

ФОРМА ЭКСИТОННЫХ ЛИНИЙ СУЛЬФИДА КАДМИЯ

А. Н. Георгобиани, Д. В. Озеров, Х. Фридрих \*)

Экситонный спектр сульфида кадмия относится к числу наиболее подробно исследованных спектров соединений  $A^{II}B^{VI}$ . Исследование поглощения /1,2/ при низких температурах (1,8°K) с использованием спектральных приборов с большой дисперсией (2,0 Å/мм) позволило выявить сложную структуру этих спектров. Применение модуляционных методов резко увеличило чувствительность и точность эксперимента, что дало возможность перейти к более детальному рассмотрению экситонных эффектов.

Край собственного поглощения  $cds$  исследовался с помощью ряда различных модуляционных методов /3 - 5/, причем большинство выполненных работ связано с модуляцией оптических свойств кристаллов электрическим полем. Модуляция электрическим полем является наиболее простым методом с экспериментальной точки зрения, однако электрическое поле само сильно меняет свойства экситонов (искажение и уширение экситонных линий, смещение линий /3/; кроме того, в принципе, возможно расщепление линий за счет снятия вырождения), что зачастую делает невозможным подробное их исследование. Термомодуляция, аналогичная с теоретической точки зрения  $\lambda$ -модуляции, помимо дополнительного уширения линий, вызванного повышением средней температуры кристалла, дает также дополнительный вклад в сигнал, обусловленный модуляцией полуширины  $\Gamma$  по температуре ( $d\Gamma/dT$ ), который затрудняет теоретическую интерпретацию полученных экспериментальных результатов, особенно, если речь идет об исследовании формы экситонных линий.

\*) Центральный институт электронной физики АН ГДР, Берлин, ГДР.

С этой точки зрения особую ценность приобретает метод, не оказывающий непосредственного влияния на исследуемый полупроводник, а именно, модуляция длины волны света -  $\lambda$ -модуляция.

С целью получить дополнительные данные о форме экситонных линий у края собственного поглощения мы исследовали спектры  $\lambda$ -модулированного отражения "чистых" монокристаллов сульфида кадмия.

Данные измерения были выполнены при 80°K и 10°K с использованием решеточного монохроматора МДР-3 с линейной дисперсией 13 Å/мм, частота модуляции составляла величину порядка 33 Гц. Глубина модуляции выбиралась всегда таким образом, чтобы не были заметны искажения спектров. Разрешающая способность при этих измерениях составляла 0,5 мэВ.

Согласно работе /4/, величину  $\Delta R/R$ , измеряемую на опыте, можно представить в виде

$$\Delta R/R = \alpha(\epsilon_1, \epsilon_2)\Delta\epsilon_1 + \beta(\epsilon_1, \epsilon_2)\Delta\epsilon_2, \quad (I)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - функции реальной ( $\epsilon_1$ ) и мнимой ( $\epsilon_2$ ) частей диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Используя спектральную зависимость  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  для CdS /5/, можно показать, что в области края собственного поглощения  $|\alpha| \gg |\beta|$ , и  $\alpha \approx \text{const}$ , т.е. в выражении (I) существенен только первый член, и поведение  $\Delta R/R$  у CdS полностью определяется видом функции  $\Delta\epsilon_1 = f(\hbar\omega)$ .

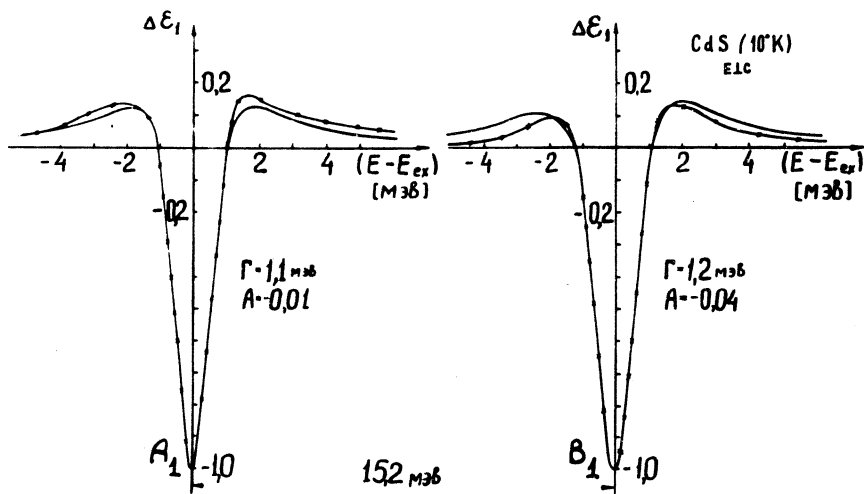
Согласно теории экситонов Тойозавы /6/, в случае слабого экситон-фононного взаимодействия форма линии является лоренцевской, а в случае сильного взаимодействия - гауссовской. В промежуточном случае получается асимметричный вид. Общее выражение для дисперсии экситона в случае слабого экситон-фононного взаимодействия и в промежуточном случае дается

$$\epsilon \sim \frac{2\Delta - 1}{(E - E_{ex}) + i\Gamma}, \quad (2)$$

где  $\Delta$  - асимметричный параметр уширения,  $\Gamma$  - лоренцевский параметр уширения,  $E_{ex}$  - энергия экситонного перехода,  $E = \hbar\omega$ . Из этого выражения для производной реальной части  $\epsilon$  получаем

$$\frac{\partial \epsilon_1}{\partial E} = \frac{(E - E_{ex})^2 - \Gamma^2 - 4\Delta\Gamma(E - E_{ex})}{[(E - E_{ex})^2 + \Gamma^2]^2}. \quad (3)$$

мы провели сопоставление полученных форм линий при  $10^\circ\text{K}$  и  $80^\circ\text{K}$  с кривыми, построенными по формуле (3) (рис. 1 и 2). Величины  $\Gamma$  и  $A$ , полученные в результате сравнения теоретических и

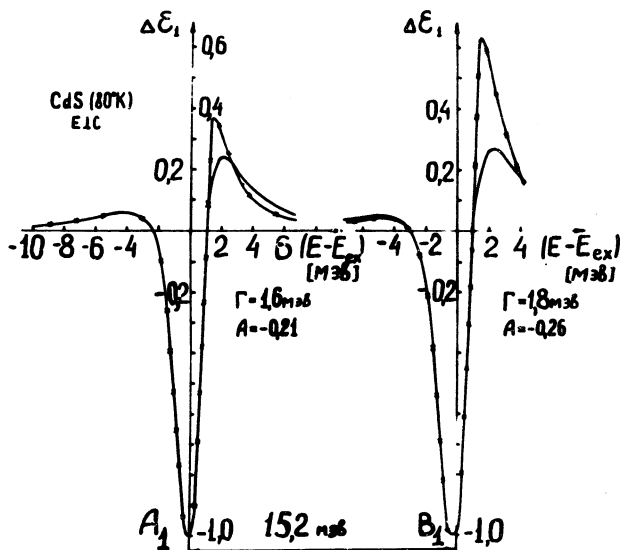


Р и с. 1. Экспериментальные (—х—х—) и теоретические (—) формы линий  $A_1$  и  $B_1$ -экситонов  $\text{CdS}$  для  $\text{E1C}$  при  $10^\circ\text{K}$ . Отношение амплитуд экситонных пиков в эксперименте  $B_1/A_1 = 1,6$ .

экспериментальных кривых, указаны на рисунках возле каждой линии.

Как видно из рис. 1, форма линии как  $A_1$  —, так и  $B_1$ -экситона при  $10^\circ\text{K}$  является практически симметричной ( $A = -0,01$  и  $-0,04$  соответствуют случаю слабого экситон-фононного взаимодействия), и экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теорией. Небольшие расхождения на крыльях линий также объясняются исходя из теории формы линии Тойозавы, одним из существенных выводов которой является заключение, что в формировании экситонной полосы принимают участие два типа колебаний; один формирует центральную часть полосы, а другой — края полосы /7,8/. В первом случае это могут быть LO- или LA-фононы; а во втором — TA-фононы.

Как видно из рис. 2, форма линий А- и В-экситонов при 80°K становится более асимметричной ( $A = -0,21$  и  $-0,26$ ), что соответствует усилению экситон-фононного взаимодействия, ожидаемо



Р и с.2. Экспериментальные (—x—) и теоретические (—) формы линий  $A_1$ - и  $B_1$ -экситонов CdS при 80°K. Отношение амплитуд экситонных пиков в эксперименте  $B_1/A_1 = 0,7$ .

личны коэффициента асимметрии  $A$  показывает, что взаимодействие экситонов с фононами можно и при этой температуре рассматривать как слабое. Помимо увеличения асимметрии повышение температуры приводит к увеличению расхождения между теоретической и экспериментальными кривыми на крыльях, которое объясняется увеличением числа TA-фононов, формирующих край линии.

Поступила в редакцию  
24 января 1973 г.

## Л и т е р а т у р а

1. J. J. Hopfield, D. G. Thomas. Phys. Rev., 122, 35 (1961).
2. E. Gutsche, J. Voigt. Proc. Intern. Conf. II-VI Semicond. Comp., Providence 1967, p.337.
3. E. Gutsche, H. Lange. Phys. Stat. Sol., 22, 229 (1967).
4. B. O. Seraphin, N. Bottka. Phys. Rev., 145, 628 (1966).
5. M. Iliev, I. Assenow, S. Stoyanov. Phys. Stat. Sol. (b), 40, k51 (1970).
6. Y. Toyozawa. Progr. Theor. Phys., 20, 53 (1958).
7. Y. Toyozawa. Techn. Rept. ISSP, SA 119 (1964).
8. Y. Toyozawa. Progr. Theor. Phys., Suppl, 12, 111 (1959).