

МАГНЕТОФОНОННЫЙ РЕЗОНАНС В n - $InAs$

Д.В.Машовец, Р.В.Парфёньев, С.С.Шалыт

В ряде экспериментальных работ [1] было показано, что благодаря магнетофононному резонансу зависимость магнетосопротивления и магнетотермоэ.д.с. n - $InSb$ от поля приобретает при соответствующих условиях осциллирующий характер. Физическая природа этого нового эффекта, теоретически предсказанного Гуревичем и Фирсовым [2], связана с тем, что неупругое рассеяние электронов оптическими фононами в сильном магнитном поле ($\mu H/c \gg 1$) усиливается, когда расстояние между уровнями Ландау

$$\epsilon_N = \left(N + \frac{1}{2}\right) \hbar \frac{eH}{m^*c} \quad (1)$$

становится равным энергии оптических фононов $\hbar \omega_0$. Получающаяся из этого условия формула

$$\left(N_{N_i} - N_j\right)^{-1} = \frac{1}{\omega_0} \frac{e}{m^*c} (N_i - N_j) \quad (2)$$

определяет ряд значений магнитного поля, при которых имеет место магнетофононный резонанс. С учетом спинового расщеп-

ления уровней Ландау резонансное обратное поле (2) может оставаться неизменным либо увеличиваться или уменьшаться на величину $g\mu_B/\hbar\omega_0$.

В настоящей работе исследовалось продольное магнетосопротивление поликристаллических образцов $n\text{-InAs}$ ($n = 1,25 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $U_{90^\circ\text{K}} = 6 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{в.сек.}$).

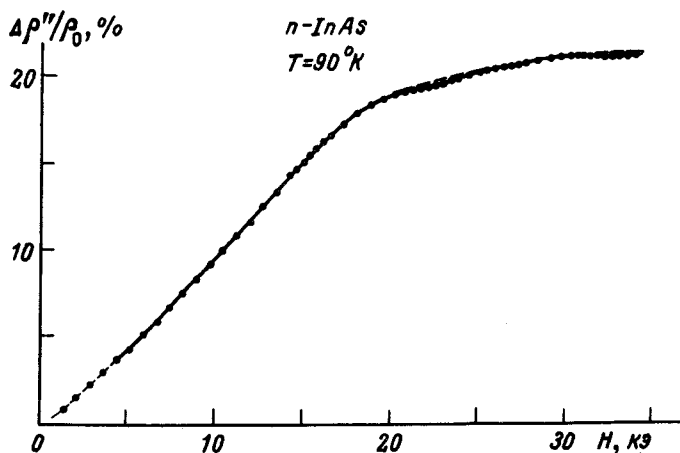


Рис. I. Зависимость магнетосопротивления $n\text{-InAs}$ от напряженности продольного поля при 90°K

На рис. I представлена экспериментальная кривая, полученная в стационарных полях при $T=90^\circ\text{K}$. Появление двух слабо выраженных минимумов на этой кривой при $H=22$ и 33 кэ можно связать с переходами между нерасщепленными уровнями Ландау $N=0 \rightleftharpoons N=3$ ($H_{0-3} = 21$ кэ) и $N=0 \rightleftharpoons N=2$ ($H_{0-2} = 32,5$ кэ). Значение предельной частоты продольных оптических колебаний для InAs принималось равным $\omega_0 = 4,6 \cdot 10^{13} \text{ сек}^{-1}$ [3]. Более отчетливая картина осцилляции продольного магнетосопротивления была

получена при исследовании $n\text{-InAs}$ в более сильных импульсных полях при более высоких температурах. Полученные при этом экспериментальные кривые (рис. 2) обнаруживают три минимума, при $H \approx 38, 78$ и 150 кэ.

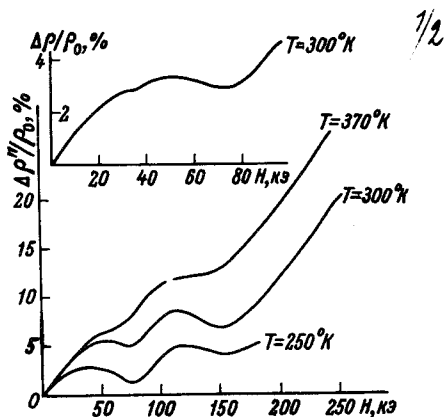


Рис. 2. Зависимость магнетосопротивления $n\text{-InAs}$ от напряженности продольного импульсного магнитного поля при разных температурах

Первый из этих минимумов можно связать с уже рассмотренным переходом $N=0 \rightleftharpoons N=2$ и объяснить его смещение ($33 \rightarrow 38$ кэ) повышением температуры опыта. Температурное смещение минимума может быть объяснено в рамках теории продольного эффекта.

Второй экспериментальный минимум при $H \approx 78$ кэ можно связать с переходом $N=0 \rightleftharpoons N=1$. При вычислении резонансного значения поля для этого перехода важно учитывать зависимость эффективной массы электронов в зоне проводимости InAs от энер-

гии и, следовательно, от H . С учетом зависимости $m^*(H)$, полученной в опытах по циклотронному резонансу [4], получим $H_{0-1} = 71$ кэ (таким же образом зависимость $m^*(H)$ учитывалась и выше).

В последовательности изложенных заключений следующий экспериментальный минимум ($H \approx 150$ кэ) можно попытаться связать с переходами: $N=0^- \rightleftharpoons N=0^+$ или $N=0^+ \rightleftharpoons N=1^-$. Если оценивать величину g -фактора по теоретической формуле, обоснованной в [5] ($|g(0)| = 15 \pm 18$), то резонансное значение поля $H_{0^+ - 0^-}$ оказывается в области 300 ± 350 кэ. В связи с этим результатом мы дополнительно обследовали продольное магнетосопротивление $n - \ln A_s$ в области 200 ± 400 кэ и не обнаружили заметного отступления от гладкого хода. Таким образом, минимум при $H = 150$ кэ остается связать со вторым возможным переходом $N=0^+ \rightleftharpoons N=1^-$. Если учесть, что согласно нашим данным экспериментальные минимумы смещаются при повышении температуры на $10 \pm 15\%$, и для резонансного значения поля принять $H_{0^+ - 1^-} = 130$ кэ, а $|g| = 14$ (при $H = 130$ кэ), то для эффективной массы в таком поле получается разумное значение $m^*/m_0 = 0,032$.

Если для теоретического определения резонансных условий использовать формулу для энергетического спектра электронов в магнитном поле с учетом непараболичности, обоснованную в работе Лакса и др. [6], то получается ряд значений магнитного поля: $H_{0-3} = 22,5$ кэ, $H_{0-2} = 34,5$ кэ, $H_{0-1} = 72$ кэ, $H_{0^+ - 1^-} = 94$ кэ, $H_{0^+ - 0^+} = 510$ кэ. Первые три значения, при вычислении которых не учитывалось спиновое расщепление, хо-

рошо совпадают с экспериментальными данными. Четвертое значение ($H=94$ кэ), полученное при учете спинового расщепления уровней Ландау, не нашло явного выражения в эксперименте.

Проведенное обсуждение экспериментальных результатов, представленных на рис. 2, имеет характер приближенных оценок по следующим причинам: 1) в теории магнетофононной осцилляции продольного магнетосопротивления (в отличие от поперечного) положение резонансных значений поля относительно экстремумов экспериментальной кривой не является определенным, так как оно сложным образом зависит от относительной роли неупругого механизма рассеяния. Только при достаточно низких температурах резонанс вызывает появление минимума; 2) анализируются неперiodические осцилляции, связанные со спиновым расщеплением нижних квантовых уровней Ландау в зоне с неквадратичным законом дисперсии. Влияние последнего обстоятельства на спиновое расщепление уровней и на процессы переходов между ними еще не получило достаточно полного освещения в теории.

Исследование поперечного магнетосопротивления *n-InAs* в той же области температур и полей не обнаружило заметных осцилляций.

Институт полупроводников
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
18 марта 1965 г.

Литература

- [1] Р.В.Парфеньев, С.С.Шалыт, В.М.Муждаба. ЖЭТФ, 47, 444, 1964; В.М.Муждаба, Р.В.Парфеньев, С.С.Шалыт. ФТТ, 6,

ЗИ94, 1964; Д.В.Машовец, Р.В.Парфеньев, С.С.Шалыт.

ЖЭТФ, 47, 2007, 1964; И.М.Цидильковский, М.М.Аксельрод,
В.И.Соколов, ФТТ, 7, ЗИ6, 1965.

[2] В.Л.Гуревич, Ю.А.Фирсов. ЖЭТФ, 40, 199, 1961; 47, 734,
1964.

[3] M.Hass, B.W.Henvis. J.Phys.Chem.Solids, 23, 1099, 1962.

[4] E.D.Palik, S.Teitler, R.F.Wallis. J.Appl.Phys.,
Suppl., 32, 2132, 1961.

[5] L.M.Roth, B.Lax, S.Zwerdling. Phys. Rev., 114,
90, 1959.

[6] B.Lax, J.G.Mavroides, H.J.Zeiger, R.J.Keyes. Phys. Rev.,
122, 31, 1961.