

ВЛИЯНИЕ ОБМЕННОГО СУЖЕНИЯ ЭПР НА ДИНАМИЧЕСКУЮ ПОЛЯРИЗАЦИЮ ЯДЕР

Л.Л. Бушвили, М.Д. Звиададзе

В ряде работ [1] на основе квантово-статистического рассмотрения показано существенное влияние диполь-дипольного ($d-d$) взаимодействия между электронными спинами на динамическую поляризацию ядер (ДПЯ). В простой теории ДПЯ получается при насыщении запрещенных резонансов (ЗР) на частотах $\omega^{\pm} = \omega_e \pm \omega_I$, так что расстояние (по частоте) между максимумами поляризации (противоположного знака) равно $D = 2\omega_I$ (ω_e и ω_I — частоты электронного и ядерного резонансов). В

строгой теории ДПЯ [1] для D возможны меньшие чем $2\omega_I$ значения. Недавно опубликована работа [2], в которой экспериментально установлено, что D значительно меньше $2\omega_I$ в некоторых веществах, содержащих свободные радикалы, а также наблюдаются другие аномалии, которые нельзя понять при учете только $d-d$ взаимодействия между электронами. Данная заметка показывает, что одновременный учет обменного H_{ex} и $d-d$ взаимодействий между электронами позволяет существенно улучшить согласие теории с экспериментом.

Рассмотрим случай сильных полей, когда зеемановская энергия электронов H_z гораздо больше их обменной и $d-d$ энергий и влиянием несекулярной части $d-d$ взаимодействия можно пренебречь. В этих условиях в качестве отдельной подсистемы нужно выбрать систему с гамильтонианом $H_e = H_{ex} + H_d$, которую назовем обменным резервуаром (ОР). H_d — секулярная часть $d-d$ взаимодействия. Рассматриваемая задача математически эквивалентна задачам, которые решались в работах [1]. В случае быстрой спиновой диффузии ядерная зеемановская подсистема (ЯЗП) характеризуется единой обратной температурой β_I , которая в стационарном состоянии определяется формулой:

$$\beta_I = \frac{\beta_L}{2W_0(\Delta) T_s (\alpha\omega_e^2 + \Delta^2) + \alpha\omega_e^2} \left\{ 2\omega_s W_0(\Delta) T_s \Delta + \frac{\omega_s}{\omega_I} \frac{\alpha\omega_e^2 [W(\omega^-) - W(\omega^+)]}{1/T_I + W(\omega^-) + W(\omega^+)} \right\}. \quad (1)$$

Здесь ω_e — частота, соответствующая взаимодействию H_e . $\alpha = T_s/T_e$, где T_s и T_e — времена спин-решеточной релаксации электронной зеемановской подсистемы и ОР. T_I — время релаксации ЯЗП к ОР, $\Delta = \omega_s - \omega$, ω — частота переменного магнитного поля, $W_0(\Delta)$ — вероятность обычного парамагнитного резонанса, $W(\omega^\pm)$ — вероятности запрещенных резонансов, β_L — обратная температура решетки. При достаточно больших концентрациях примесей $H_{ex} \gg H_d$ и линия ЭПР сужается [3], запрещенные переходы (ЗП) уширяются [4], а скорость релаксации ЯЗП → ОР увеличивается. Из сказанного ясно, что насыщение ЗП сильно затруднено; при этом насыщение обычного резонанса облегчается с приближением ω к центру линии ЭПР. Пренебрегая в (1) членами, связанными с ЗП и тем самым учитывая только эффект, обусловленный релаксацией ЯЗП → ОР, получим

$$\beta_I = \beta_L \frac{2\omega_s W_0(\Delta) T_s \Delta}{2W_0(\Delta) T_s (\alpha\omega_e^2 + \Delta^2) + \alpha\omega_e^2}. \quad (2)$$

Величина $|\beta_I|$ имеет максимумы на частотах

$$\Delta_{\pm} = \pm \sqrt{\frac{2W_0(0) T_s \Gamma^2 \cdot a \omega_c^2}{2W_0(0) T_s \Gamma^2 + a \omega_c^2}},$$

где Γ – ширина линии ЭПР с учетом обменного сужения. При больших χ_{ex} ширина Γ мала, $\Delta_{\pm} \approx \pm \sqrt{2W_0(0) T_s \Gamma}$ и

$$D \approx 2 \sqrt{2W_0(0) T_s \Gamma}. \quad (3)$$

Максимальное значение $|\beta_I|$ по (2) равно

$$|\beta_I|_{\max} \sim \frac{\omega_s}{\sqrt{a} \omega_c} \sqrt{2W_0(0) T_s \frac{\Gamma^2}{a \omega_c^2}}. \quad (4)$$

Если учесть, что Γ с ростом концентрации спинов уменьшается [3], то выражение (3), в отличие от выводов работ [1], согласуется с экспериментами [2], где наблюдалась тенденция уменьшения D с ростом концентрации. Следует отметить, что в нашем рассмотрении ЗР не насыщаются на частотах Δ_{\pm} , соответствующих максимумам поляризации. Параметр насыщения ЭПР на этих частотах небольшой: $S = 2W_0(\Delta_{\pm}) T_s \sim 1$. Эти выводы также находятся в согласии с работой [2], где отмечается, что на частотах Δ_{\pm} не должно быть насыщения ни разрешенного, ни запрещенного резонансов.

В заключении авторы благодарят Г.Р. Хуцишвили за обсуждения.

Поступило в редакцию
21 июня 1967 г.

Литература

- [1] М.А.Кожуншер, Б.Н.Проворотов. ФТТ, 6, 1472, 1964; Доклад на Всесоюзном совещании по радиоспектроскопии твердых тел. Красноярск, 1964;
А.А. Abragam, M. Borghini, Progress in Low Temperature Physics, ed. by C.J. Gorter, Vol. IV, Amsterdam, 1964, p. 384 Л.Л.Буишвили, ЖЭТФ, 49, 1868, 1964.
- [2] С.Ф. Hwang, D.A. Hill, Phys. Rev. Lett., 18, 110, 1967.
- [3] Дж. Пейк, Парамагнитный резонанс, гл. IV, Изд-во "Мир", М., 1965.
- [4] Л.Л. Буишвили, Л.Б. Ватова, ФТТ, 8, 3075, 1966.