

ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО КОНДЕНСАТА В МОНОКРИСТАЛЛАХ CdS

Л.Ф.Гудыменко, Е.Г.Гуле, В.А.Корнейчук
А.М. Яремко

Впервые наблюдается резонансное взаимодействие между состояниями, ответственными за линии люминесценции $P-Q$ и I_1-LO , которое является дополнительным подтверждением плазменной природы линий P и Q . Оценена концентрация электронно-дырочных пар, равная $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (линия P) и $1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (линия Q).

При интенсивном возбуждении монокристаллов CdS и температуре 4,2К в спектре фотолюминесценции его возникает так называемая линия P , которую в [1] связывают с рекомбинационным излучением неравновесной электронно-дырочной плазмы (ЭДП). Такой же механизм был предложен и для объяснения линии Q [2].

В настоящей работе мы приводим дополнительные доказательства плазменной природы линий P и Q , поведение которых может быть описано моделью электронно-дырочного конденсата (ЭДК).

В работе исследовались лепестковые монокристаллы CdS, выращенные из газовой фазы. Концентрация примесей составляла $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. ФЛ возбуждалась азотным лазером ЛГИ-21, максимальная интенсивность накачки — $P_{max} = 2 \div 3 \text{ Мвт} \cdot \text{см}^{-2}$, температура образца — 4,2К. Спектры ФЛ фотографировались на спектрографе с линейной дисперсией 7 \AA/мм . Микрофотограммы спектров различных образцов приведены на рис. 1.

Для наиболее чистых образцов, у которых концентрация доноров, определенная по примесной фотопроводимости, не превышает $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а излучение экситонно-примесных комплексов (ЭПК) связанных с нейтральными акцепторами вообще отсутствует, при интенсивностях накачки $> 0,2 P_{max}$ в спектре ФЛ доминирует излучение линии P . В пределах накачки от 0,1 до 0,6 P_{max} максимум излучения линии P смещается в длинноволновую сторону примерно на 2 мэв, а сама линия незначительно уширяется. С дальнейшим ростом накачки уширение и сдвиг прекращаются (рис. 1, а).

В ряде образцов, при достижении критической накачки ($\sim 0,25 P_{max}$), линия P уширяется и сдвигается в длинноволновую сторону, переходя в линию Q , с последующей тенденцией к стабилизации по положению, полуширине и интенсивности (рис. 1, б). Зависимость интенсивности излучения линий $P-Q$ (для рис. 1, б) и линии P (для рис. 1, а) от накачки приведены на верхней вставке к рис. 1, б, кривые 1 и 2, соответственно.

В образцах, у которых в спектрах ФЛ, полученных при низких уровнях возбуждения, имеется довольно интенсивное излучение ЭПК, связанное с нейтральными акцепторами (линия I_1), зависимость интенсивнос-

ти излучения фононного повторения (линия $I_1 - LO$) от накачки носит аномальный характер. До появления в спектре ФЛ линии P интенсивность $I_1 - LO$ растет линейно с ростом накачки. С появлением линии P

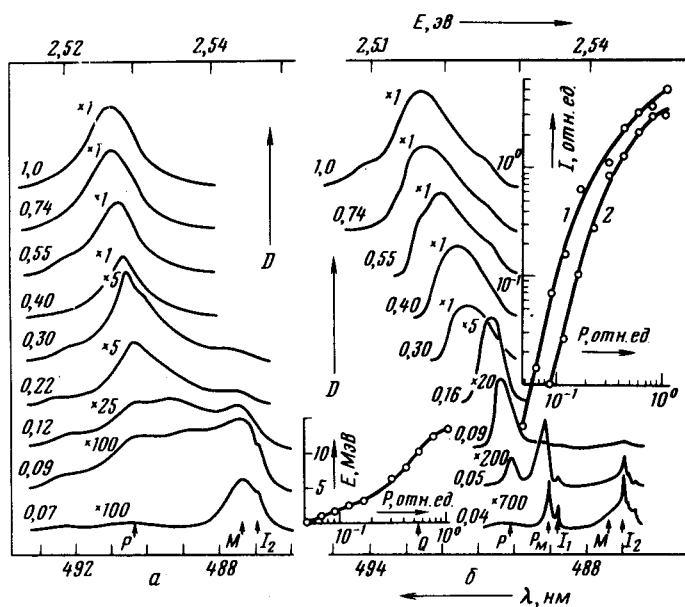


Рис. 1. Микрофотограммы спектров люминесценции монокристаллов CdS . Интенсивность накачки в единицах P_{max} приведена слева для каждого спектра. Верхняя вставка — зависимость интенсивности излучения линий $P-Q$ (для b) и линии P (для a) от накачки. Вставка внизу — сдвиг энергетического положения максимума излучения линий $P-Q$ в зависимости от накачки

интенсивность линии $I_1 - LO$ резко растет (на несколько порядков), повторяя рост интенсивности линий $P-Q$, хотя излучение ЭПК I_1 при таких интенсивностях накачки уже насыщается. Следует отметить, что в некоторых образцах интенсивность линии $I_1 - LO$ даже превышает таковую для линий $P-Q$ (рис. 2). С приближением линии Q к $I_1 - LO$, полуширина последней увеличивается за счет смещения длинноволнового крыла в сторону меньших энергий (см. рис. 2 и вставку к нему).

Такое поведение линии $I_1 - LO$ указывает на наличие резонансного взаимодействия между состояниями, соответствующими линиям $P-Q$ и $I_1 - LO$, которое подобно плазмон-фононному резонансу в спектрах ИК поглощения [3]. Наличие такого резонансного взаимодействия возможно лишь в том случае, если линиям $P-Q$ и $I_1 - LO$ соответствуют реальные энергетические уровни в кристалле. Ни экситон-экситонные, ни экситон-электронные соударения, которые предлагались для объяснения линий P [4] и Q [5], не могут давать такого резонансного взаимодействия, так как в этом случае линиям P и Q отвечают поляритонные состояния. Кроме того, плавность перехода излучения линии P в линию

Q как по энергетическому положению, так и по интенсивности (см. нижнюю и верхнюю вставки к рис. 1, б), а также одинаковый характер их взаимодействия с линией I_1-LQ указывают на то, что за данные линии ответственны подобные энергетические состояния кристалла. Первое реальное состояние кристалла с широким непрерывным спектром, принимающее участие в процессе резонансного взаимодействия, может быть связано только с ЭДП. Второе реальное состояние связано, по видимому, с экситон-фононным комплексом [6]. Следует отметить, что наличие фононов является неременным условием резонанса, так как плазма экранирует кулоновское взаимодействие между электроном и дырками и в связи с этим ЭПК и плазма пространственно разнесены.

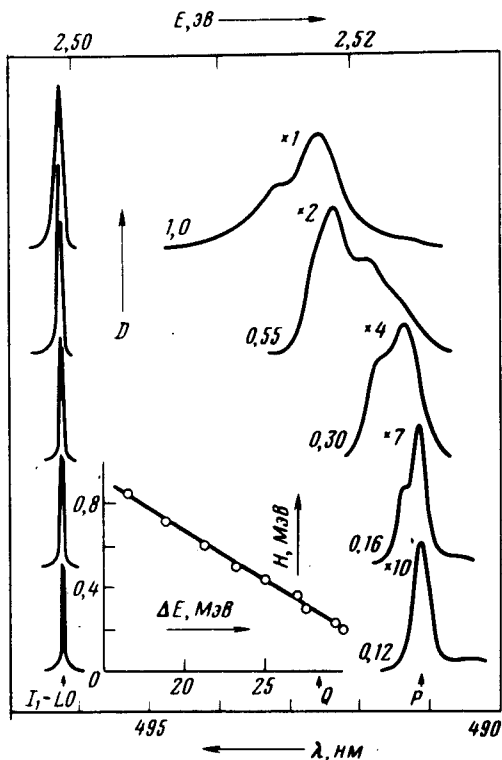


Рис. 2. Микрофотограммы спектров люминесценции CdS при наличии резонансного взаимодействия. Вставка внизу — зависимость полуширины линии $I_1-LQ(H)$ от расстояния между I_1-LQ и линией $P-Q$

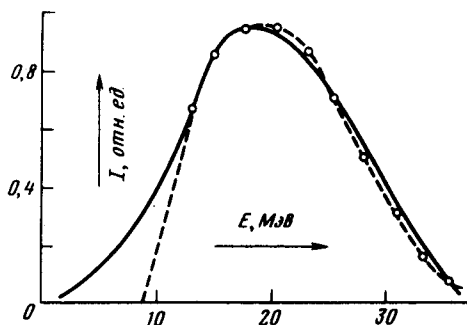


Рис. 3. Форма линии излучения ЭДК в CdS. Сплошная кривая — экспериментальные результаты, точками и пунктирной линией приведены результаты расчета для $n_c = 0,9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $T = 30\text{К}$

Согласно [1, 7], энергия ЭДП в CdS имеет минимум при концентрации электронно-дырочных пар $n_c \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При образовании ЭДП электроны и дырки будут стремиться сконденсироваться в ЭДК с концентрацией электронно-дырочных пар равной n_c . Плотность электронно-дырочных пар внутри конденсата при постоянной температуре не должна изменяться с ростом уровня возбуждения. Повышение уровня накачки может привести только к увеличению количества или размеров ЭДК. Форма линии излучения ЭДК и ее энергетическое положение зависят лишь от n_c , а также не должны зависеть от уровня накачки. Это действительно наблюдается для случая наиболее чистых образцов, полуширина и энергетическое положение линии P у которых при интенсивностях накачки $\geq 0,6 P_{\text{макс}}$ не зависят от уровня возбуждения (рис. 1, а).

Теоретический анализ формы линии излучения ЭДК, проведенный по формуле (7) [1] для различных значений концентраций и температур, показал, что наилучшее согласие с результатами эксперимента имеет место при значениях $n_c = 0,9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $T = 30 \text{ К}$ (рис. 3).

Резкое уширение и сдвиг линии P в длинноволновую сторону и переход ее в линию Q (рис. 1, б) указывает на повышение плотности электронно-дырочных пар внутри конденсата. Энергетическое положение и полуширина линии Q , полученные при максимальных накачках, соответствуют концентрации электронно-дырочных пар $n = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Такое повышение концентрации электронно-дырочных пар внутри конденсата обусловлено, по-видимому, тем, что весь накачиваемый объем полностью заполняется ЭДК и дальнейший рост накачки должен приводить к увеличению плотности.

Институт полупроводников
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
31 октября 1977 г.

Литература

- [1] В.Г.Лысенко, В.И.Ревенко, Т.Г.Тратас, В.Б.Тимофеев. ЖЭТФ, **68**, 335, 1975.
- [2] G.O.Huller, H.Rösler, H.H.Weber, R.Zimmerman, H.A.Jacobson, G.V.Michailov, B.S.Razbirin, J.N.Uraltsev. J. Lumm., **12/13**, 557, 1976.
- [3] J.F.Scott, T.C.Damen. Phys. Rev., **B3**, 1295, 1971.
- [4] Benoit a la Guillaume, J.Debever, F.Salvan. Phys. Rev., **177**, 567, 1969.
- [5] T.Fischer, J.Bille. J. Appl. Phys., **45**, 3937, 1974.
- [6] Э.И.Рашба. ФТП, **8**, 1974.
- [7] R.F.Leheny, J.S'bah. Phys. Rev. Lett., **38**, 511, 1977.