

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭКСИТОННЫХ СОСТОЯНИЙ В СПЕКТРАХ МАГНИТОПОГЛОЩЕНИЯ ТЕЛЛУРИДА СВИНЦА

С.И.Кохановский, Р.П.Сейсян, Ал.Л.Эфрос, В.А.Юкиш

Обнаружено низковольтное электропоглощение теллурида свинца в магнитном поле, имеющее пороговый характер – с максимумом при $E_0^* \approx 1 - 3$ В/см и спадом до нуля при $E_0 \gg E_0^*$. Явление связывается с возгоранием в магнитном поле экситонных состояний, разрушаемых затем ударной ионизацией в электрическом поле.

Образование мелких связанных состояний в РbТе весьма маловероятно из-за чрезвычайно высокой статической диэлектрической проницаемости и малости эффективных масс. Энергия связи водородоподобного связанного состояния, соответственно, не превысит $2 \cdot 10^{-7}$ эВ, так что оно легко разрушается, например, термически или из-за экранирования свободными носителями.

Положение изменяется существенно при приложении магнитного поля H , которое "одномеризует" относительное движение электрона и дырки при условии $\beta = (a/L)^2 \gg 1$ (a – боровский радиус экситона, $L = (c\hbar / eH)^{1/2}$ – магнитная длина), а при одномерном движении, как известно¹, дискретное состояние образуется в сколь угодно мелкой потенциальной яме.

Нами исследовались гетероэпитаксиальные слои РbТе на ВаF₂, n -типа проводимости с концентрацией электронов $(2 \div 5) \cdot 10^{16}$ см⁻³ и подвижностью $\sim 5 \cdot 10^5$ см²/В·с – при 4 К. При помощи дифракционного монохроматора (гелий-нсонового лазера) и сверхпроводящего соленоида при $T = 2$ К регистрировались осцилляции краевого поглощения в диапазоне энергий фотона 0,19 – 0,49 эВ. Наблюдается до тридцати относительно острых максимумов поглощения, свидетельствующих о реализации больших $\omega\tau$ ($\omega_{\text{ц}}^c \tau_0 = 150 - 200$, где τ_0 – время релаксации подвижности, а $\omega_{\text{ц}}^c$ – циклотронная частота электрона).

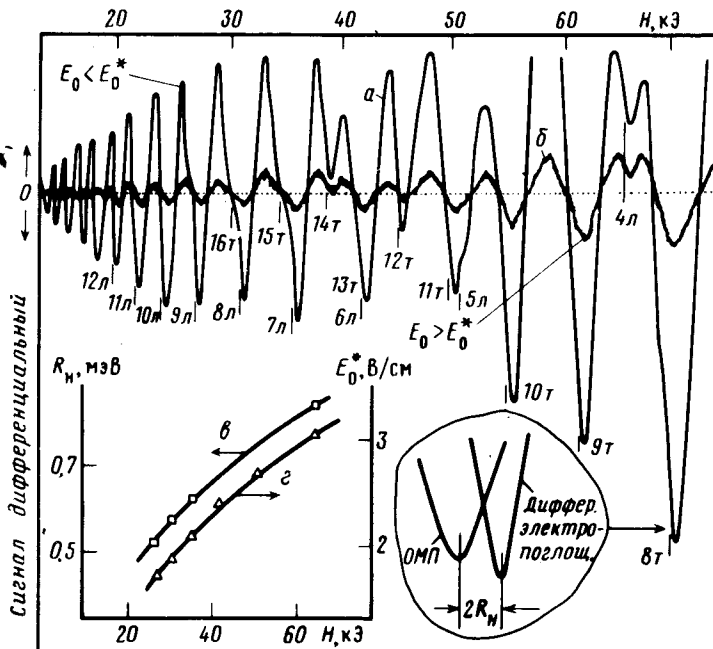
Для детектирования связанных состояний нами было применено электрическое поле – постоянное E_0 и переменное, с амплитудой E_1 на частоте $\Omega = 1$ кГц. Обнаружено, что уже весьма слабое постоянное электрическое поле $E_0 = 2 - 8$ В/см приводит к заметному (на $\sim 25\%$), но насыщающемуся при больших полях гашению осцилляций. Включение переменной составляющей позволяет регистрировать большой дифференциальный сигнал (рис. 1), зависимость которого от постоянной составляющей E_0 имеет максимум при $E_0^* = 1,5 - 3,1$ В/см с дальнейшим падением при увеличении E_0 до нуля. Такой характер воздействия электрического поля может свидетельствовать о распаде под его влиянием некоторых слабосвязанных состояний, значительный вклад которых в фундаментальное поглощение позволяет связать их природу с диамагнитными экситонами. Заметим, что недавно в литературе возникла

дискуссия относительно природы особенностей, наблюдаемых вблизи линии циклотронного резонанса в PbTe в длинноволновой ИК области спектра ^{2, 3}. Авторы ² рассматривали свои экспериментальные данные, также полученные на гетероэпитаксиальных слоях PbTe/BaF₂, как доказательство наблюдения в магнитном поле мелких связанных состояний на примесях или вакансиях, тогда как в ³ приводились соображения о принадлежности этих особенностей диэлектрической аномалии в PbTe. Наши данные, по-видимому, можно рассматривать как аргумент в пользу выводов ², так как имеется сходство в условиях существования экситонных и мелких примесных состояний.

Энергия связи в мелкой потенциальной яме $u(r)$ в сильном магнитном поле согласно Бычкову ¹ имеет вид:

$$R_H = - \frac{m}{\hbar} \frac{1}{L^4} (\int u(r) d^3r)^2,$$

и растет как H^2 . Оценка R_H для $\mathbf{H} \parallel \langle 111 \rangle$ по этой формуле показывает, что даже в крайнем случае радиуса экранирования кулоновского потенциала порядки постоянной решетки при $H \approx 100$ кЭ величина энергии связи составит уже $R_H \approx 10^{-4}$ эВ.



Сигнал дифференциального электропоглощения PbTe/BaF₂ для $E_0 < E_0^*$ и $E_0 > E_0^*$ в зависимости от напряженности магнитного поля $H \parallel \langle 111 \rangle$, $\lambda = 3,39$ мкм, $T = 2$ К, $E_1 = 0,2$ В/см, E_0 : а – 3 В/см, б – 10 В/см, $\Omega = 1$ кГц. Обозначения экстремумов: "Л" и "Т" – "легкая" и "тяжелая" серии, характеризующиеся поперечными эффективными массами $m_{c,v}^*$ и массами сечения эллипсоидов плоскостью, перпендикулярной направлению магнитного поля, соответственно; цифра – квантовое число Ландау l для основных правил отбора $\Delta l = 0$. На вставке справа – сопоставление в увеличенном масштабе фрагментов спектра электропоглощения со спектром осциллирующего поглощения при $E = 0$

вблизи экстремума, поясняющее экспериментальное определение R_H . На вставке слева зависимость экситонного ридберга (а) и E_0^* (б) от магнитного поля

Проведение опытов при различных геометриях эксперимента и на различных образцах позволяет предположить, что главной причиной распада экситонных состояний в PbTe в электрическом поле является их ударная ионизация свободными носителями заряда. В этом случае усматривается определенная аналогия со случаями InSb в магнитном поле ⁴ и Ge ⁵, где ионизация доноров или разрушение экситонов из-за ударной ионизации происходили в том же диапазоне напряженности электрического поля.

К сожалению, прямое вычисление энергии связи по E_0^* для ударной ионизации связано с детальным учетом изменений функции распределения носителей по энергии, что при наличии магнитного поля вызывает затруднения.

Возможность независимой оценки R_H дает сопоставление электромодуляционного и обычного спектров. Так как модуляция происходит в столь слабых электрических полях только за счет экситонного вклада, а суммарное поглощение определяется, главным обра-

зом, переходами в сплошной спектр над уровнями Ландау, можно считать, что имеющее место слабое смещение максимумов и определяется, в основном, энергией связи. Согласно ⁶ в условиях сильного экранирования это смещение составит величину порядка $2R_H$. Полученные таким образом оценки R_H приведены на вставке рис. 1 в зависимости от магнитного поля наряду с такой же зависимостью E_0^* . Энергия связи медленно растет в зависимости от напряженности магнитного поля и составляет величину $(5 - 8) \cdot 10^{-4}$ эВ для 20 - 60 кЭ, что согласуется с расчетами в модели диамагнитных экситонов ⁷ при выборе эффективной диэлектрической проницаемости $\kappa_0^{\Phi\Phi} \approx 130$. Причину такому сильному изменению κ_0 можно искать в частотной зависимости решеточной поляризуемости PbTe. Видно, что выбором масштабного множителя (el_0^*) можно практически совместить зависимости для R_H и E_0^* от H . При этом нижняя граница длины свободного пробега составляет $l_0^{*min} \approx 2,7$ мкм.

Совокупность приводимых данных позволяет говорить об обнаружении экситонных состояний в условиях опыта по межзонному магнитопоглощению даже в таком узкощелевом ($\epsilon_g(0) = 0,19$ эВ) полупроводниковом кристалле как PbTe, где эффективные массы очень малы ($m_{c\perp}^*(0) \approx m_{v\perp}^*(0) \approx 0,02m$), а диэлектрическая проницаемость необычайно велика ($\kappa_0 \approx 1000$).

Литература

1. Бычков Ю.А. ЖЭТФ, 1960, **39**, 689.
2. Levis A., Kuchar F., Nicolas R.J., Ramage J.C., Palmentshofer L. Phys., Rev., 1983, **B28**, 2244.
3. McKnight S.W., Drew H.D. Phys. Rev., 1983, **B28**, 2249.
4. Matsuda O., Otsuka E. J. Phys. Chem. Sol., 1979, **40**, 819.
5. Аснина Ж.С., Парицкий А.Г. ФТТ, 1984, **26**, 3300.
6. Дьяконов М.И., Митчел Д.Л., Эфрос А.Л. ФТТ, 1968, **10**, 2561.
7. Сейсян Р.П. Спектроскопия диамагнитных экситонов. М.: Наука, 1984.