отличающихся по временам жизни.

Нами исследовались также кристаллы  $\text{Cu}_2\text{O}$  со связанными экситонами, фононный спектр которых отличался от спектра фононных повто-

рений свободного экситона. Микрофотограмма спектра люминесценции такого кристалла приведена на рис.2. Также как и в предыдущем случае, видно, что в послесвечении линии излучения свободного экситона отсутствуют. Время послесвечения связанных экситонов в этих кристаллах при  $T = 2^\circ\text{K}$  было не меньше чем  $10^{-2}$  сек.

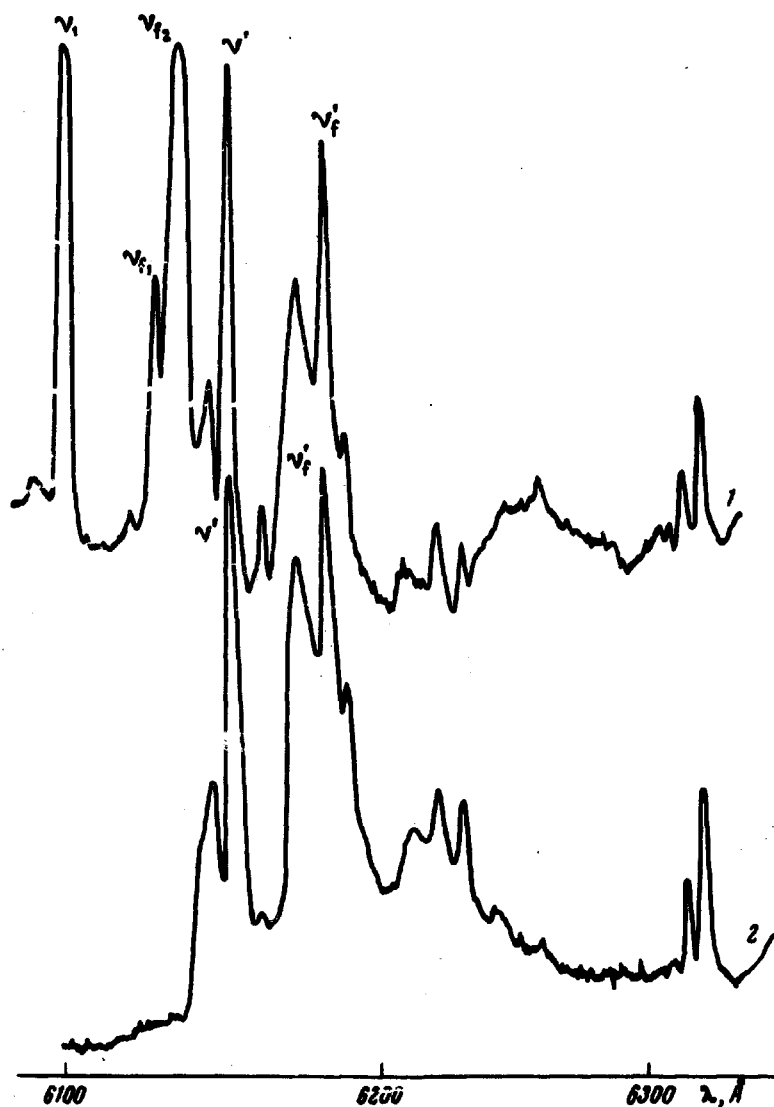


Рис.2. Микрофотограмма спектра люминесценции кристалла  $\text{Cu}_2\text{O}$  №1А при: 1 - непрерывном возбуждении, 2 - послесвечении. Температура  $T = 2^\circ\text{K}$ .  $\nu_1$  линия  $n = 1$ ,  $\nu_{1'}$ ;  $\nu_{1''}$  - ее фоновые повторения,  $\nu'$  - связанный экситон,  $\nu_f$  - фоновое повторение связанного экситона

Таким образом, нами было установлено, что время жизни связанных экситонов в  $\text{Cu}_2\text{O}$  много больше (в  $10^2 - 10^3$  раз), чем время жизни свободных экситонов.

Энергия диссоциации связанных экситонов, которые мы наблюдаем в кристаллах  $\text{Cu}_2\text{O}$  очень мала. Поэтому состояния связанных экситонов можно описывать в приближении эффективной массы, т.е. в случае  $\text{Cu}_2\text{O}$  переход на уровни связанных экситонов, так же как и для свободных, запрещен. Этот вывод подтверждается большим временем жизни связанных экситонов<sup>1)</sup>. Но тогда различие во временах жизни свободного и связанного экситона объясняется различием их динамических свойств. Основное отличие свободного экситона состоит в том, что он может перемещаться по кристаллу. Движение экситона сокращает его время жизни за счет столкновения с примесями и дефектами. Время жизни экситона  $\tau_n$  относительно захвата на примесях равно:

$$\tau_n = 1/Cv\sigma_n, \quad (1)$$

где  $C$  — концентрация примесей,  $v$  — средняя скорость движения экситона и  $\sigma_n$  — сечение захвата экситона примесями. Приняв для оценки следующие значения:  $C = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $v = 10^5 \text{ см/сек}$  и, если считать, что сечение захвата экситона примесями такого же порядка, что и сечение захвата носителя нейтральным центром  $\sigma_n = 10^{-18} \text{ см}^{-2}$ , получим для  $\tau_n = 10^{-5} \text{ сек}$ , т.е. много меньше чем излучательное время жизни экситона  $n = 1$  ( $\tau_{\text{изл}} \sim 10 \text{ сек}$ ).

Таким образом, обнаруженное нами различие времени жизни свободного и связанных экситонов является прямым следствием движения свободных экситонов.

Ленинградский  
государственный университет  
им. А.А. Жданова  
НИФИ

Поступила в редакцию  
14 июля 1969 г.

#### Литература

- [1] Е.Ф. Гросс. УФН, 63, 575, 1957; 76, 433, 1962.
- [2] R.I. Elliott. Phys. Rev., 124, 340, 1961.
- [3] Е.Ф. Гросс, А.А. Каплянский. ФТТ, 2, 379, 1960.
- [4] Е.Ф. Гросс, А.А. Каплянский. ДАН СССР, 139, 75, 1961.
- [5] Е.Ф. Гросс, Ф.И. Крейнгольд. Письма в ЖЭТФ, 7, 281, 1968.
- [6] Е.Ф. Гросс, Ф.И. Крейнгольд. Proc. IX Int. Conf. on the Phys. of Semicond. Moscow 1968, p. 456.

<sup>1)</sup> Для выяснения влияния безызлучательных переходов на время жизни связанных экситонов необходимы дополнительные исследования.