

ЦИКЛОТРОН-ФОНОННЫЙ РЕЗОНАНС С ПОГЛОЩЕНИЕМ ФОНОНОВ В-InSb

О.М.Лешко, Е.М.Шерегий

При $T > 80$ К в полевых зависимостях фотопроводимости в n -InSb в магнитных полях до 400 кЭ обнаружены пики, положение в магнитном поле и температурное поведение которых дают основание считать, что впервые наблюдался циклотрон-фононный резонанс с поглощением фононов.

Предсказанный Бассом и Левинсоном ¹ циклотрон-фононный резонанс (ЦФР) исследован в нескольких полупроводниковых материалах ^{2, 3}. Эксперименты проводились при температуре $T = 4,2$ К (или несколько выше), поэтому могли наблюдаться только процессы с излучением одного или двух ⁴ фононов. При более высоких температурах по аналогии с магнитофононным резонансом ⁵ и согласно предсказаниям теории ¹ могут иметь место процессы с поглощением фононов, т. е. резонансное поглощение излучения частоты ω при выполнении условия:

$$\hbar\omega = E_N - E_0 - \hbar\omega_{LO} \quad (1)$$

E_N и E_0 — энергии уровней Ландау, ω_{LO} — частота продольного оптического фонона.

Такие резонансы будут сдвинуты по отношению к циклотронному резонансу (ЦР) и его гармоникам (ГЦР) в сторону больших магнитных полей и их амплитуда должна возрастать с увеличением температуры в определенных пределах.

Очевидно, что для исследования квантовых магнитооптических эффектов при $T \geq 77$ К необходимы значительно более сильные магнитные поля и, соответственно, более высокие частоты излучения по сравнению с низкотемпературными измерениями.

В данном сообщении приводятся результаты исследования фотопроводимости в n -InSb, возбужденной CO_2 -лазером в импульсных магнитных полях до 400 кЭ в температурном интервале $77 \div 160$ К, и показано, что при этом имеют место резонансы удовлетворяющие условию (1).

Излучение лазера ЛГ-705, в котором с помощью комбинированных фильтров ¹⁾ выделялись две линии с длинами волн $\lambda_1 = 10,62$ мкм или $\lambda_2 = 9,57$ мкм, подводилось к образцу в криостате световодом (полая мельхиоровая трубка, оканчивающаяся фоконом). Криостат помещен в индукционную катушку генератора импульсных магнитных полей (ГИМП), обеспечивающего напряженность $H_{max} = 400$ кЭ. Лепестковая диафрагма фотозатвора, синхронизированного с запуском ГИМП, пропускала лазерное излучение только во время импульса магнитного поля ($t_{имп} = 4$ мс). Фотосигнал $V_{\phi}(H)$ с потенциальных зондов образца подавался через дифференциатор (RC — цепочка) на вход усилителя IV14 запоминающего осциллографа (С8-13). На экране записывались вторые производные $\partial^2 V_{\phi}(H)/\partial H^2$.

На рис. 1 и рис. 2 представлены экспериментальные кривые, полученные для образца n -InSb с концентрацией носителей $n = 9 \cdot 10^{13}$ см⁻³ и подвижностью $\mu = 4,5 \cdot 10^5$ см² В·с при

¹⁾ Фильтры изготовлены в ЦКБ АН Белорусской ССР.

$T = 77$ К. Кривые рис. 1 записаны в магнитных полях до 225 кЭ, а на рис. 2 приведены экспериментальные записи $\partial^2 V_{\Phi}(H)/\partial H^2$ в интервале магнитных полей 200 ÷ 400 кЭ. На кривой 1 (рис. 1) полученной при 77 К, видны максимумы (отмеченные штрихами), наблюдавшиеся ранее на записях фотопроводимости в n -InSb в магнитном поле до 200 кЭ при низких температурах (8 ÷ 32 К) и очень близкой к λ_1 — длине волны падающего излучения (10,59 мкм) ⁶. Пик a_2 представляет собой гармонику ЦР (переход $0^+ \rightarrow 2^+$), а пики b_1 и b_2 — ЦФР с излучением LO (Γ)-фонона (переходы $0^+ \rightarrow 1^+ + LO$ (Γ) и $0^+ \rightarrow 2^+ + LO$ (Γ), соответственно). Положение штрихов соответствует расчетным значениям напряженностей магнитного поля ($H_{рез}^{теор}$), в которых должны иметь место названные резонансы при $T = 80$ К и энергиях квантов $h\lambda_1/c = 116,76$ мэВ и $h\lambda_2/c = 129,57$ мэВ. Вычисления энергий уровней Ландау проводились по формуле взятой из работы ⁷, при этом использованы следующие значения зонных параметров: $E_g = 228$ мэВ ⁸, $m_c = 0,01393 m_0$ ⁹, $\Delta = 810$ мэВ ⁷.

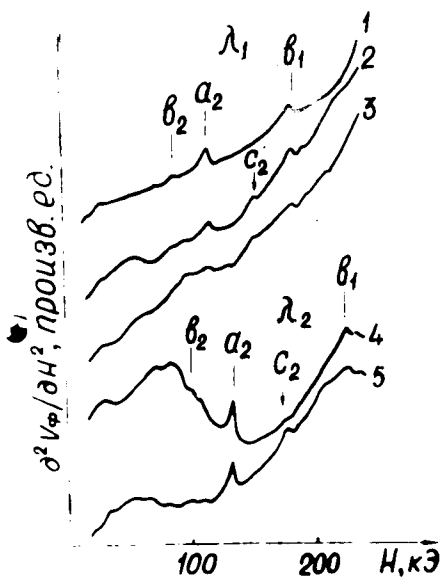


Рис. 1

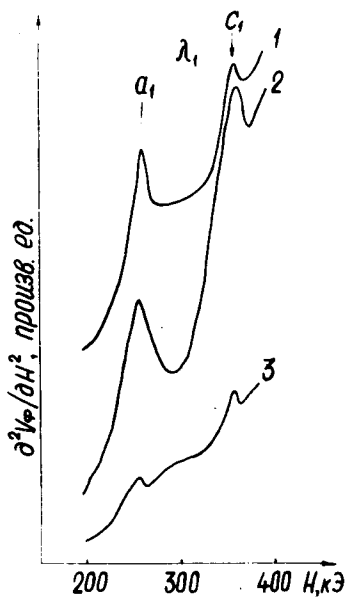


Рис. 2

Рис. 1. Экспериментальные зависимости $\partial^2 V_{\Phi}(H)/\partial H^2$ в магнитных полях 0 ÷ 250 кЭ для $\lambda_1 = 10,62$ мкм: 1 — 77 К; 2 — 88 К; 3 — 150 К; для $\lambda_2 = 9,57$ мкм; 4 — 81 К; 5 — 98 К

Рис. 2. Экспериментальные зависимости $\partial^2 V_{\Phi}(H)/\partial H^2$ в магнитных полях 200 ÷ 400 кЭ для $\lambda_1 = 10,62$ мкм; 1 — 93 К; 2 — 120 К; 3 — 155 К

Для энергии $\hbar\omega_{LO}$ принималось значение 24,4 мэВ. С увеличением температуры от 80 до 150 К расчетные значения $H_{рез}^{теор}$ изменяются в пределах 0,8%, что не могло быть замечено в эксперименте.

Кроме уже названных резонансов a_2 , b_1 и b_2 , на кривых 2 — 5 рис. 1, т. е. при $T > 77$ К появляется пик при $H_{рез}^{эксп} = 150 \pm 5$ кЭ, отмеченный стрелкой c_2 .

На кривых рис. 2 в диапазоне магнитных полей 200 ÷ 400 кЭ при λ_1 и $T > 80$ К наблюдаются два резонанса: сильный пик a_1 при $H_{рез}^{эксп} = 260 \pm 8$ кЭ и c_1 при $H_{рез}^{эксп} = 350 \pm 11$ кЭ. С увеличением температуры амплитуда пика c_1 по отношению к амплитуде пика a_1 увеличивается, а их положение в магнитном поле не изменяется (в пределах точности определения $H_{рез}^{эксп}$ — около 3%).

Пик a_1 представляет собой ЦР (переход $0^+ \rightarrow 1^+$), для которого теоретическое значение $H_{рез}^{теор} = 263,7 \pm 1,3$ кЭ при $T = 80$ К и энергии падающих квантов 116,76 мэВ.

Положения стрелок на рис. 1 и рис. 2 соответствуют расчетным значениям $H_{рез}^{теор}$ при $T = 80$ К для ЦФР, вызванного поглощением LO (Γ)-фонона: а именно: c_1 — переход $0^+ \rightarrow 1^+ -$

— $LO(\Gamma)$; $c2$ — переход $0^+ \rightarrow 2^+ - LO(\Gamma)$. Значения $H_{рез}^{теор}$ для этих резонансов соответственно равны $354,2 \pm 1,7$ кЭ и $154,1 \pm 0,7$ кЭ. Видно, что положения в магнитном поле пиков $c1$ и $c2$ хорошо совпадают (в пределах точности эксперимента) с значениями $H_{рез}^{теор}$ для фундаментальной и первой гармоник ЦФР, обусловленного поглощением $LO(\Gamma)$ -фонона. Влияние температуры на амплитуду этих пиков также согласуется с их интерпретацией, как резонансов вызванных поглощением фонона.

Таким образом, представленные результаты дают основание считать, что нами наблюдался циклотрон-фононный резонанс с поглощением продольного оптического фонона. Наши исследования показывают, что ЦФР с поглощением фононов может быть использован для определения параметров зонной структуры полупроводников при сравнительно высоких температурах.

Авторы благодарны И.Б.Левинсону за обсуждение результатов эксперимента и ценные замечания.

Литература

1. Басс Ф.Г., Левинсон И.Б. ЖЭТФ, 1965, 49, 914.
2. Баканас Р.К., Басс Ф.Г., Левинсон И.Б. ФТП, 1978, 12, 1457.
3. Ivanov-Omskii V.I., Korovin L.I., Sheregii E.M. Phys. Stat. Sol. (b), 1978, 90, 11.
4. Иванов-Омский В.И., Коломиец Б.Т., Шерегий Е.М. Письма в ЖЭТФ, 1973, 18, 337.
5. Парфеньев Р.В., Харус Г.И., Цидильковский И.М., Шалыт С.С. УФН, 1974, 112, 3.
6. Washering H., Grisar R. Bauer G., Hauashi S. Physica, 1977, 89B, 290.
7. Jonson E.J., Dykey D.H. Phys. Rev., 1975, B1, 2666.
8. Халм К. Антимонид индия. Кн. : Материалы используемые в полупроводниковых приборах. М.: Мир, 1968, 147.
9. Kotels E.S., Datars W.R. Phys. Rev., 1974, B9, 568.

Дрогобычский пединститут им. И.Франко.
им. И.Франко.

Поступила в редакцию
7 декабря 1986 г.