

# ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЯДЕР (ДПЯ) В КРИСТАЛЛЕ С АСИММЕТРИЧНОЙ ЛИНИЕЙ СПИН-ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРАМАГНИТНОЙ ПРИМЕСИ

А. В. Дуглав

Эксперименты [1, 2] на примесных парамагнитных кристаллах подтвердили установленную в теоретических работах [3, 4] важную роль асимметрии линии  $W(\nu)$  спин-фононных взаимодействий в кинетике насыщения магнитного резонанса в твердом теле. В них были обнаружены обусловленные этой асимметрией эффекты сильного охлаждения резервуара незеемановских взаимодействий (НЗР) электронных спинов примеси при насыщении ЭПР СВЧ полем, проводимом на резонансной частоте  $\nu_0$  [1], и переполаризация НЗР в переходном процессе при насыщении с расстройками  $\Delta$ , лежащими в определенном интервале частот [2]. При

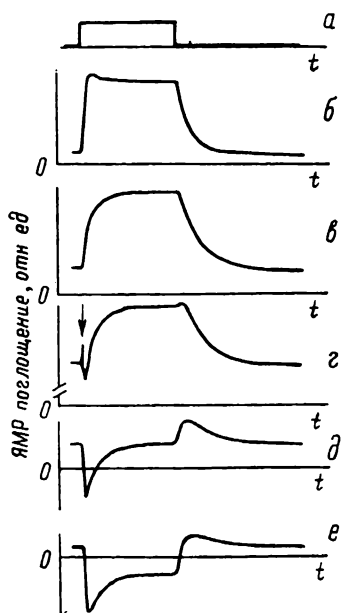


Рис. 1. Кинетика ЯМР протонов решетки при насыщении линии ЭПР ионов  $\text{Co}^{2+}$  СВЧ импульсом (а) длительностью 1с с расстройкой: б — 365, в — 0, г — +115, д — +210, е — +355 МГц.

насыщении ЭПР СВЧ полем, проводимом на резонансной частоте  $\nu_0$  [1], и переполаризация НЗР в переходном процессе при насыщении с расстройками  $\Delta$ , лежащими в определенном интервале частот [2]. При

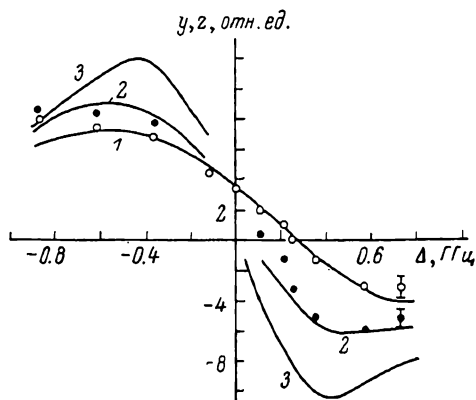


Рис. 2. Зависимость  $z_{\text{ст}}$  (1, светлые точки) и величины первого экстремума  $z$  (2, черные точки) и  $y$  (3) от расстройки. Сплошные линии — теория, точки — эксперимент.

этом остались невыясненными связанные с указанными эффектами особенности динамической поляризации зеемановской системы магнитных ядер (ЯЗС) основной решетки, обусловленной существованием теплового контакта ЯЗС и НЗР [5]. В данной работе этот вопрос изучается на кристалле  $\text{La}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$   $\text{Co}^{2+}$  (2 ат. %) с существенно асимметричной линией  $W(\nu)$  рабочих X-центров ионов  $\text{Co}^{2+}$  при равновесной температуре  $T_0 = 1.6$  К в магнитном поле, параллельном тригональной оси кристалла.

Неравновесность НЗР ионов  $\text{Co}^{2+}$ , в который дают вклад сверхтонкие и электронные диполь-дипольные взаимодействия (ЭДДВ), создавалась при помощи СВЧ импульсов с частотой  $\nu \approx 9.4$  ГГц, обеспечивавших сильное насыщение при всех реализованных расстройках. Сигналы ЯМР ядер водорода (протонов) решетки регистрировались при помощи автодинного генератора в памяти многоканального накопителя. Наиболее характерные временные зависимости ЯМР поглощения, пропорционального обратной температуре  $z = T_0/T_n$  ЯЗС протонов решетки, приведены на рис. 1. Откло-

нение ЯЗС от равновесия с решеткой при  $\Delta = 0$  и временное изменение знака  $z(t)$ , видимые соответственно на рис. 1,  $\theta$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ , составляют новые особенности ДПЯ по реализованному методу динамического охлаждения [5], ранее не наблюдавшиеся в экспериментах такого типа, обычно проводимых на объектах с несущественной асимметрией линии  $W(\nu)$ . Вместе с тем эти особенности вполне согласуются с аналогичными «аномалиями» в кинетических зависимостях обратной температуры  $y = T_0/T_{nz}$  НЗР, полученными в экспериментах [2] по методу усиленной низкочастотной восприимчивости (УНВ) и отнесенных на счет асимметрии  $W(\nu)$  исследованных ионов.

Анализ экспериментальных результатов проводился на основе кинетических уравнений, учитывающих первый ( $\Delta_1$ ) и второй ( $\Delta_2$ ) центральные моменты функции  $W(\nu)$  [4]

$$\dot{x} = -p \left( x + \frac{\Delta}{\nu_0} y \right) - \tau_x^{-1} (x - 1) - \frac{\Delta_1}{\nu_0} \tau_x^{-1} (y - 1),$$

$$\dot{y} = -p \frac{\nu_0 \Delta}{\nu_{nz}^2} \left( x + \frac{\Delta}{\nu_0} y \right) - \frac{\Delta_2^2}{\nu_{nz}^2} \tau_x^{-1} (y - 1) - \frac{\nu_0 \Delta_1}{\nu_{nz}^2} \tau_x^{-1} (x - 1) - k \tau_{cr}^{-1} (y - z),$$

$$\dot{z} = -\tau_{cr}^{-1} (z - y) - \tau_n^{-1} (z - 1),$$

где  $x = T_0/T_x$ ,  $T_x$  — температура зеемановского резервуара (ЗР) электронных спинов,  $\tau_x$  и  $\tau_n$  — времена спин-решеточной релаксации ЗР и ЯЗС соответственно,  $\tau_{cr}$  — время установления контакта между НЗР и ЯЗС,  $\nu_{nz}$  — средняя частота НЗР,  $p$  — вероятность переходов под действием СВЧ поля,  $k$  — отношение теплоемкостей ЯЗС и НЗР.

В исследованном кристалле протоны практически не связаны непосредственно с решеткой ( $\tau_n > 10^3$  с [6]), поэтому в стационарном режиме  $z_{cr} = y_{cr}$ , и измерение  $z_{cr}$  в зависимости от  $\Delta$  (рис. 2) позволило определить  $\Delta_1 \approx 0.21$  ГГц,  $\Delta_2^2 \approx 0.68$  ГГц<sup>2</sup>. Параметры  $\tau_x$  и  $\tau_{nz} = \tau_x \frac{\nu_{nz}^2}{\Delta_2^2}$  найдены по восстановлению ЭПР поглощения после насыщения линии ЭПР с расстройкой, происходящему по двухэкспоненциальному закону с временами  $t_1 \approx 125$  мс,  $t_2 \approx 30$  мс. Поскольку в исследованном кристалле  $\Delta_1^2 \ll \Delta_2^2$ , можно считать [4]  $t_1 \approx \tau_x$ ,  $t_2 \approx \tau_{nz}$ , откуда  $\nu_{nz} \approx 0.41$  ГГц,  $k = n_I \nu_I^2 I(I+1) / [n_s \nu_{nz}^2 S(S+1)] \approx 0.23$  ( $I$  — ядерный спин).

Первый экстремум в зависимости  $z(t)$  удается описать в рамках кинетических уравнений (1), если считать, что большинство протонов решетки одинаково хорошо связано с НЗР, и полагать  $\tau_{cr} \approx 20$ – $30$  мс, однако спад  $|z|$  в пределах СВЧ импульса, а также свободная релаксация должны в этом случае протекать в 1.5–2 раза быстрее, чем это наблюдается. Для более точного описания кинетики температуры ЯЗС необходимо, по-видимому, использовать более сложную модель, учитывающую процессы ядерной спиновой диффузии.

При изучении динамического поведения ЯЗС было обнаружено, что если точка насыщения лежит на крыле какой-либо сверхтонкой компоненты (СТЛ) линии ЭПР  $\text{Co}^{2+}$ , на временах  $\leq 1$  мс после включения СВЧ импульса наблюдается короткий всплеск температуры ЯЗС (отмечен на рис. 1,  $\delta$ ). Характерная зависимость [5] величины и знака всплеска от расстройки СВЧ поля относительно центра СТЛ позволила заключить, что наблюдаемое явление связано с охлаждением или перегревом резервуара ЭДДВ парамагнитной примеси, имеющего среднюю частоту порядка ширины отдельной СТЛ и «присоединяющегося» к общему НЗР за время кросс-релаксации между сверхтонкими компонентами линии ЭПР ионов  $\text{Co}^{2+}$ .

Приведенные результаты свидетельствуют о существенном видоизменении кинетических характеристик ДПЯ в кристаллах исследованного типа с асимметричной линией  $W(\nu)$  и о возможности изучения в них неравновесного НЗР и определения моментов  $\Delta_1$  и  $\Delta_2^2$  реализованным сравнительно простым способом. Отметим, что отсутствие у парамагнитных ионов

начального расщепления спиновых энергетических уровней исключает практическую возможность использования в указанных целях метода УНВ.

Автор благодарит А. Х. Хасанова за обсуждение результатов и В. В. Соколова за помощь в проведении эксперимента.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Хасанов А. Х. ФТТ, 1985, т. 27, № 5, с. 1321—1326.
- [2] Авагян Э. В., Ацаркин В. А., Демидов В. В. ФТТ, 1987, т. 29, № 1, с. 77—82.
- [3] Buishvili L. L., Zviadadze M. D. Phys. Lett., 1967, vol. 24A, № 12, p. 661—662; Кочелаев Б. И., Нигматуллин Р. Р. ФТТ, 1972, т. 14, № 11, с. 3413—3419; Нигматуллин Р. Р. ФТТ, 1973, т. 15, № 12, с. 3643—3649.
- [4] Родак М. И. ЖЭТФ, 1980, т. 79, № 4 (10), с. 1345—1352.
- [5] Ацаркин В. А. Динамическая поляризация ядер в твердых диэлектриках. М.: Наука, 1980. 196 с.
- [6] Джеффрис К. Динамическая ориентация ядер. М.: Мир, 1965. 320 с.

Казанский государственный  
университет им. В. И. Ульянова-Ленина  
Казань

Поступило в Редакцию  
20 июля 1987 г.

УДК 539.293 : 538

Физика твердого тела, том 30, в. 1, 1988  
Solid State Physics, vol. 30, № 1, 1988

## АНОМАЛИЯ ТЕРМОМАГНИТНОГО ЭФФЕКТА В МАНГАНИТАХ В РАЙОНЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ

К. П. Белов, Е. П. Свирина, Л. П. Шляхина, Ф. Ф. Шакирова

В манганитах на основе  $\text{LaMnO}_3$  со структурой перовскита при различных замещениях ионов La и Mn установлена сильная взаимосвязь между магнитными и электрическими свойствами [1-3]. Например, обнаружены переходы металл—полупроводник в районе точки Кюри  $T_c$  для данного состава и при температурах  $T < T_c$  при замещении ионов Mn другими ионами 3d-металлов. Показано, что ширина запрещенной зоны в манганитах сравнима с величиной обменной энергии [4-7].

С целью дальнейшего изучения физической природы взаимосвязи магнитных свойств и кинетических эффектов в манганитах мы провели исследование четных термо- и гальваномагнитных эффектов на монокристалле  $\text{La}_{0.68}\text{Pb}_{0.30}\text{Sr}_{0.02}\text{MnO}_3$  в районе точки Кюри. Методы получения монокристалла, нанесения контактов и измерения исследованных физических величин описаны нами в статьях [3, 4].

Нами установлено, что исследованный монокристалл имеет металлический характер проводимости в ферромагнитной области. На рис. 1 представлены температурные зависимости продольного магнетосопротивления ( $\Delta\rho_s/\rho$ -эффекта) и продольного термомагнитного эффекта  $\Delta\alpha$  в районе температуры Кюри  $T_C=335$  К в магнитном поле  $H=14$  кЭ. Видно, что кривая  $\Delta\alpha(T)$  аналогична кривой  $\Delta\rho_s/\rho(T)$ . Для объяснения этого экспериментального факта мы использовали теоретическое соотношение Дика и Абельского [8] для коэффициента термоэдс  $\alpha$  в ферромагнитных металлах вблизи температуры Кюри

$$\alpha = \frac{\pi^2 k^2 T}{3eE_F} \left( \frac{3}{2} + r_{ph} \frac{\rho_{ph}}{\rho} + r_s \frac{\rho_s}{\rho} + r'_s \frac{\rho'_s}{\rho} \right). \quad (1)$$

Здесь  $E_F$  — энергия Ферми;  $k$  — постоянная Больцмана,  $\rho_{ph}$  и  $\rho_s$  — фононный и спиновый вклады в электросопротивление  $\rho$ ;  $r_{ph}$  и  $r_s$  — параметры,