

## ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ЗАТУХАНИЯ В ПРОЦЕССАХ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ЭКСИТОНАМИ

*Ф.И.Крейнгольд, В.Л.Макаров*

Обнаружено, что интегральное поглощение света в области квадрупольного экситонного перехода в  $\text{Cu}_2\text{O}$  стремится к нулю при уменьшении температуры. Это приводит к нарушению классического соотношения между площадью под кривой поглощения и силой осциллятора перехода. Обсуждается механизм наблюдаемого явления.

Одним из основных вопросов физики экситонов является вопрос о механизме поглощения света кристаллами вблизи частот, которые резонансно совпадают с энергией возбуждения экситона. Согласно современным представлениям [1, 2], поглощение должно отсутствовать, если нет процессов рассеяния экситонов. С другой стороны, при достаточно большом затухании должно выполняться классическое соотношение между площадью под кривой поглощения и силой осциллятора экситонного перехода. Поэтому должна существовать такая область значений параметра затухания, где его уменьшение сопровождается падением интегрального поглощения. В этой области будет нарушаться указанное выше соотношение и ее можно назвать областью "неклассического" поглощения. Недавно такой результат был получен теоретически в работе [3].

Данная работа является, по-видимому, первым прямым подтверждением существования такого "неклассического" поглощения.

**Методика и результаты эксперимента.** Нами исследовалась температурная зависимость интегрального поглощения и полуширины квадрупольной линии  $n = 1$  в кристалле  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Поскольку проявление "неклассического" поглощения можно ожидать только при малых значениях затухания, качество образцов играло решающую роль. Проводился отбор образцов с узкой линией  $n = 1$ , и тем самым значительно снижался вклад дефектов и примесей в величину затухания. С методической точки зрения изучались также кристаллы, в которых линия

$n = 1$  была уширена. Оказалось, что при  $T = 4,2^\circ\text{K}$  линия  $n = 1$  в хороших образцах очень узка. Поэтому исследования при низких температурах велись с помощью эталона Фабри – Перо, который скрещивался со спектрометром ДФС-12. На рис. 1, *a* приводится запись участка сплошного спектра, а на рис. 1, *b* – характерная запись линии поглощения  $n = 1$  при  $T = 4,2^\circ\text{K}$ . На рис. 1, *в* приведена для сравнения запись линии излучения He – Ne лазера. При  $T > 35^\circ\text{K}$  исследования контура линии велись с помощью ДФС-12.

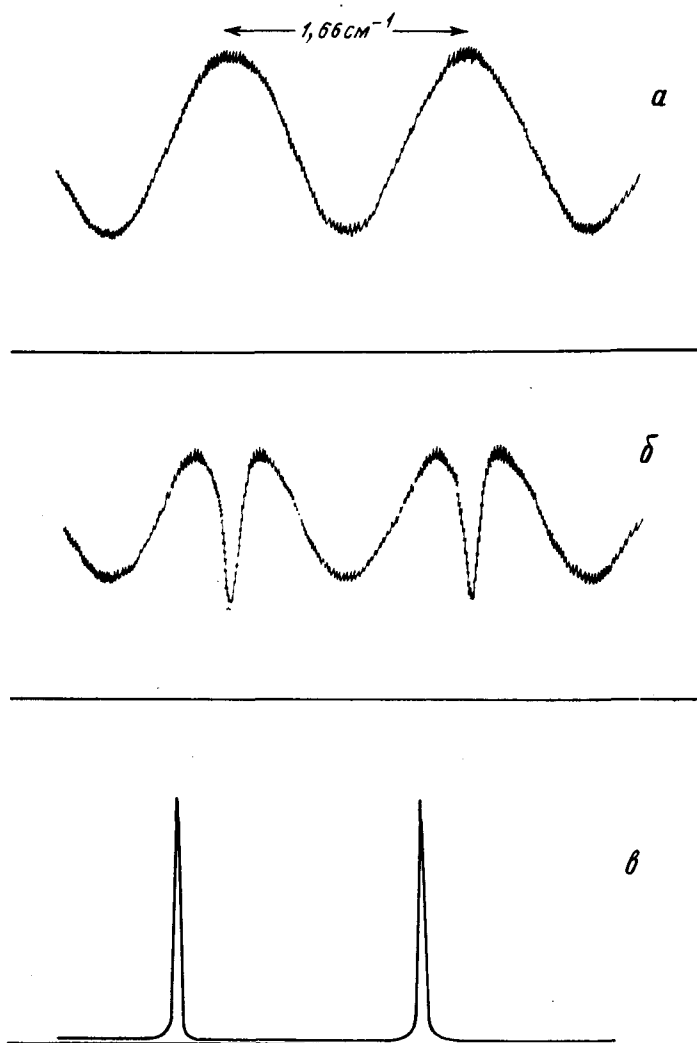


Рис. 1. Вид спектров, записанных с помощью эталона Фабри – Перо: *a* – сплошной спектр, *b* – линия поглощения  $n = 1$  кристалла  $\text{Cu}_2\text{O}$  при  $T = 4,2^\circ\text{K}$ , *в* – линия излучения He – Ne лазера

На рис. 2 приведены экспериментальные графики температурной зависимости интегрального поглощения и полуширины линии  $n = 1$ .

Кривые (а) и (б) относятся к хорошему кристаллу (№1) с узкой линией поглощения. Было исследовано несколько кристаллов такого типа и установлено, что полуширина и интегральное поглощение ведут себя в них совершенно идентично. Кривые (д) и (е) отражают приближенный ход интегрального поглощения в кристаллах №2 и №3, в которых полуширина линии  $n = 1$  составляла при  $T = 4,2^\circ\text{K}$  0,8 и 0,4  $\text{см}^{-1}$ , соответственно.

**Обсуждение результатов.** Как видно из рис. 2, а, интегральное поглощение в линии  $n = 1$  кристалла №1 постоянно в интервале температур 120 – 60°K и уменьшается при дальнейшем понижении температуры до 1,8°K в 4,5 раза. Таким образом при температурах  $T < 60^\circ\text{K}$  должны нарушаться обычные соотношения между площадью под кривой поглощения и силой осциллятора.

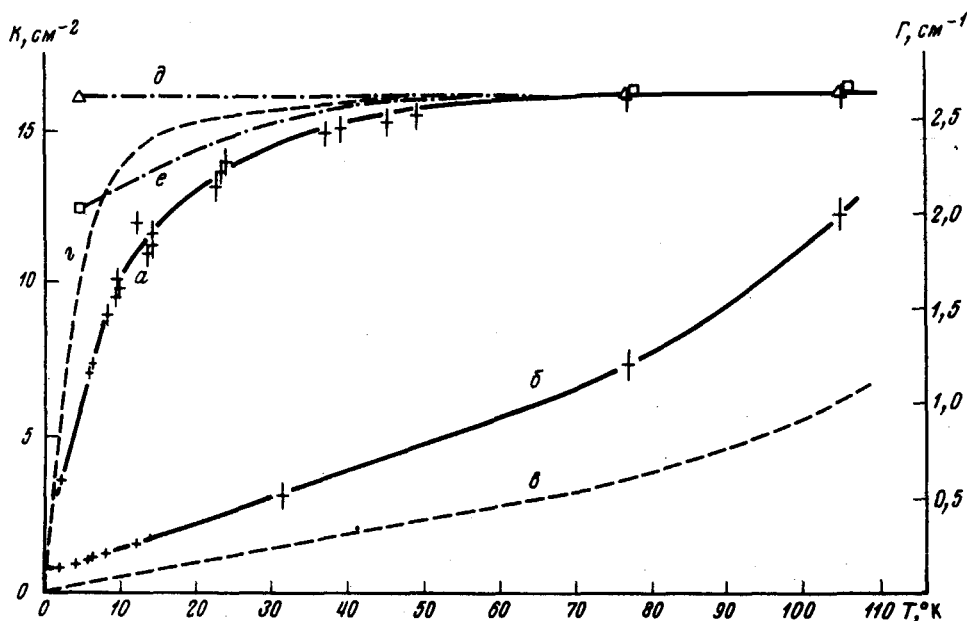


Рис. 2. Температурные зависимости интегрального поглощения  $K$  и полуширины  $\Gamma$  линии  $n = 1$  в  $\text{Cu}_2\text{O}$ : (а) и (б) –  $K(T)$  и  $\Gamma(T)$  для кристалла №1; (е) и (з) – теоретические кривые  $\gamma(T)$  и  $K(T)$ ; (д) и (е) –  $K(T)$  для кристаллов №2 и №3

Качественное объяснение различного поведения интегрального поглощения в области низких ( $T < 60^\circ\text{K}$ ) и высоких ( $T > 60^\circ\text{K}$ ) температур можно получить исходя из поляритонной природы элементарных возбуждений в области экситонного резонанса. Согласно Хапфилду [1], поляритон можно представлять как фотон, периодически превращающийся в экситон с частотой  $f$ :

$$f = \omega_p (\pi F / \epsilon)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\omega_p$  – плазменная частота,  $F$  – сила осциллятора экситонного перехода,  $\epsilon$  – диэлектрическая постоянная. Процессы рассеяния полярито-

на будут происходить только в те моменты, когда он находится в экситонном состоянии, поэтому критерием нарушения классического соотношения для интегрального поглощения является неравенство  $f \geq \gamma$ , где  $\gamma$  — частота актов рассеяния экситона. Приводимые ниже оценки находятся в удовлетворительном согласии с результатами эксперимента. Действительно, беря значение  $F = 3 \cdot 10^{-10}$  [4],  $\epsilon = 7,5$  и  $\omega_0 = 6,5 \cdot 10^{15} \text{сек}^{-1}$  получим  $f = 7 \cdot 10^{10} \text{сек}^{-1}$  ( $0,35 \text{см}^{-1}$ ). Из экспериментального графика рис. 2, б видно, что такое значение величины затухания реализуется уже при  $20^\circ\text{К}$ . В этой же области температур наблюдается и "неклассический" характер поглощения.

Интересно также сравнить наши результаты с выводами работы [3], где квантово-статистическим методом получено приближенное выражение для коэффициента поглощения света экситонами  $K(\omega)$ :

$$K(\omega) = \frac{\gamma f^2 / 2c}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2 + f^2/4} \quad (2)$$

Полуширина линии  $\Gamma$  в этом случае равна:

$$\Gamma = 2\sqrt{\gamma^2 + f^2/4}, \quad (3)$$

а интегральное поглощение

$$K = \int K(\omega) d\omega = \frac{\pi f^2 \gamma / 2c}{\sqrt{\gamma^2 + f^2/4}} \quad (4)$$

Выражение (4) описывает как предельные случаи  $f \ll \gamma$ , когда  $K = \pi f^2 / 2c$ , и  $f \gg \gamma$ , когда  $K = \pi f \gamma / c$ , так и переходную область, где  $f \sim \gamma$ .

Предполагая, что экспериментальная кривая температурной зависимости величины  $\Gamma$  линии  $n = 1$  подчиняется закономерности (3) и, находя таким образом значение  $f = 2,4 \cdot 10^{10} \text{сек}^{-1}$  ( $0,12 \text{см}^{-1}$ ) и  $\gamma(T)$  (рис. 2, в), мы построили, используя (4), теоретический график температурной зависимости интегрального поглощения (рис. 2, г)<sup>1)</sup>. Несмотря на хорошее согласие эксперимента с теорией, для окончательных выводов требуются дополнительные исследования.

Следует еще раз подчеркнуть, что зависимость интегрального поглощения от температуры отчетливо выражена только в хороших кристаллах. Это иллюстрируется кривыми (д) и (е), которые отражают поведение интегрального поглощения в "плохих" кристаллах №2 и №3.

<sup>1)</sup> Для совпадения значений интегрального поглощения в области высоких температур в числитель выражения (4) пришлось ввести эмпирический множитель  $\alpha = 35$ . Появление такого множителя может быть связано с тем, что формулы (2) — (4), полученные для дипольного случая, не могут быть прямо использованы для квадрупольного перехода [5].

Заметим, что наблюдаемое изменение величины интегрального поглощения линии экситонного перехода не связано с эффектами пространственной дисперсии, а является лишь следствием квантовых осцилляций энергии возбуждения между фотонным и экситонным состояниями. Впервые, довольно близкая по смыслу задача, была поставлена и решена в работах [6], посвященных теоретическому исследованию безызлучательных переходов в кристаллах с примесями.

Мы искренне благодарны В.А.Киселеву, Л.Е.Соловьеву и Е.Д.Трифонову за плодотворное обсуждение ряда вопросов, рассмотренных в данной статье.

Ленинградский  
государственный университет  
им. А.А.Жданова

Поступила в редакцию  
8 июля 1974г.

### Литература

- [1] J. J. Hopfield. *Phys. Rev.*, 112, 1955, 1958.
- [2] С.И.Пекар. *ЖЭТФ*, 34, 1176, 1958.
- [3] A. S. Davydov, A. A. Serikov. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 56, 351, 1973.
- [4] Е.Ф.Гросс, А.А.Каплянский. *ДАН СССР*, 139, 75, 1961.
- [5] М.А.Ельяшевич. *Спектры редких-земель*, М., Гос. изд. тех.-теор. лит-ры, 1953, стр. 160.
- [6] Е.Д.Трифонов, В.Л.Шехтман. К теории безызлучательных переходов в кристаллах с примесями. Сб. "Физика примесных центров в кристаллах", АН ЭССР, Таллин, 1972, стр. 585; *ФТТ*, 11, 2984, 1969.