

## О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СПИНОВОГО РЕЗОНАНСА ЭЛЕКТРОНОВ ПРОВОДИМОСТИ В МЕТАЛЛАХ

*Б.И.Кочелав, В.Ф.Фролов*

Показано, что на фоне линии резонансного поглощения звука, уширенной диффузией электронов, должна наблюдаться узкая линия дайсоновского типа. Получено выражение для поперечной намагниченности, индуцируемой акустической волной.

Известно, что использование метода акустического резонанса может иметь определенные преимущества для исследования спин-системы<sup>1</sup>. Однако распространено мнение, что линия акустического парамагнитного резонанса (АПР) электронов проводимости (ЭП) в металлах сильно уширена вследствие диффузии носителей спинов. В работе<sup>2</sup> показано, что ширина линии АПР определяется выражением

$$\Gamma_q = T_2^{-1} + q^2 D, \quad (1)$$

где  $T_2^{-1}$  – скорость поперечной спиновой релаксации ЭП без учета уширения диффузией,  $D$  – коэффициент диффузии ЭП,  $q$  – волновой вектор звука. Отсюда следует, что условие разрешения резонансной линии  $\Gamma_q \ll \omega$  приводит к существованию лишь узкого окна частот звука, в котором возможно наблюдение АПР:

$$T_2^{-1} \ll \omega \ll S^2 D^{-1}, \quad (2)$$

где  $S$  – скорость звука.

Положение усугубляется тем, что стремление уменьшить спиновую релаксацию (понижая температуру, используя чистые образцы) автоматически увеличивает  $D$ , т. е. во многих случаях это окно (2) оказывается всегда закрытым. Условие наблюдения АПР (2) сохранялось во всех последующих работах (см. обзор в<sup>3</sup>).

Однако, от общего внимания ускользнуло следующее важное обстоятельство. Действительно, если электрон в процессе диффузии безвозвратно покидает участок звуковой волны с заданной фазой, то спин "видит" ее смену за время  $\sim 1/Dq^2$ . Это и приводит к описанному выше уширению линии АПР. В действительности же часть ЭП за время жизни спинового состояния  $T_2$  может возвращаться в точку волны с одной и той же фазой, и ширина линии АПР таких электронов будет определяться только временем  $T_2$ . Очевидно, что возможность такой ситуации возрастает с увеличением коэффициента диффузии  $D$  в противоположность условию (2). Это явление аналогично тому, что имеет место в обычном электронном парамагнитном резонансе (ЭПР) в металлах<sup>4</sup>, с той лишь разницей, что в случае ЭПР спин электрона, проходя спин-слой, "видит" резкое изменение как фазы, так и амплитуды электромагнитной волны, а в АПР — в основном только фазы.

Исследуем АПР для звуковой волны, распространяющейся нормально к пластине толщиной  $L$ . Взаимодействие ЭП со звуком можно рассматривать как взаимодействие спинового момента носителя заряда с некоторым эффективным магнитным полем  $\mathbf{H}_1 = \mathbf{h}_1 \exp[-i(\omega t + qx)]$ , создаваемым звуковой волной и зависящим от конкретного механизма спин-фононной связи<sup>2</sup>. Введение магнитного поля  $\mathbf{H}_1$  позволяет использовать для изучения АПР расчет намагниченности, обусловленной спинами ЭП, на основе модифицированного уравнения Блоха:

$$\dot{\mathbf{M}} = \gamma [\mathbf{M} \times \mathbf{H}] - \mathbf{M} T_2^{-1} + D \nabla^2 \mathbf{M}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_1$ ,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение для ЭП,  $D$  — в общем случае анизотропный коэффициент диффузии ЭП, зависящий от ориентации постоянного магнитного поля  $\mathbf{H}_0$ . Уравнение (3) можно использовать, если длина свободного пробега ЭП  $l \ll 1/q$ .

Предполагая, что отсутствует поверхностная релаксация намагниченности на границах образца ( $x = 0, L$ ), для поперечной составляющей осциллирующей намагниченности  $M \sim \exp[-i\omega t]$ , получаем

$$M(x, t) = \frac{i\omega_0 \chi h_1 e^{-i\omega t}}{(\Gamma_q - i\Delta\omega)} \left[ e^{-iqx} + \frac{q}{k} \frac{\text{ch} ikx}{\text{sh} ikL} e^{-iqL} - \frac{q}{k} \frac{\text{ch} ik(x-L)}{\text{ch} ikL} \right], \quad (4)$$

где  $\chi$  — восприимчивость Паули,  $\omega_0 = \gamma H_0$  — резонансная частота ЭП,  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ ,  $\Gamma_q$  — см (1), а

$$k^2 = D^{-1}(i\Delta\omega - T_2^{-1}). \quad (5)$$

При регистрации АПР по измерению намагниченности целесообразно исследовать сигнал, прошедший через пластину достаточной толщины при  $|ikL| \gg 1$ , так как при этом условии полностью затухнет паразитный сигнал, обусловленный электромагнитной волной, возникающей при генерации звука. Тогда из (4) получим намагниченность на границах ( $x = 0, L$ ):

$$M_{0,L} = \frac{i\omega_0 \chi H_1(x, t)_{0,L}}{(\Gamma_q - i\Delta\omega)} \left[ 1 \mp \frac{iq \sqrt{2DT_2}}{(\eta - i\xi)} \right] \quad (6)$$

$$\eta = (\sqrt{1 + T_2^2 \Delta\omega^2} + 1)^{1/2}, \quad \xi = (\sqrt{1 + T_2^2 \Delta\omega^2} - 1)^{1/2} \text{sign } \Delta\omega$$

здесь знак (–) при  $x = 0$  и (+) при  $x = L$ .

Рассмотрение выражения (6) показывает, что на фоне резонанса с шириной  $\Gamma_q$ , должна наблюдаться узкая линия, обусловленная вторым членом в квадратных скобках, с шириной  $T_2^{-1}$ . Форма узкой линии АПР будет аналогична дайсоновской линии обычного ЭПР в металле. Нетрудно видеть, что узкая линия практически всегда доминирует, так как в области резонанса

$$\left| \frac{q}{k} \right|^2 = \frac{2DT_2 q^2}{\eta^2 + \xi^2} \sim (\omega T_2) \frac{\omega D}{S^2} \gg 1. \quad (7)$$

В частности, при типичных значениях, входящих в (7):  $\omega = 10^{10}$  сек $^{-1}$ ,  $S = 3 \cdot 10^5$  см/сек,  $T_2 = 10^{-8}$  сек,  $D = 10^2$  см $^2$ /сек, получим:  $|q/k| \approx 30$ .

Таким образом, полученные нами результаты показывает, что существует возможность наблюдения АПР на ЭП с шириной линии, определяемой временем спиновой релаксации ЭП, причем условия хорошего наблюдения узкой компоненты линии поглощения легко реализуются. Мы надеемся, что эта работа стимулирует экспериментальное исследование акустического резонанса на ЭП в металлах.

#### Литература

1. Альтшулер С.А., Козырев Б.М. Электронный парамагнитный резонанс. М.: 1972.
2. Герасименко В.И. ЖЭТФ, 1961, 40, 585.
3. Голенищев-Кутузов В.А., Самарцев В.В., Соловаров Н.К., Хабибуллин Б.М. Магнитная квантовая акустика. М., 1977.
4. Dyson F.J. Phys. Rev., 1955, 98, 349.

Казанский государственный университет  
им. В.И.Ульянова — Ленина

Поступила в редакцию  
30 января 1982 г.