

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДАХ ЭЛЕКТРОНОВ МЕЖДУ ВОЗБУЖДЕННЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ПРИМЕСЕЙ В ГЕРМАНИИ

Е. М. Гершензон, Л. А. Орлов, Н. Г. Ницица

В субмиллиметровом диапазоне волн $2 - 0,5$ мм методом двойной модуляции магнитного поля измерены спектры поглощения мелких доноров при переходах электронов между возбужденными состояниями.

Изучение спектров фотопроводимости мелких примесей при фототермической ионизации основного состояния [1] явилось ценным методом исследования полупроводников (например, [2, 3]). Использование этого метода в субмиллиметровом диапазоне волн, где оптические переходы осуществляются только между возбужденными состояниями, позволило получить ряд новых сведений об энергетической структуре мелких примесных центров [4].

Так как фототермическая ионизация возбужденных состояний является сложным процессом, связанным с поглощением фотона при переходе электрона между возбужденными состояниями и последующим термическим выбросом его в зону, то информация, полученная из спектров поглощения, существенно дополнила бы результаты по фотопроводимости, например, облегчила идентификацию переходов, позволила определить времена жизни на возбужденных состояниях примеси и вероятности переходов между различными состояниями.

Экспериментальное исследование спектров поглощения, особенно для возбужденных состояний, где заселенность на несколько порядков меньше, чем в основном, встречает значительные трудности из-за отсутствия возможности модуляции коэффициента поглощения. Поэтому к настоящему времени исследованы лишь спектры поглощения при переходах электронов с основного состояния в легированном Ge ($N_D \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$) [5].

Нами в чистом Ge ($N_D + N_A < 10^{14} \text{ см}^{-3}$) в субмиллиметровом диапазоне волн ($2 + 0,5$ мм) при температурах $T \approx 8 + 25$ К были исследованы спектры поглощения, обязанные переходам электронов между возбужденными состояниями мелких доноров в условиях эффекта Зеемана. Измерения были проведены на высокочувствительном спектрометре с лампами обратной волны при использовании применяемого в ЭПР спектроскопии метода двойной модуляции магнитного поля; высокочастотная модуляция с глубиной ≤ 200 э осуществлялась на частоте 75 Гц, а пилообразная развертка магнитного поля в пределах записываемого спектра ($0,3 - 5$ э) с периодом в несколько минут. Восстановление формы спектра из сигнала производной выполнялось интегратором с постоянной времени $1,5$ часа. Измерения выполнялись на "проход"; в качестве детектора использовался n -InSb. На исследуемый образец наносились контакты, что позволяло в условиях одного эксперимента записывать как спектры поглощения, так и фотопроводимости. Образец толщиной 10 мм ориентировался так, что магнитное по-

ле было параллельно кристаллографической оси [111]. Чувствительность установки позволяла регистрировать переходы с интенсивностью, соответствующей коэффициенту поглощения $\alpha = 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. Всего в спектрах поглощения было зарегистрировано более 10 переходов.

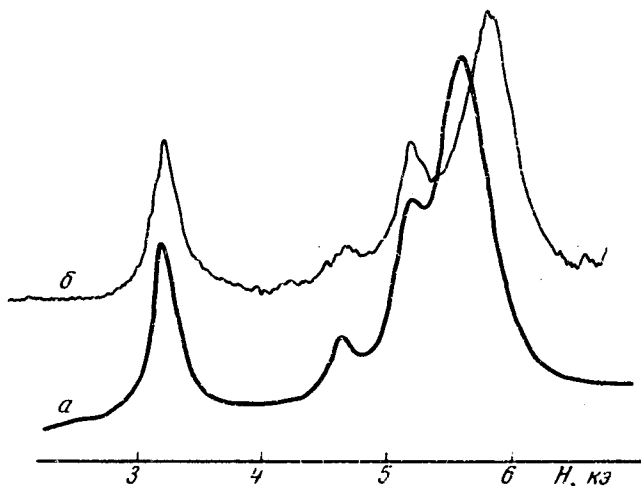


Рис. 1. Спектры поглощения (а) и фотопроводимости (б) в Ge (Sb), $T = 14 \text{ К}$, $\lambda = 740 \text{ мкм}$

В качестве примера на рис. 1 приведены спектры поглощения и фотопроводимости для образца Ge (Sb), полученные при $T = 14 \text{ К}$. Видно, что соотношения интенсивностей переходов для обеих спектрограмм различны, а положение линий, как и для других изученных, совпадает за исключением линии с энергией в нулевом магнитном поле $\epsilon_0 = 1,87 \text{ мэв}$. На рис. 2 приведены температурные зависимости интенсивностей нескольких линий поглощения для того же образца с $\epsilon_0 = 1,31; 1,11; 1,87 \text{ мэв}$. При низких T для каждой линии наблюдается экспоненциальный участок $\alpha(1/T)$, по которому можно определить энергетический зазор между основным и начальным для соответствующего перехода состояниями $\Delta\epsilon_H$. Так, например, для идентифицированных в [4] линий $2s \rightarrow 2p_{\pm 1}$ ($1,87 \text{ мэв}$) и $3p_0 \rightarrow 3d_{\pm 1}$ ($1,31 \text{ мэв}$) $\Delta\epsilon_H$ составляет, соответственно, $7,3 \pm 0,3$ и $8,25 \pm 0,3 \text{ мэв}$. Разница между начальными состояниями этих переходов, равная разности энергий уровней $2s$ и $3p_0$, составляет $0,96 \text{ мэв}$, что хорошо согласуется с расчетом [6] — $0,96 \text{ мэв}$, а энергия основного состояния примеси Sb в Ge с учетом данных [6] — $10,9 \pm 0,4 \text{ мэв}$. Для неидентифицированного перехода с $\epsilon_0 = 1,11 \text{ мэв}$ $\Delta\epsilon_H$ составляет $9 \pm 0,3 \text{ мэв}$, что позволяет считать его начальным состоянием уровень $3p_0$ или $3s$ [6]. С повышением T наблюдается ослабление температурной зависимости и даже абсолютное уменьшение поглощения, что можно объяснить выравниванием заселенности уровней, участвующих в переходах, и истощением основного состояния примесей.

Сравнение температурных зависимостей интенсивности линий поглощения и фотопроводимости показывает, что вероятность выброса электронов $W(T)$ при фототермической ионизации возбужденных со-

стояний для некоторых переходов, например, с $\epsilon_0 = 1,87$ мэв, определяется лишь конечным состоянием ϵ_k и пропорциональна $\exp -(\epsilon_k/kT)$ (такие зависимости наблюдались в [2]), а в ряде случаев большой вклад в величину сигнала фотопроводимости дает выброс и с начального состояния. Так, для линии 1,31 мэв наблюдается немонотонная зависимость $W(T)$ с максимумом при $T \sim 8$ К.

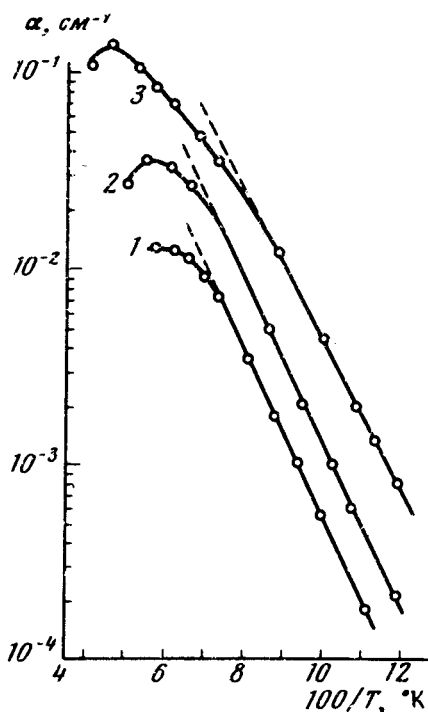


Рис. 2. Температурная зависимость интенсивностей линий поглощения α с ϵ_0 : 1 — 1,11 мэв, $\lambda = 1044$ мкм, 2 — 1,31 мэв, $\lambda = 895$ мкм, 3 — 1,87 мэв, $\lambda = 685$ мкм, $H = 1$ кэ. Зависимости приведены для легких компонент спектра

Интересные особенности были выявлены для перехода ($2s \rightarrow 2p_{\pm 1}$) ($\epsilon_0 = 1,87$ мэв). Отсутствие двух переходов, связанных с расщеплением уровня $2s$, в спектрах фотопроводимости [4] вызвало дискуссию в литературе [7]. Спектр поглощения для этого перехода оказался представленным двумя плохо разрешенными компонентами различной интенсивности (рис. 3). Экстраполированная к нулевому магнитному полю величина расщепления уровня $2s$, полученная из этих измерений, составляет $0,03 \pm 0,01$ мэв, что неплохо согласуется с предсказанным в [7] для Sb значением $0,07$ мэв.

Отсутствие в спектре фотопроводимости слабой линии, соответствующей переходу с синглетного уровня, и относительный сдвиг линии, соответствующей переходу с триплетного состояния, в спектрах фотопроводимости и поглощения (см. рис. 1 и рис. 3) показывают, что фототермическая ионизация возбужденных состояний мелких примесей в

Ge не всегда может быть описана двумя независимыми процессами — оптическим переходом электронов между возбужденными состояниями и термическим выбросом носителей в зону.

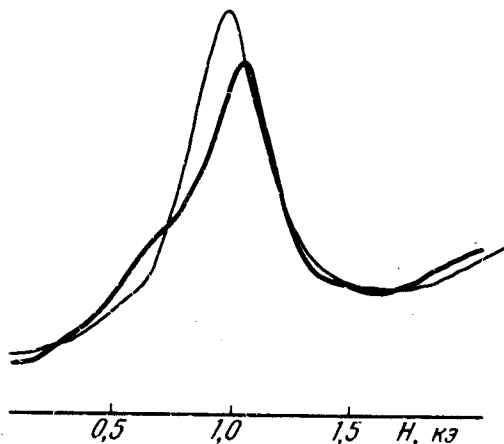


Рис. 3. Линии поглощения (—) и фотопроводимости (---) Ge (Sb) для легких компонент перехода $2s \rightarrow 2p_{\pm 1}$ ($\epsilon_0 = 1,87$ мэв)

Дополнительные эксперименты, проведенные на Ge (As), для которого в соответствии с [7] следует ожидать большего расщепления $2s$ состояния, показали наличие двух линий, соответствующих переходам с синглетного и триплетного состояний, как в спектрах поглощения, так и фотопроводимости. Величина расщепления в нулевом магнитном поле составляет $0,4 \pm 1$ мэв.

Авторы благодарны Г.Н.Гольцману за полезные дискуссии.

Московский

государственный педагогический институт
им. В.И.Ленина

Поступила в редакцию
3 июня 1975 г.

Литература

- [1] Т.М.Лифшиц, Ф.Я.Надь. ДАН СССР, 162, 801, 1965.
- [2] S.D.Secombe, D.M.Korn. Sol. St. Comm., 11, 1539, 1972.
- [3] M.S.Skolnik, L.Evans, R.A.Stradling. Sol. St. Comm., 15, 1403, 1974.
- [4] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, Н.Г.Птицина. ЖЭТФ, 64, 587, 1973.
- [5] J.Reuszer, P.Fisher. Phys. Rev., 135A, 1125, 1964.
- [6] A.Faulkner. Phys. Rev., 184, 713, 1969.
- [7] N.Lee, D.M.Larsen, B.Lax. J. Phys. Chem. Sol., 34, 1817, 1973.