

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР СВОБОДНЫХ ЭКСИТОНОВ В ГЕРМАНИИ

В. М. Гершензон, Г. Н. Гольцман, Н. Г. Птицина

По результатам измерений поглощения и фотопроводимости на субмиллиметровых волнах построен энергетический спектр свободных непрямых экситонов в германии.

В [1–3] сообщалось об экспериментах по наблюдению свободных экситонов в Ge в субмиллиметровом диапазоне волн с помощью спектрометров на лампах обратной волны. В диапазоне энергий $\epsilon = 3,2\text{--}3,65$ мэв в спектрах поглощения и фотопроводимости наблюдались три хорошо разрешенные линии, обязанные переходам непрямых свободных экситонов из основного состояния в возбужденные. В [4] приведены результаты исследования спектров поглощения в более широком диапазоне частот, соответствующем $\epsilon = 1,7\text{--}3,7$ мэв. Получено две серии линий переходов экситонов в возбужденные состояния (сильно и слабо зависящие от температуры) и из температурной зависимости интенсивности линий – величина расщепления основного состояния экситона ($\Delta = 0,7$ мэв).

Нами проведены эксперименты, в которых наряду с измерениями спектров поглощения исследовалась и фотопроводимость. Это позволяет из совокупности данных определить не только энергии переходов, но и сам энергетический спектр свободного экситона. Измерения проводились на образцах Ge с концентрацией примесей $\lesssim 10^{12}$ см⁻³ в диапазоне $\epsilon = 2,5\text{--}5$ мэв при $T = 1,6\text{--}4,2^\circ\text{K}$ при малых уровнях оптического возбуждения (концентрация свободных экситонов n_0 не превышала $5 \cdot 10^{12}$ см⁻³).

На рис. 1, а приведены характерные спектры поглощения при $T=4,2^\circ\text{K}$ и $T = 1,6^\circ\text{K}$, на рис. 1, б – соответствующие спектры фотопроводимости. Спектры фотопроводимости записаны в слабых электрических полях ($\sim 0,1$ в/см), когда линии переходов экситонов в возбужденные состояния имеют малую интенсивность [1], но четко виден край нерезонансной фотопроводимости.

Как видно из рис. 1, а в спектре поглощения наблюдается ряд узких линий; энергетическое положение интенсивных линий в пределах точ-

ности эксперимента ($\sim 0,01$ мэв) совпадает с данными работы [4]. При понижении температуры от $4,2^\circ\text{K}$ интенсивность линий поглощения с энергиями ($\epsilon = 2,76; 3,14; 3,29; 3,42; 3,56$ мэв) существенно не меняется. Интенсивность остальных линий ($\epsilon = 2,85; 2,97$ и $3,07$ мэв также как и в работе [4], падает. В спектрах фотопроводимости при $T = 1,6^\circ\text{K}$ наблюдается длинноволновая граница фотопроводимости с энергией $3,8$ мэв¹⁾, а при увеличении T до $4,2^\circ\text{K}$ появляется дополнительная полоса нерезонансной фотопроводимости с длинноволновым краем $3,4$ мэв.

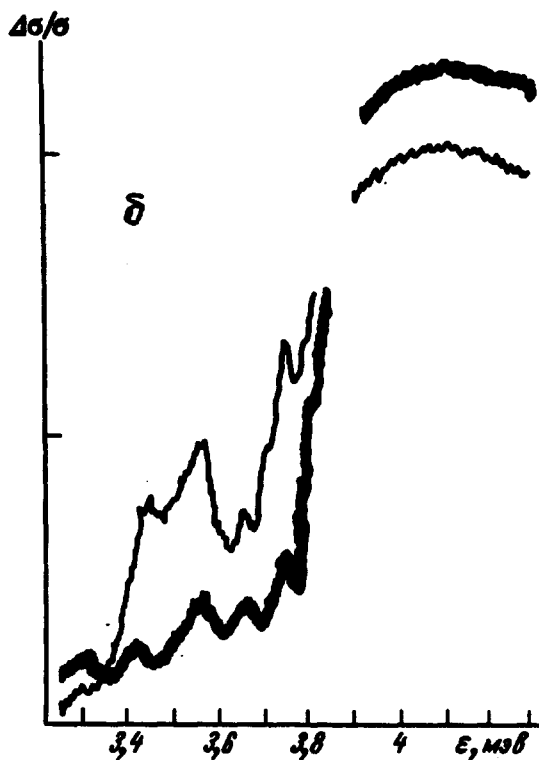
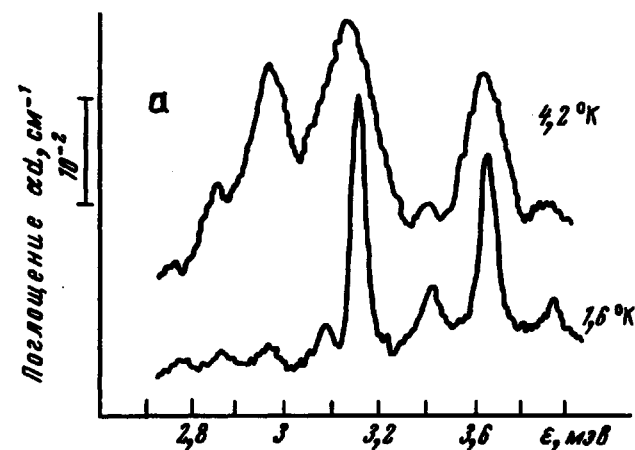


Рис. 1. *a* – Спектр экситонного поглощения Ge (для удобства рассмотрения отдельных кривых они смещены друг относительно друга по оси ординат и на рисунке показан масштаб величины αd), *б* – спектр фотопроводимости Ge (тонкой линией проведена запись спектра при $T = 4,2^\circ\text{K}$, а толстой при $T = 1,6^\circ\text{K}$)

¹⁾ В [5] с помощью длинноволнового решеточного ИК спектрометра было получено значение энергии связи экситона в Ge $4,15$ мэв.

Наличие двух групп линий с различной температурной зависимостью и появление второй длинноволновой границы фотопроводимости при повышении температуры позволяет предположить, что основное состояние свободного экситона в Ge расщеплено на два уровня с энергиями 3,8 и 3,4 мэв.

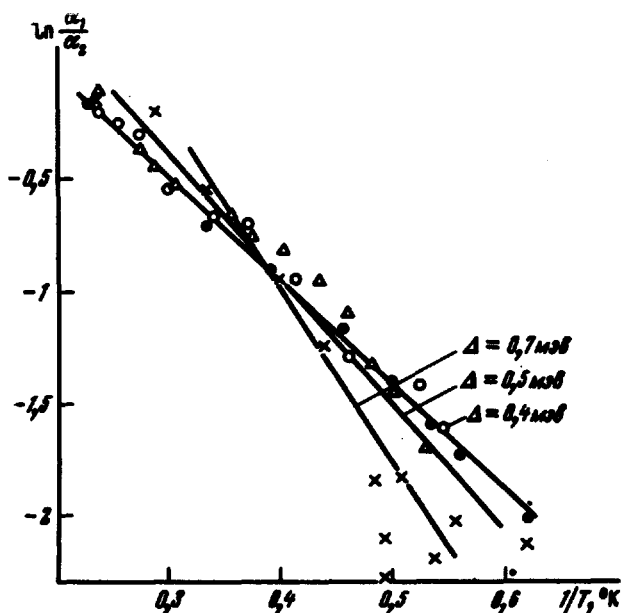


Рис. 2. Зависимость величины поглощения a_1/a_2 от температуры: ● — для линии 2,97 мэв (образец 1), Δ — для линии 2,87 мэв (образец 1), ○ — для линии 2,87 мэв (образец 2), × — результаты работы [4]

Величина расщепления основного состояния может быть определена и из температурной зависимости интенсивности линий поглощения, как это сделано в [4]. На рис. 2 приведены результаты измерения температурной зависимости коэффициента поглощения для линий 2,85 и 2,97 мэв для двух образцов Ge. Там же воспроизведены данные работы [4]. Видно, что наши измерения и данные [4] хорошо совпадают. Однако, экспериментальные точки, соответствующие независимым измерениям, имеют такой разброс, что не позволяют в столь малом температурном интервале однозначно определить характер зависимости

$\ln \frac{a_1}{a_2} \left(\frac{1}{T} \right)$ (где a_1 — коэффициент поглощения для линий, интенсивность которых зависит от T , a_2 — коэффициент поглощения для одной из независимых от T линий с $\epsilon = 3,42$ мэв). Тем не менее, большинство точек укладывается на прямую линию с наклоном 0,4 — 0,5 мэв, что хорошо коррелирует с данными по фотопроводимости, согласно которой величина расщепления $\Delta \approx 0,4$ мэв.

Из совокупности данных по фотопроводимости и поглощению положив $\Delta = 0,4$ мэв нами построен энергетический спектр свободных экситонов в Ge. Полученные значения энергий состояний даны в таблице.

Основное состояние	Возбужденные состояния				
3,8 мэв	1,04	0,66	0,51	0,38	0,24
3,4 мэв	0,55	0,43	0,33	—	—

В заключение отметим, что при увеличении уровня оптического возбуждения ($n_3 > 10^{13}$ см⁻³ при 4,2°К) с понижением температуры начинает резко падать и интенсивность линий, обязанных переходам с нижнего уровня основного состояния, что свидетельствует о проявлении коллективных эффектов для экситонов. Изменение интенсивности этой серии линий поглощения при понижении T до 1,6°К достигает ~ 10 раз (когда $n_3 \approx 5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ при $T = 4,2^\circ\text{K}$) для образцов толщиной $d = 2$ мм. Зависимость $\alpha d(T)$ существенно меняется при уменьшении толщины образца, что может являться следствием неравномерного распределения экситонов по образцу и влияния поверхности образца.

В то же время дополнительные эксперименты, проведенные нами при $n_3 < 10^{12}$ см⁻³ вплоть до $T = 0,5^\circ\text{K}$ показывают, что при таких концентрациях экситонов αd не зависит от T для образцов разной толщины и коллективные эффекты не проявляются.

Московский
педагогический институт
им. В.И.Ленина

Поступила в редакцию
12 июня 1973 г.

Литература

- [1] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, Н.Г.Птицина. Письма в ЖЭТФ, 16, 228, 1972.
- [2] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, Н.Г.Птицина. ЖЭТФ, 64, 2, 587, 1973.
- [3] В.Н.Мурзин, В.А.Заяц, В.Л.Кононенко. Труды XI междунар. конф. по физике полупроводников, 678, 1972.
- [4] В.С.Вавилов, Н.Б.Гузеев, В.А.Заяц, В.Л.Кононенко, Г.С.Мандельштам, В.Н.Мурзин. Письма в ЖЭТФ, 17, 9, 480.
- [5] В.И.Сидоров, Я.Е.Покровский. ФТП, 6, 2405, 1972.