

## СОБСТВЕННО-ДЕФЕКТНЫЙ МЕХАНИЗМ АКУСТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ

*И.В.Островский*

Показано, что акустическая волна (АВ) сверхпороговой мощности генерирует оптически активные дефекты структуры кристалла, что приводит к возникновению явления акустолюминесценции (АЛ).

В работе [1] сообщалось о люминесценции кристаллов нового вида — АЛ. Данная работа посвящена исследованию механизма АЛ, поскольку он неизвестен. Экспериментально АЛ возбуждалась в высокоомных пластинах CdS, выращенных из паровой фазы, и в объемных неокрашенных монокристаллах NaCl (рис. 1). Ультразвуковые АВ в пластинах CdS возбуждались за счет собственного пьезоэффекта CdS, при подключении к металлическим электродам 2 высокочастотного напряжения  $V(\omega)$ . В NaCl АВ возбуждались пьезопреобразователями 6 или 7. Для исключения инжекции носителей заряда в CdS использовались тефлоновые пленки 3 толщиной 5 мкм, либо применялись прижимные неполированные латунные контакты, обеспечивающие воздушный зазор между электродом 2 и образцом 1. При повышении амплитуды возбуждающего напряжения до некоторого порогового  $V_{\text{п}}$  возникала люминесценция вдоль пути распространения ультразвука. Измерения пороговой плотности потока энергии ультразвука в CdS осуществлялись по ампли-

туде акустозлектрического тока ( $I_a$ ) при 300 К. По амплитуде  $I_a$  при  $V(\omega) = V_{\Pi}(\omega)$  была рассчитана пороговая плотность потока энергии, составившая от одного до нескольких Вт/см<sup>2</sup> для различных образцов. В случае NaCl энергия АВ находилась через сопротивление акустического излучения пьезопреобразователей. При  $V = V_{\Pi}$  интенсивность ультразвука порядка 10 Вт/см<sup>2</sup>.

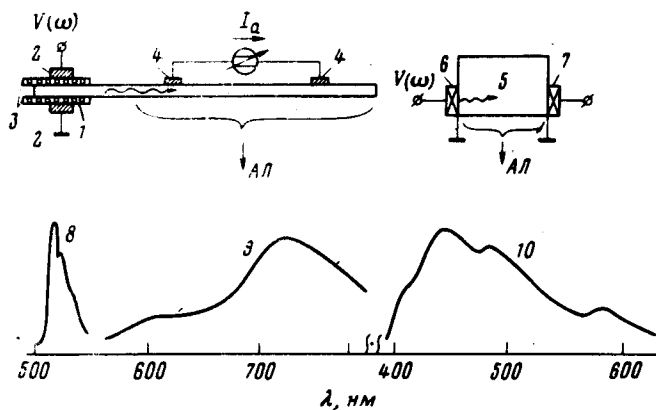


Рис. 1. Схемы возбуждения и схемы АЛ: 1 — образец CdS; 2 — электроды возбуждения АВ; 3 — тефлоновая пленка; 4 — индиевые контакты съема акустотока; образец NaCl; 6 и 7 — пьезопреобразователи из  $\text{LiNbO}_3$   $x$ -среза; 8 — спектр АЛ для обр. L45,  $(\omega/2\pi) = 5,9$  МГц; 77,4 К; 9 — спектр АЛ для обр. L81,  $\omega/2\pi = 15$  МГц, 77,4 К; 10 — спектр АЛ для обр. N16,  $\omega/2\pi = 9,6$  МГц, 300 К

На рис. 1 приведены типичные спектры АЛ для CdS (8 и 9) и NaCl (10). Приведенные спектры АЛ CdS связаны с центрами люминесценции, включающими собственные дефекты решетки: красная полоса с максимумом на 720 нм связана с излучательными электронными переходами между вакансиями серы ( $V_S$ ) и кадмия ( $V_{Cd}$ ) [2], оранжевая полоса с максимумом на  $605 \pm 5$  нм связана с междуузельным кадмием ( $Cd_i$ ) [3], краевое зеленое излучение связано с междуузельной серой ( $S_i$ ) [4]. Спектр АЛ NaCl имеет максимум в области  $440 + 460$  нм, т. е. в области полосы поглощения  $F$ -центров, что соответствует  $\alpha$ -люминесценции NaCl, связанной с собственными дефектами [5].

Проводилось травление кристаллов NaCl и CdS для выявления дислокационной структуры. Оказалось, что при сверхпороговой мощности ультразвука ( $V > V_{\Pi}$ ) дислокации могут двигаться и размножаться в кристалле. Этот результат понятен, поскольку дислокации обладают дальнедействующим полем упругих напряжений и могут концентрировать энергию АВ в области ядра дислокации. Дефекты структуры типа вакансии-атом в междуузлии могут возникать при возвратно-поступательном скольжении дислокаций с порогами в поле упругих напряжений ультразвука.

Для выявления оптической активности дефектов, возникающих в поле АВ сверхпороговой мощности, исследовалось влияние АВ на оптические спектры CdS. На рис. 2 показаны изменения энергетического

положения спектров пропускания и отражения ( $A$ -экситон). Длинноволновый сдвиг  $A$ -экситона обусловлен изменением ширины запрещенной зоны и равен ее уменьшению, что составляет 11 мэВ. Сдвиг спектров поглощения равен 50 мэВ. Избыточный сдвиг  $T_v$  в сравнении с  $R_v$  говорит о появлении оптически активного  $Cd_i$  [6], являющегося мелким донором. В спектрах экситонов, локализованных на акцепторах ( $J_1$ ) и донорах ( $J_2$ ), наблюдается рост после нагружения кристаллов ультразвуком – рис. 3. Спектр 2, снятый после пятиминутного возбуждения АВ, возрос по интенсивности на 20%, что говорит о росте числа акцепторов и доноров. Зеленое краевое излучение уменьшается, а оранжевая люминесценция CdS возрастает, что видно при сравнении спектров 3 и 4 на рис. 3. Изменения в спектрах люминесценции, вызванные АВ, говорят о генерации оптически активных пар дефектов типа  $V_{Cd} - Cd_i$  и  $V_S - S_i$ . Это следует из того, что экситоны  $J_1$  и  $J_2$  могут связываться на акцепторах  $S_i$ ,  $V_S$  и донорах  $Cd_i$ , соответственно [7, 8]; увеличение концентрации  $Cd_i$  приводит к росту оранжевой люминесценции [3], а  $V_{Cd}$  подавляет зеленую краевую люминесценцию [9].

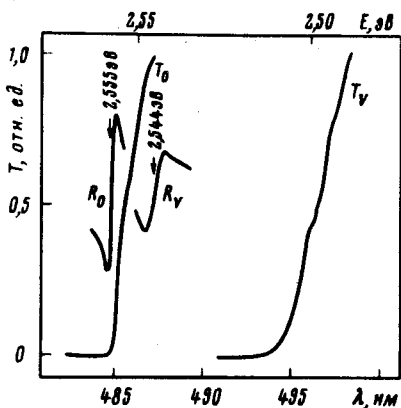


Рис. 2'

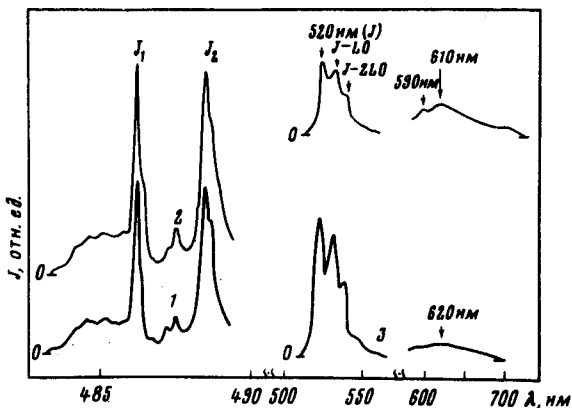


Рис. 3

Рис. 2. Спектры пропускания ( $T$ ) и отражения ( $R$ ), снятые в обр.  $L45$  при  $4,2\text{ К}$ .  $T_0$  и  $R_0$  без АВ ( $V = 0$ );  $T_v$  и  $R_v$  при сверхпороговой АВ ( $V = 1,2 V_{\Pi}$ )

Рис. 3. Влияние АВ на фотолуминесценцию CdS. Обр.  $RL\ 82B(4,2\text{ К})$ : 1 –  $V = 0$ ; 2 –  $V > V_{\Pi}$ ,  $\omega/2\pi = 7,4\text{ МГц}$ . Обр.  $L46(77,4\text{ К})$ : 3 –  $V = 0$ ; 4 –  $V > V_{\Pi}$ ,  $\omega/2\pi = 7,4\text{ МГц}$

Собственно-дефектный механизм АЛ представляется следующим: 1) АВ сверхпороговой мощности генерирует пары дефектов; 2) излучательные электронные переходы в этих донорно-акцепторных парах формируют спектры АЛ. Например, для CdS электронный переход из донора  $Cd_i$  на акцептор  $S_i$  дает зеленую люминесценцию с максимумом на 520 нм; переход из донора  $V_S$  на акцептор  $V_{Cd}$  дает красную полосу с максимумом на 720 нм; переходы из комплексов  $Cd_i -$  ловушка на акцептор  $S_i$  (или в валентную зону) дают оранжевую люминесценцию.

Такой механизм АЛ в CdS согласуется с известными уровнями энергии однократно заряженных собственных дефектов в запрещенной зоне.

По существу, однократно заряженные доноры и акцепторы в паре соответствуют электронно-возбужденному состоянию френкелевской пары в CdS. Генерация однократно заряженных собственных дефектов в соединениях  $A_2B_6$  требует меньших энергозатрат нежели нейтральных [10]; а двукратно заряженные вакансии, например  $V_{Cd}^{--}$  в специально нелегированных кристаллах практически не встречаются [10]. После излучательного электронного перехода вакансии и междоузельные атомы становятся двукратно заряженными и эффективно аннигилируют, возвращая кристалл в исходное состояние. Аннигиляция обусловлена возможностью миграции по кристаллу ионов с устойчивыми электронными оболочками  $Cd_i^{+*}$  [11] и  $S_i^{-}$  [11]. Время затухания яркости АЛ в CdS при  $77,4\text{ K} < 10^{-5}$  сек, что соответствует аннигиляции близких френкелевских пар, которые отжигаются, начиная с  $60\text{ K}$  [11]. Аналогичная схема применима и для пар дефектов в NaCl.

Собственно-дефектный механизм АЛ отличается от механизма люминесценции при пластической деформации, поскольку деформационная люминесценция в  $A_2B_6$  связана с выносом дислокаций электрического заряда на поверхность и последующей электролюминесценцией, или ионизацией примесных уровней [12]; последнее относится также и к щелочно-галлоидным окрашенным кристаллам.

В заключение выражаем благодарность А.Х.Рожко за помощь по записи спектров при  $4,2\text{ K}$ , а также М.Д.Галанину, Ю.В.Гуляеву, С.Г.Кашлашникову, В.А.Красильникову и М.В.Фоку за интерес к работе и ее обсуждение на семинарах.

Киевский  
государственный университет  
им. Т.Г.Шевченко

Поступила в редакцию  
25 апреля 1981 г.  
После переработки  
15 сентября 1981 г.

### Литература

- [1] *Островский И.В., Рожко А.Х., Лысенко В.Н.* XXVII Собрание по люминесценции, Эзерниеки, 185, 1980.
- [2] *Ермолович И.Г., Горбунов В.В., Конозенко П.Д.* ФТП, 11, 1977, 1812.
- [3] *Kulp В.А.* Phys. Rev., 125, 1962, 1865.
- [4] *Kulp В.А., Kelly R.H.* J. Appl. Phys., 31, 1960, 1057.
- [5] *Витол И.К.* Изв. АН СССР, сер. физ., 30, 1966, 564.
- [6] *Ekbote P.D., Moharil S.V., Zope I.K.* Ind. J. Pur. Appl. Phys., 16, 1978, 488.
- [7] *Lider K.F., Novikov B.V., Permogorov S.A.* Phys. Stat. Sol., 18, 1976, K1
- [8] *Гринь В.Ф., Лашкарев В.Е., Сальков Е.А.* УФЖ, 18, 1973, 118.
- [9] *Camaguchi M.* Jap. Jour. Appl. Phys., 15, 1976, 1675.
- [10] Физика и химия соединений  $A_2B_6$ , гл. 4, 135, М., Мир, 1970.

- [ 11 ] Точечные дефекты в твердых телах. гл. 1 и 5, М., Мир, 1979;  
*Емцев В.В., Мошовец Т.В.* Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., изд. Радио и связь, 1981.
- [ 12 ] *Ossipyan Yu. A., Petrenko V.F.* Jour. de Phys., 40, 1979. C6-161.
-