

ВОЗРАСТАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПАРАМАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПРИ РЕЗОНАНСНОЙ НАКАЧКЕ

В. А. Ацаркин, О. А. Рябушкин

В статье сообщается о наблюдении эффекта многократного возрастания параллельной магнитной восприимчивости (χ) твердого парамагнетика в условиях сильного сдвига температуры спин-спиновых взаимодействий (T_{ss}), вызванного насыщением парамагнитного резонанса.

Исследование зависимости $\chi(\omega)$ на частотах ω , много меньших частоты парамагнитного резонанса ν_0 , является старейшим способом изучения релаксационных явлений в спиновых системах ("метод параллельных полей" [1]). Эта зависимость обычно имеет вид:

$$\chi(\omega) = \sum_i \chi_i(\omega) = \sum_i \frac{\chi_i(0)}{1 + i\omega\tau_i}, \quad (1)$$

где τ_i может означать время спин-решеточной релаксации, время установления равновесия внутри всей спиновой системы или же время кросс-релаксации (τ_{cr}) в системе с несколькими близкими по частоте резонансными линиями [2]. Поскольку все $\chi_i(0)$ не превышают статической восприимчивости χ_0 , чувствительность метода "параллельных полей" невелика (напомним для сравнения, что при наблюдении парамагнитного резонанса восприимчивость на частоте ν_0 составляет $\chi_0(\nu_0/\delta\nu) \sim (10^2 - 10^3)\chi_0$, где $\delta\nu$ - полуширина резонансной линии).

Возможность резкого увеличения абсолютной величины параллельной восприимчивости, реализованная в описанном ниже эксперименте, основана на одновременном наложении на парамагнитный образец двух переменных магнитных полей: параллельного H_0 поля $H_1 e^{i\omega t}$, используемого для измерения $\chi(\omega)$, и перпендикулярного H_0 поля $h_1 e^{2\pi i\nu t}$, насыщающего парамагнитный резонанс на крыле резонансной линии (с расстройкой $|\nu - \nu_0| \sim \delta\nu$). Как показано одним из авторов этой статьи [3], такое насыщение, вызывающее, как известно, сильное понижение $|T_{ss}|$ (см. [4, 5]), должно привести к возрастанию всех χ_i до величин порядка $(T_0/T_{ss}) \sim (10^1 - 10^3)\chi_0$, где T_0 - температура решетки. Экспериментальная проверка этого предсказания проводилась в данной работе путем измерения $\chi_{cr}(\omega)$. Как известно кросс-релаксационная восприимчивость обусловлена модуляцией Z-компоненты макроскопического магнитного момента образца M_z в поле $H_1 e^{i\omega t}$ из-за перераспределения зеемановской энергии между двумя спиновыми подсистемами, имеющими близкие резонансные частоты $\nu_1 \approx \nu_2$ (предполагается, что расстройка $\Delta_{12} \equiv \nu_1 - \nu_2$ зависит от внешнего магнитного поля и поэтому также модулируется с частотой ω). Можно показать (см., например, [2]), что величина χ_{cr} пропорциональна разности $(\nu_1/T_{z1}) - (\nu_2/T_{z2})$, где T_{z1} и T_{z2} - зеемановские спиновые температуры соответствующих подсистем. С другой стороны,

известно [7, 6], что в условиях эффективной кросс-релаксации эта разность стремится к Δ_{12}/T_{ss} , так что ожидаемое усиление χ_{cr} по сравнению с равновесным значением должно составлять T_0/T_{ss} (к этому выводу приводит и точный расчет [3]).

Опыты проводились на кристалле рубина с концентрацией хрома 0,03%, при $T_0 = 1,7^\circ\text{K}$. Условия кросс-релаксации между различными переходами спектра ЭПР Cr^{3+} задавались выбором угла θ между H_0 и осью C кристалла (см., например, [8]). Мнимая часть восприимчивости χ''_{cr} измерялась на частотах $\omega/2\pi$ в диапазоне $3 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^6$ гц по сигналу поглощения в катушке индуктивности, намотанной на образец рубина и включенной в схему обычного автодинного ЯМР спектрометра.

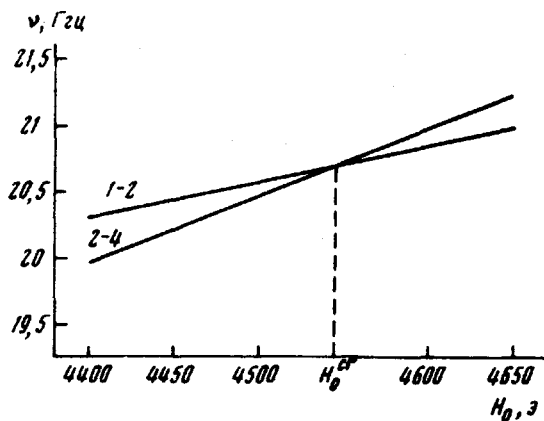


Рис. 1. Зависимость частот переходов (1-2) и (2-4) спектра ЭПР иона Cr^{3+} в рубине (нумерация энергетических уровней — снизу вверх) от магнитного поля H_0 при $\theta = 34^\circ$

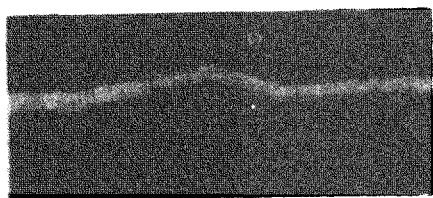
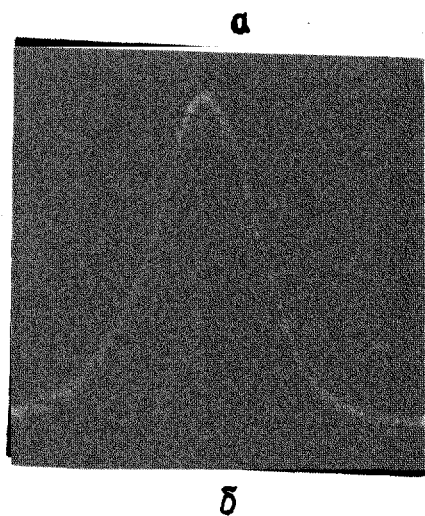


Рис. 2. Осциллограммы сигнала $\chi''_{cr}(H_0)$ при $\theta = 34^\circ$. Развертка соответствует изменению H_0 от 4475 до 4625 э: а — в обычных условиях, б — при насыщении крыла линии (2-3) спектра ЭПР

Пользуясь обычным в магнитной спектроскопии приемом, мы измеряли не $\chi''(\omega)$, а $\chi(H_0)$, при $\omega = \text{const}$. Сигнал поглощения регистрировался с использованием глубокой модуляции магнитного поля (с час-

тотой 50 μ) около значения H_0^c , соответствующего точному равенству частот двух переходов спектра ЭПР, $\nu_1 = \nu_2$, и имел максимум в этой точке (рис. 1, 2, а). Такая форма $\chi_{c,r}''(H_0)$ согласуется с (1) при условии $\omega \gg \tau_{c,r}^{-1}$ и описывает зависимость вероятности кросс-релаксации $W_{c,r}$ от Δ_{12} (см., например, [9]).

Понижение $|T_{ss}|$ осуществлялось путем насыщения крыла какой-либо линии спектра ЭПР рубина на волне 3,2 см (в случае показанном на рис. 1, 2, насыщалось низкочастотное крыло линии, соответствующей переходу 2 - 3, нумерация энергетических уровней снизу вверх). Как видно из рис. 2, б, при этом возникало многократное увеличение сигнала восприимчивости (на рисунке коэффициент усиления $T_0/T_{ss} = +15$). При насыщении противоположного крыла линии ЭПР наблюдалась инверсия кривой $\chi_{c,r}(H_0)$ (сигнал отрицательного поглощения), при сохранении усиления сигнала по абсолютной величине.

При соответствующем подборе частоты можно было одновременно с наблюдением $\chi_{c,r}''$ регистрировать спектр ЯМР ядер ^{27}Al , входящих в решетку рубина (для этого ось катушки несколько отклонялась от направления H_0). Оказалось, что усиление сигнала $\chi_{c,r}''$ в точности равно усилению поляризации ядер ^{27}Al ; более того, возвращение сигналов ЯМР и $\chi_{c,r}''$ к их равновесным значениям после выключения СВЧ накачки происходило с одинаковой постоянной времени (8 сек для рис. 1, 2), характеризующей ядерную спин-решеточную релаксацию. Отметим, что этот результат является, видимо, наиболее прямым экспериментальным доказательством теплового контакта между резервуаром электронных спин-спиновых взаимодействий парамагнитной примеси и зеемановской системой ядер решетки (см., например, [6]), причем ясно, что этот контакт сохраняется и в отсутствие насыщающего поля.

Авторы благодарят М.И.Родак и М.Е.Жаботинского за интерес к работе и полезные замечания.

Институт радиотехники
и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
20 декабря 1972 г.

Литература

- [1] К.Фортер. Парамагнитная релаксация. М., ИИЛ, 1949.
- [2] N. Bloembergen, S. Shapiro, P. S. Pershan, J. O. Artman. Phys. Rev., 114, 445, 1959.
- [3] В.А.Ацаркин, ЖЭТФ, 64, вып. 3, 1973 (в печати).
- [4] Б.Н.Провоторов. ЖЭТФ, 41, 1582, 1961; ФТТ, 4, 2940, 1962.
- [5] М.И.Родак. ФТТ, 6, 521, 1964.
- [6] В.А.Ацаркин, М.И.Родак. УФН, 107, 3, 1972.
- [7] Б.Н.Провоторов. ЖЭТФ, 42, 882, 1962.
- [8] Н.В.Карлов, А.А.Маненков. Квантовые усилители, М., ВИНТИ, 1966.
- [9] R. Cremer. Phys. Stat. sol., 42, 507, 1970.