

САМООБРАЩЕНИЕ ЭКСИТОННЫХ ЛИНИЙ
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ТОНКАЯ СТРУКТУРА
ЭКСИТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В CdTe

А. А. Гиппиус, В. С. Вавилов, Ж. Р. Паносян,
В. В. Ушаков

Данная работа посвящена выяснению особенностей экситонной люминесценции и поглощения в кристаллах теллурида кадмия (резонансная линия, прямые переходы). С этой целью были проведены детальные измерения спектров фото- и катодолюминесценции и отражения в температурном интервале $4,2 - 77^\circ\text{K}$ со спектральным разрешением 10^{-4} эв. Данные отражения были использованы для расчета спектральной зависимости коэффициента поглощения (α) и показателя преломления при помощи соотношений Крамерса-Кронига. Расчет проводился на ЭВМ БЭСМ-4 (ФИАН). Результаты этого расчета использовались далее для вычисления спектра люминесценции с использованием принципа детального равновесия (при этом принималась во внимание дисперсия показателя преломления).

В полупроводниках с прямыми переходами спектры экситонного поглощения и люминесценции должны иметь линейчатый характер (речь идет о так называемой резонансной линии, когда поглощение или испускание света происходит без одновременного испускания или поглощения фонона)¹. Наблюдаемая на опыте конечная ширина линий поглощения обусловлена (в чистых полупроводниках) рассеянием экситонов на фононах. Согласно существующим теоретическим расчетам², подтверждаемым опытными данными³, в полупроводнико-

вых соединениях $A_{II}V_{VI}$ доминирует процесс рассеяния экситонов на Ю - фононах.

При сопоставлении спектров поглощения и люминесценции резонансной экситонной линии необходимо учитывать, что эффект самопоглощения имеет в этом случае некоторые специфические особенности, которые до сих пор, по-видимому, не принимались во внимание. При исследовании фото- и катодолуминесценции возбуждается слой полупроводника толщиной $d \sim 10^{-4}$ см. Величина коэффициента поглощения α в резонансной экситонной линии составляет при температурах 77°K и 4,2°K соответственно $5 \cdot 10^4$ и $2 \cdot 10^5$ см⁻¹. Таким образом оптическая плотность возбужденного слоя оказывается весьма большой ($\alpha d = 5 \div 20$), и интенсивность люминесценции сильно ослабляется за счет самопоглощения. Роль самопоглощения не сводится, однако, только к уменьшению интенсивности люминесценции.

Поскольку контуры линий экситонного поглощения и люминесценции почти совпадают, то при большой оптической плотности возбужденного слоя можно ожидать возникновения эффекта самообращения экситонных линий люминесценции, аналогичного известному в атомной спектроскопии эффекту самообращения спектральных линий. Последний, как известно, заключается в появлении провала в центре спектральной линии излучения и наблюдается в источниках конечной оптической плотности при наличии градиента концентрации излучающих атомов, направленного вглубь источника⁴. В полупроводниках подобный градиент концентрации экситонов может возникнуть за счет большой скорости поверхностной (безызлучательной) рекомбинации. Таким образом при наблюдении экситонной люминесценции могут реализоваться все условия, необходимые для появления эффекта самообращения.

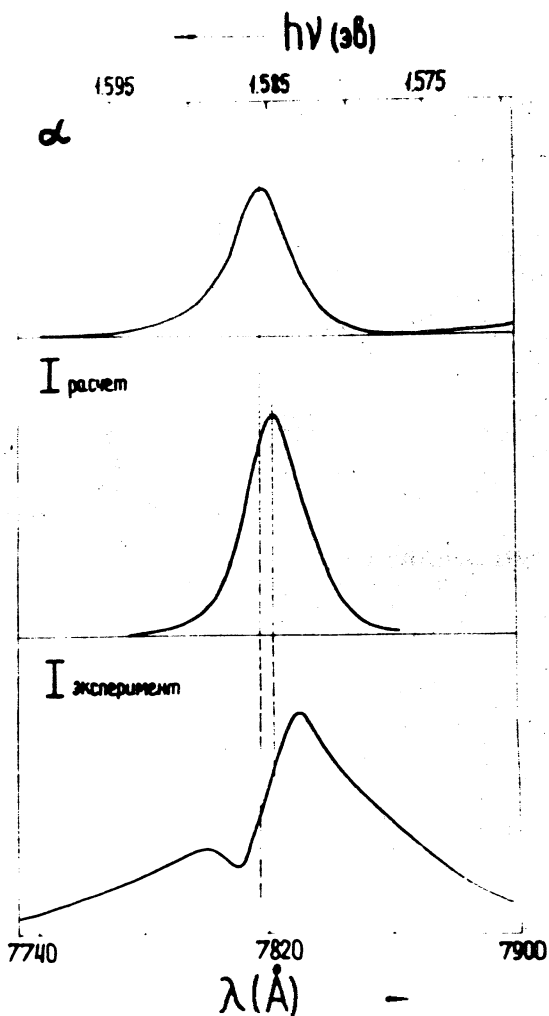
Такие соображения уже высказывались ранее авторами настоящей статьи в связи с интерпретацией спектров фотолюминесценции CdTe⁵.

Подтверждение реальности эффекта самообращения экситонных линий удалось получить в результате сопоставления спектров поглощения (расчетных) со спектрами люминесценции (расчетными и экспериментальными). Как видно на рис. 1, в спектре экситонной люминесценции кристаллов с малой концентрацией примесей наблюдается четко выраженный провал вблизи середины линии излучения. В отличие от самообращения атомных линий, этот провал находится не точно в центре линии, а несколько смещен в сторону больших энергий. Это вызвано тем, что расчетный контур линии излучения $I_{расч.}$ (вычисленный по формуле $I_{расч.}(\nu) =$

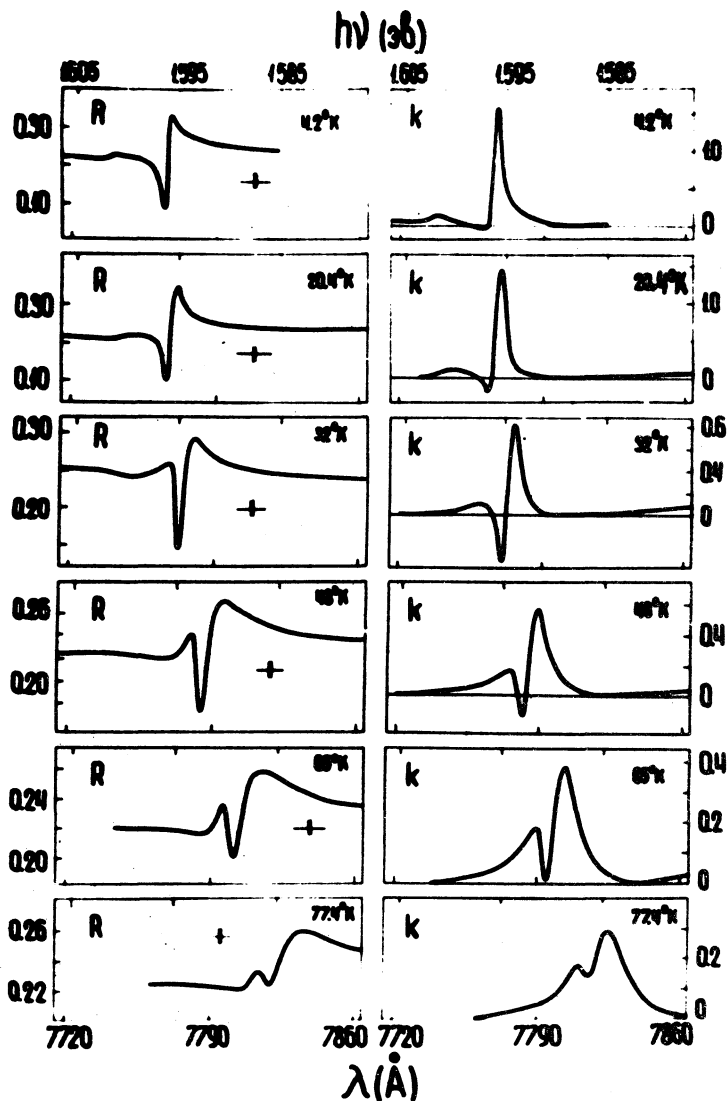
$= \frac{8\pi}{c^3} n^2(\nu) a(\nu) \nu^2 \exp(-h\nu/kT)$) сдвинут в сторону меньших энергий по отношению к контуру линии поглощения. Величина сдвига, зависящая от температуры опыта и ширины линии, оказывается существенной в случае экситонной низкотемпературной люминесценции и пренебрежимо малой в случае резонансных атомных линий. (Экситонная люминесценция: ширина линии $\Delta E \approx \approx 10$ Мэв, $kT = 7$ Мэв ($T = 80^\circ K$), $\Delta E/kT \approx 1$; атомные линии: $\Delta E = 0,01 - 0,1$ Мэв (доплеровское уширение); $kT = 25 - 1000$ Мэв ($T = 300 \div 10000^\circ K$), $\Delta E/kT \approx \approx 10^{-3} - 10^{-4}$).

Как следует из вышесказанного, самообращение экситонных линий возникает при выполнении определенных условий, в которых фигурируют такие свойства полупроводника, которые характеризуют его как источник излучения (градиент концентрации экситонов, конечная оптическая плотность возбужденного слоя, "резонансность" линий поглощения и излучения). При этом конкретный механизм уширения экситонных линий оказывается несущественным.

Интересно отметить, что во многих кристаллах $CdTe$ спектр поглощения при $T = 77^\circ K$ не имеет простую форму, показанную на рис. 1, а обнаруживает ранее не наблюдавшуюся дублетную структуру, температурная зависимость которой показана на рис. 2. Спект-



Р и с. 1. Сравнение расчетных спектров поглощения (α) и излучения, полученного на основе принципа детального равновесия ($I_{\text{расч.}}$) с наблюдаемым экспериментально спектром излучения.



Р и с. 2. Спектры экситонного отражения (R) и поглощения (k) в температурном интервале 4,2–77,4°К. Коэффициент экстинкции k связан с коэффициентом поглощения α соотношением $\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} k$

ры поглощения обоих типов наблюдались на образцах с малой концентрацией примесей, причем нам не удалось установить корреляции между типом спектра и способом обработки поверхности (травление или скол). Как видно на рис. 2, в определенном температурном интервале между двумя максимумами имеется область "отрицательного поглощения", исчезающая с повышением температуры. Природа рассмотренной дублетной структуры не вполне ясна. Относительное постоянство величины расщепления в разных кристаллах и температурная зависимость этого эффекта противоречит предположению о возможной роли случайных напряжений в исследованных кристаллах. Эта структура, по-видимому, не может быть обусловлена тонкой структурой валентной зоны (линейные по k члены в разложении $E(k)$), поскольку связанное с нею расщепление⁶ оказалось на порядок меньше обнаруженного нами. Сравнительно слабая температурная зависимость эффекта не позволяет в полной мере использовать для объяснения наблюдаемых особенностей соображения, основанные на учете пространственной дисперсии⁷. Весьма специфические эффекты, существующие в последнем случае при определенных граничных условиях, по данным⁷ исчезают при повышении температуры. Возможно однако, что в какой-то мере обнаруженные нами особенности (в частности, наличие области "отрицательного поглощения") связаны с тем, что в использованных соотношениях Крамерса-Кронига не учитывалась пространственная дисперсия оптических постоянных и особенности граничных условий на поверхности различных кристаллов. Не исключено, что мы имеем дело с неким новым эффектом, природу которого предстоит выяснить.

При сопоставлении спектров поглощения и излучения образцов, в спектре поглощения которых наблюдалась дублетная структура, оказалось, что оба максимума поглощения находятся в области минимума излучения, так что эффект самообращения, по-видимому, имеет место и в этом случае.

Поступила в редакцию 9 апреля 1970 г.

Л и т е р а т у р а

1. Elliott R. J. *Phys. Rev.*, 108, 1384 (1957).
2. Segall B. Труды IX международной конференции по физике полупроводников. Москва 1968 г., стр. 425.
3. Marple D. Экспериментальные данные приведены в работе².
4. Cowan R. D., Dicke G. W. *Rev. Mod. Phys.*, 20, 418 (1948). Имеется перевод в сб. "Оптическая пирометрия плазмы", ИЛ, 1960.
5. Вавилов В. С., Гиппиус А. А., Паносян Ж. Р. II-VI Semiconducting compounds, Internat. Conf. 1967, Ed. D. G. Thomas, N.-Y. 1967, p. 743.
6. Segall B., Marple D. "Physics and Chemistry of II-VI compounds", chap. 7, Eds. M. Aven and I. S. Prener, Amsterdam 1967.
7. Hopfield I. I., Thomas D. G., *Phys. Rev.*, 135, A429 (1964).