

ДВУХФОНОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НЕУПРУГОМ РЕЗОНАНСНОМ РАССЕЯНИИ ЭЛЕКТРОНОВ В *n*-InSb

М.М.Ахсельрод, Н.М.Циолковский

При выполнении условия магнитофононного резонанса (МФР)

$$\epsilon_{N,S} - \epsilon_{L,S'} = \hbar\omega_0, \quad (N, L = 0, 1, 2, \dots; S = S' = \pm \frac{1}{2}) \quad (1)$$

на кривых поперечного (ρ_{\perp}) и продольного (ρ_{\parallel}) магнитосопротивлений должен появиться ряд экстремумов [1,2]. В формуле (1) $\epsilon_{N,S}$ — энергия *N*-го уровня Ландау с данной ориентацией спина *S*, а ω_0 — предельная частота оптических фононов. Экспериментальные исследования показали, что в согласии с теорией поперечное магнитосопротивление образцов *n*-InSb имеет максимумы при магнитных полях $H = 34, 17, \sim 11, \sim 8,5$ и $\sim 6,7$ кэ (переходы $\epsilon_{1,S} \leftrightarrow \epsilon_{0,S}$ и $\epsilon_{3,S} \leftrightarrow \epsilon_{0,S}$ соответственно), а продольное магнитосопротивление при этих же полях имеет минимумы [3].

В работе [4] было обнаружено, что помимо указанных экстремумов $\rho_{\perp}(H)$ в *n*-InSb имеет еще максимум при $H = 82$ кэ, а $\rho_{\parallel}(H)$ имеет минимум при $H = 24$ кэ. Появление этих дополнительных экстремумов связывалось в [4] с резонансным рассеянием электронов на оптических фононах, сопровождающимся изменением ориентации спина элект-

рона. При такой интерпретации минимум $\rho_{\parallel}(H)$ при 24 кэ должен быть обусловлен переходами типа $\epsilon_1, \frac{1}{2} \leftrightarrow \epsilon_0, \frac{1}{2}$, а максимум $\rho_{\perp}(H)$ при 82 кэ переходами типа $\epsilon_0, \frac{1}{2} \leftrightarrow \epsilon_0, -\frac{1}{2}$. Положение максимума, вызванного переходами $\epsilon_0, \frac{1}{2} \leftrightarrow \epsilon_0, -\frac{1}{2}$, позволяет непосредственно определить величину g_0 — фактора спектроскопического расщепления для электронов у дна зоны. Он оказался равным ~ 63 , в то время как эксперименты по спиновому резонансу [5, 6] в согласии с формулой Рота [7] дают значение $|g_0| \sim 50$.

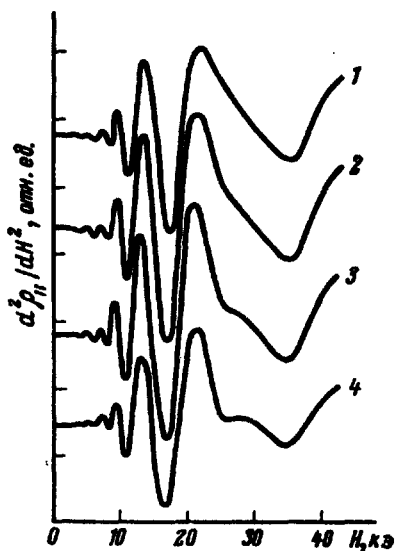


Рис. 1. Зависимость $d^2 \rho_{\parallel}(H) / dH^2$ от напряженности магнитного поля при различных температурах. 1 — 93° К, 2 — 111° К, 3 — 128° К, 4 — 144° К

Необходимо отметить, что оба дополнительных экстремума малы по амплитуде, и их удалось обнаружить, лишь вычитая из общего магнитосопротивления ту часть (фон), которая линейно зависит от магнитного поля.

В настоящей работе сообщается об исследовании МФ осцилляций $\rho_{\perp}(H)$ и $\rho_{\parallel}(H)$ образцов n -InSb с $n = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ методом двойного дифференцирования кривых магнитосопротивления, что позволило значительно увеличить разрешение немонотонных составляющих $\rho_{\perp}(H)$ и $\rho_{\parallel}(H)$. Кроме того, мы изучили и температурную зависимость амплитуды МФ пиков (в работе [4] измерения производились лишь при 120° К).

Как видно из рис.1, на кривой $d^2 \rho_{\parallel}(H) / dH^2$ при $T > 110^\circ \text{ К}$ появляется дополнительный минимум, расположенный при $H \sim 25$ кэ. Глубина этого минимума увеличивается с повышением температуры даже тогда, когда амплитуда обычных МФ минимумов начинает уменьшаться.

Кривая $d^2 \rho_{\perp}(H) / dH^2$ имеет дополнительный максимум при $H \sim 82$ кэ (рис.2). Температурная зависимость амплитуды этого максимума так-

же отличается от температурной зависимости амплитуд обычных МФ максимумов.

Аномальная температурная зависимость амплитуд дополнительных экстремумов, т.е. их увеличение с ростом температуры в той области температур, где амплитуды обычных МФ экстремумов убывают, позволяет думать, что эти экстремумы вызваны неупругим резонансным рассеянием электронов с участием двух оптических фононов. Действительно, вероятность процесса двухфононного рассеяния при температурах ниже дебаевской пропорциональна $\exp(-2\hbar\omega_0/kT)$, а вероятность процесса однофононного рассеяния пропорциональна $\exp(-\hbar\omega_0/kT)$.

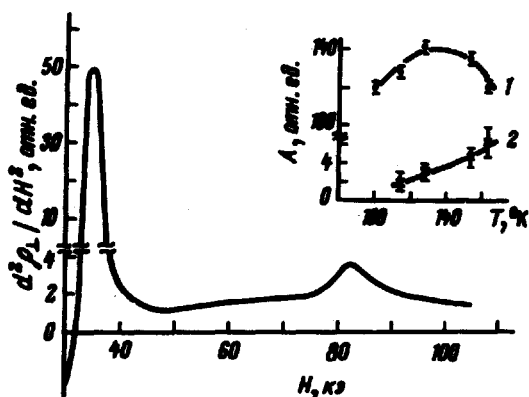


Рис. 2. Зависимость $d^2 \rho_{\perp}(H)/dH^2$ от напряженности магнитного поля при $16,3^\circ \text{K}$. Справа вверху изображена зависимость амплитуды максимумов A $d^2 \rho_{\perp}(H)/dH^2$ при 34 кэ (кривая 1) и при 82 кэ (кривая 2) от температуры

Условие МФР (1) в случае двухфононного рассеяния принимает вид

$$\epsilon_{N,S} - \epsilon_{L,S} = 2\hbar\omega_0. \quad (2)$$

Для непараболической кейновской зоны проводимости в InSb

$$\epsilon_{N,S} = \frac{\epsilon_g}{2} + \sqrt{\frac{\epsilon_g^2}{4} + \epsilon_g \left[\left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar\Omega + S |g_0| \mu_B H \right]} \quad (3)$$

где ϵ_g — ширина запрещенной зоны, $\Omega = \frac{eH}{m_0^* c}$ — циклотронная частота,

m_0^* — эффективная масса электрона на две зоны, μ_B — магнетон Бора. Условию (2) для известных параметров InSb $m_0^* = 0,014 m_0$, $\epsilon_g(140^\circ \text{K}) = 0,21 \text{ эв}$, $|g_0| = 50$ и $\omega_0 = 3,7 \cdot 10^{13} \text{ сек}^{-1}$ соответствуют магнитные

поля 83,5 кэ (переход $\epsilon_{1,S} \leftrightarrow \epsilon_{0,S}$), 39 кэ ($\epsilon_{2,S} \leftrightarrow \epsilon_{0,S}$), 25,5 кэ ($\epsilon_{3,S} \leftrightarrow \epsilon_{0,S}$), 18,5 кэ ($\epsilon_{4,S} \leftrightarrow \epsilon_{0,S}$). Таким образом, минимум $\rho_H(H)$ при 25 кэ соответствует двухфононному резонансному рассеянию электронов между нулевым и третьим уровнем Ландау, а максимум $\rho_L(H)$ при 82 кэ – двухфононному рассеянию между нулевым и первым уровнями Ландау.

Из рис. 1 и 2 видно, что интенсивность пиков, вызванных двухфононными процессами, невелика. При использованном методе двойного дифференцирования амплитуды различных пиков, изображенных на рис. 1 и 2, искажены, поскольку они пропорциональны фактору $\alpha(H_m^2 - H_{рез}^2)/(\Delta H)^2$, где H_m – максимальное поле, при котором снята кривая $\rho(H)$ (на рис. 2 – 107 кэ), $H_{рез}$ – поле, при котором расположен данный пик, ΔH – полуширина этого пика, $\alpha \approx 0,5^{1)}$. Что касается истинной амплитуды двухфононных пиков, то оценки показывают, что, например, в случае поперечного магнетосопротивления амплитуда двухфононного максимума при 163° К составляет около 20% от амплитуды наиболее интенсивного однофононного максимума, расположенного при 35 кэ, или около 1% от всей величины магнетосопротивления. Некоторые из двухфононных экстремумов по положению почти совпадают с гораздо более интенсивными однофононными экстремумами. Кроме того продольное магнетосопротивление в n -InSb имеет глубокий минимум при 75 кэ [8]. По-видимому, по этим причинам нам удалось обнаружить не все пики, обусловленные двухфононными переходами.

Итак из наших результатов явствует, что двухфононные процессы вносят определенный вклад в магнетосопротивление n -InSb.

Появление дополнительных минимумов с повышением температуры наблюдалось Стрэдлингом и Вудом [9] при исследовании продольного магнетосопротивления n -InAs и n -GaAs в постоянных магнитных полях до 140 кэ и также связывалось ими с двухфононными резонансными переходами.

Институт физики металлов
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28 апреля 1969 г.

1) Коэффициент α находился эмпирически путем измерения зависимости амплитуды МФ пиков на кривой $d^2\rho(H)/dH^2$, расположенных при 17 и 34 кэ, от H .

Литература

- [1] В.Л.Гуревич, Ю.А.Фирсов. ЖЭТФ, 40, 199, 1961.
- [2] В.Л.Гуревич, Ю.А.Фирсов. ЖЭТФ, 47, 734, 1964.
- [3] Р.В.Парфеньев, С.С.Шалыт, В.М.Муждаба. ЖЭТФ, 47, 444, 1964.
- [4] J. M. Tsidilkovski, M. M. Akselrod, S. J. Uritsky. Phys. Stat. Sol. 12, 667, 1965.
- [5] G. Bemski. Phys. Rev. Lett., 4, 62, 1960.
- [6] B. D. McCombe, S. B. Bishop, R. Kaplan. Phys. Rev. Lett., 18, 748, 1967.
- [7] L. Roth, B. Lax, S. Zwerdling. Phys. Rev., 114, 90, 1959.
- [8] И.М.Цидильковский, М.М.Аксельрод, В.И.Соколов. ФТТ, 7, 316, 1965.
- [9] R. A. Stradling, R. A. Wood. Proc. Phys. Soc., ser. 2, 1, 1711, 1968.

Письма в ЖЭТФ, том 9, стр. 626 – 629

5 июня 1969 г.

АСИММЕТРИЯ РАССЕЯНИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРОДУКТОВ ФОТОДЕЗИНТЕГРАЦИИ ${}^4\text{He}$

Ю.М.Аркасов, П.Н.Вацет, В.И.Волощук, В.Л.Марченко, А.Ф.Ходячих,
В.И.Ужиль

Изучение асимметрии рассеяния и поляризации продуктов фотоядерных реакций совместно с их угловыми распределениями позволяет независимым путем оценить вклады малых электрических и магнитных мультиполей при поглощении γ -квантов, выбрать и уточнить вид потенциала нуклон-нуклонного взаимодействия, а также дает информацию о структуре ядра.

До настоящего времени теоретическое и экспериментальное изучение асимметрии рассеяния и поляризации фотопродуктов выполнено для небольшого количества ядер [1 – 5]. Теоретические расчеты и экспериментальные данные по измерению асимметрии рассеяния и поляризации продуктов фотодезинтеграции ${}^4\text{He}$ в литературе отсутствуют.