

Письма в ЖЭТФ, том 12, стр. 366 – 371

5 октября 1970 г.

**БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ КОНДЕНСАЦИЯ ЭКСИТОНОВ
В КРИСТАЛЛЕ CdSe**

И.Х.Акопян, Е.Ф.Гросс, Б.С.Разбирин

Цель этой работы — экспериментальные поиски явления бозе-конденсации экситонов ¹⁾.

Выбор кристалла CdSe определялся тем, что в нем, по-видимому преобладают не силы притяжения между экситонами, а силы отталкивания [2], что является, как известно [1, 3] условием для бозе-конденсации экситонов.

¹⁾ Подробный список литературы по бозе-Эйнштейновской конденсации экситонов приведен в монографии Москаленко [1].

Авторы сосредоточили внимание в спектре излучения CdSe на полосе экситон-фононного взаимодействия экситонов с оптическими фононами LO [4]. Как было уже отмечено одним из авторов ¹⁾, эта полоса может служить хорошим индикатором наступления бозе-конденсации экситонов, вследствие появления узкой линии (пика) на длинноволновой границе этой полосы из-за равенства нулю импульса экситонов при бозе-конденсации.

Исследования проводились при 4,2° К. В качестве источника возбуждения использовалась вторая гармоника неодимового лазера ($\lambda_{\text{возб}} = 5300 \text{ \AA}$). Длительность импульса не превышала $5 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$. Мощность возбуждения менялась в пределах от 6 до 1500 квт/см^2 . По грубым оценкам концентрация экситонов достигала $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Спектры излучения фотографировались на приборе с дисперсией 30,5 \AA/мм в исследуемой области.

При мощностях возбуждения $W = 50 \text{ квт/см}^2$ спектр люминесценции CdSe сходен со спектром, описанным в работе [2], где возбуждение кристалла CdSe также проводилось неодимовым лазером. Далее, при мощности возбуждения $W = 55 \text{ квт/см}^2$ спектр кристалла имеет еще много общих черт со спектром, получаемым при возбуждении ртутной лампой ДРШ [5] (см. рисунок). На кривой 1 отчетливо видны первое фононное повторение свободного экситона $n = 1$ серии $\Gamma_9 - \Gamma_7 (A_1 - LC)$; первое фононное повторение свободного экситона $n = 2 (A_2 - LC)$ [5] (по другой интерпретации — полоса M, обусловленная столкновением экситонов [2]) и линия связанного экситона $I_1 - LO$. Резонансные линии излучения экситонов чрезвычайно слабы. Заметим, что полоса $A_1 - LO$ при возбуждении $W = 55 \text{ квт/см}^2$ имеет асимметричную максвеллоподобную форму, которая обусловлена наличием кинетической энергии у экситонов [4].

При дальнейшем увеличении возбуждения, при $W \approx 150 \text{ квт/см}^2$ происходит резкое изменение спектра излучения кристалла (см. рисунок).

Коротковолновая часть полосы $A_1 - LO$ ослабевает в интенсивности и на ее длинноволновом краю появляется новая линия излучения $\lambda = 6887 \text{ \AA}$ шириной $2 - 3 \text{ \AA}$. Обозначим ее K.

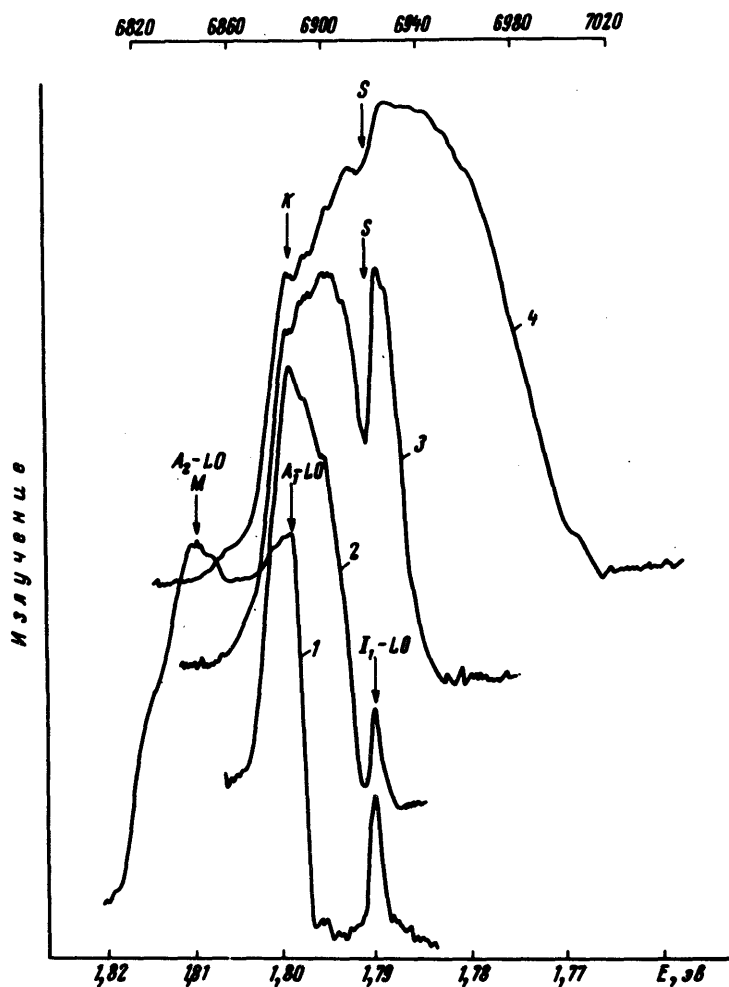
Одновременно, с длинноволновой стороны от линии K появляется сплошной фон излучения, который по мере увеличения возбуждения усиливается и распространяется дальше в длинноволновую сторону. При возбуждении $W = 1500 \text{ квт/см}^2$ он достигает области длин волн $\approx 7000 \text{ \AA}$.

На этом фоне с длинноволновой стороны от линии K обнаруживаются три новые линии излучения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ (см. таблицу), образующие с линией K эквидистантную последовательность с периодом около 8 \AA (2 $m\mu$). Ширина этих линий около 3 \AA . Некоторые из линий имеют дублетную структуру ¹⁾.

1) Е.Ф.Гросс. Доклад в институте полупроводников АН СССР в Ленинграде 2 декабря 1969 г.

2) Все новые линии, как и линия K, не являются модами когерентного излучения, так как неизменно наблюдаются в кристаллах разной толщины и не зависят от геометрии опыта. Однако, в области новых линий при малом возбуждении (ДРШ) существуют 3 линии фононных повторений связанных экситонов с длинами волн 6894; 6902,5; 6913 \AA . Мы не думаем, однако, что при возбуждении лазером проявляются именно эти линии связанных экситонов, так как они расположены при несколько других длинах волн. Кроме того, для линий связанных экситонов обычно не наблюдается усиления их излучения с увеличением возбуждения.

Кроме того, с длинноволновой стороны от новых линий наблюдается еще одна особенность — разрыв в сплошном фоне в виде узкой полосы ¹⁾ (обозначим ее *S*) шириной около 4 Å и с границами 6917 — 6921 Å ²⁾ (см. рисунок). С



Микрофотограммы спектров излучения кристалла CdSe при $T = 4,2^\circ\text{K}$ при возбуждении лазером, $\lambda = 5300 \text{ \AA}$ разной мощности (W). Кривая 1 — $W = 55 \text{ кэВ/см}^2$; кривая 2 — $W = 150 \text{ кэВ/см}^2$; кривая 3 — $W = 200 \text{ кэВ/см}^2$; кривая 4 — $W = 500 \text{ кэВ/см}^2$

1) Анализ наших экспериментальных данных привел нас к заключению, что этот разрыв в фоне излучения не может быть вызван ни поглощением света, ни интерференционными явлениями в CdSe [6].

2) Определению точного значения длинноволновой границы мешает линия $I_1 - LO$ с $\lambda = 6922,5 \text{ \AA}$.

длинноволновой стороны от полосы S ϕ он излучения имеет намеки на сложную структуру. Спектральное положение и ширина новых линий и полосы S не менялись во всем исследованном интервале возбуждений ($150 - 1500 \text{ квт/см}^2$). Происходило лишь перераспределение интенсивности между линиями и распространение сплошного ϕ она в длинноволновую сторону. Примечательно также, что в пределах погрешности измерений ($\pm 1 \text{ \AA}$) мы не наблюдали температурного сдвига спектра, который при сильном возбуждении мог бы быть заметен.

С увеличением возбуждения свыше 150 квт/см^2 полоса $A_2 - LC$ (или M) ослабевает и заметно суживается. В некоторых кристаллах она совсем пропадает.

Спектральное положение линий и полосы S ,
наблюдающихся при сильном возбуждении лазером

Обозначение	Длина волны, А	Энергия, эв	Расстояние между линиями, эв
K	6887	1,7999	0,0023
λ_1	6896	1,7976	0,0021
λ_2	6904	1,7955	0,0021
λ_3	6912	1,7934	—
S ¹⁾	$\left\{ \begin{array}{l} 6917 \\ 6921 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1,7921 \\ 1,7911 \end{array} \right.$	0,0010

¹⁾ Для полосы S указаны ее края и ее ширина.

Описанные экспериментальные результаты трудно объяснить в рамках обычных представлений и мы предполагаем, что наблюдаемые явления вызваны бозе-эйнштейновской конденсацией экситонов:

1. Появление узкой линии K и одновременные коренные изменения в распределении интенсивности экситон- ϕ онойной полосы характерны для наступления бозе-конденсации экситонов и согласуются с теоретическим исследованием Б.А.Гергеля, ¹⁾ Казаринова и Суриса [7].

Наличие линии K аннигиляции экситонов показывает, что экситоны при переходе в конденсат не разрушаются (не диссоциированы на электроны и дырки), и, следовательно, в наших опытах с кристаллом $CdSe$ не имеет место "металлизация" экситонов.

¹⁾ Авторь приносит здесь глубокую благодарность Б.А.Гергелю за любезное согласие теоретически исследовать изменения в распределении интенсивности полосы экситон- ϕ онойного взаимодействия при бозе-конденсации экситонов. Мы также искренне признательны Л.В.Келдышу, и Р.С.Казаринову и С.А.Москаленко за неоднократные обсуждения теоретических вопросов бозе-эйнштейновской конденсации экситонов.

2. Интенсивный квазинепрерывный спектр излучения с длинноволновой стороны от линии K естественно связывать со звуковыми колебаниями в экситонном конденсате при взаимодействии аннигилирующих экситонов в бозе-конденсате как с квантами экситонного звука, так и с другими экситонами конденсата при сообщении им импульса $p \neq 0$, что также согласуется с представлениями в теоретических исследованиях В.А.Гергеля.

3. Узкий разрыв в непрерывном спектре излучения — полосу S , может быть, следует рассматривать как спектроскопическое проявление энергетической "щели" Δ в спектре электронных возбуждений в бозе-конденсате экситонов, которая неоднократно предсказывалась в теоретических работах [6].

4. Примечательно, что расстояние между линиями λ_{1-3} ($2 \text{ м}\mu$) равно удвоенной ширине разрыва полосы S в фоне ($1 \text{ м}\mu$). Поскольку из теоретических работ [9] следует, что удвоенная ширина щели равна энергии связи электронно-дырочной пары в конденсате, нам кажется такое совпадение не случайным. Можно полагать, что линии λ_{1-3} возникают в результате разрыва электронно-дырочных пар (энергия разрыва $2 \text{ м}\mu$) за счет энергии аннигиляции экситона.

5. Следует учитывать возможность существования плазменных колебаний в экситонном конденсате (за счет энергии аннигиляции экситонов), которые могут привести к появлению в спектре отдельных линий, попадающих в область наблюдаемого нами сплошного фона.

6. Наличие скачкообразного изменения спектра кристалла CdSe с увеличением возбуждения также свидетельствуют в пользу бозе-конденсации экситонов.

7. Отсутствие зависимости (а может быть малая зависимость) от интенсивности возбуждения расстояния между отдельными линиями и ширины полосы S может быть понято, если допустить, что с увеличением возбуждения и ростом числа экситонов бозе-конденсат увеличивает свой объем в решетке кристалла, сохраняя неизменными плотность и другие физические свойства до тех пор, пока не заполнит весь кристалл.

Авторы искренне благодарят М.А.Дрыгина за большую помощь в проведении эксперимента и выражают глубокую признательность П.Н.Занадворову и Б.М.Рысакову за предоставленную возможность ставить опыты в их лаборатории.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР
Ленинградский
государственный университет
им. А.А.Жданова

Поступила в редакцию
3 сентября 1970 г.

Литература

- [1] С.А.Москаленко. Бозе-эйнштейновская конденсация экситонов и биекситонов. АН Молдавской ССР, Кишинева, 1970.
- [2] D.Magde, H.Mahr. Phys. Rev. Lett., 24, 890, 1970.
- [3] С.А.Москаленко, П.И.Хаджи, А.И.Бобрышева, А.В.Леляков. ФТТ, 5, 1444, 1963; Л.Б.Келдыш, А.Н.Козлов. ЖЭТФ, 54, 978, 1968.
- [4] Е.Ф.Гросс, С.А.Пермогоров, Б.С.Разбирин. ФТТ, 8, 1484, 1966.

- [5] E.F.Gross, B.S.Razbirin, V.P.Fedorov, Yu. P.Naumov. Phys. Stat. Sol., 30, 485, 1968.
- [6] Л.Е.Соловьев, Б.С.Рудаков. Вестник Ленинградского университета, 22, 170, 1967; 23, 23, 1968.
- [7] Б.А.Гергель, Р.Ф.Казаринов, Р.А.Сурис. ЖЭТФ, 53, 544, 1967; Труды IX Международной конференции по физике полупроводников, Ленинград, 1969.
- [8] Л.Б.Келдыш, Ю.Е.Копяев. ФТТ, 6, 2791, 1964; Л.Б.Келдыш, А.Н.Козлов. ЖЭТФ, 54, 978, 1968; Б.А.Гергель. ФТТ, 11, 3538, 1969.
- [9] Б.А.Гергель. Автореферат канд. диссертация, М., 1969.
-