

СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ НЕЦЕНТРАЛЬНЫХ ПАРАМАГНИТНЫХ ИОНОВ, ИНДУЦИРОВАННАЯ ТУННЕЛЬНЫМ ЭФФЕКТОМ

В.С. Вихнин, Л.С. Сочава, В.А. Крылов, Ю.Н. Толпаров

Впервые обнаружена спиновая поляризация парамагнитных ионов, возникающая в результате когерентного туннелирования между нецентральными позициями, которое происходит как с изменением, так и без изменения их спинового состояния.

1. Нецентральные примесные ионы (НПИ) являются модельным объектом для исследования туннельного эффекта в твердых телах. В условиях, обычно реализуемых на эксперименте, внутренние поля дефектов локализуют НПИ в отдельных минимумах многоямного потенциала, и туннельные переходы НПИ индуцируются фононами, которые испытывают неупругое рассеяние на НПИ¹. В связи с проблемой исследования туннелирования локальных центров в твердом теле возникают два принципиальных вопроса. Во-первых, возможны ли экспериментальные ситуации, в которых непосредственно, без вклада неупругого рассеяния фононов проявляется когерентное туннелирование НПИ в условиях локализации в отдельных ямах, когда туннельные состояния не реализуются? Во-вторых, какова

роль спин-зависящего туннелирования для парамагнитных НПИ и к каким новым эффектам приводит подобное туннелирование? Эти вопросы исследуются в настоящей работе. Оказалось, что спин- зависящее (а именно, спин-орбитальное) когерентное туннелирование приводит к значительному эффекту спиновой поляризации НПИ Co^{2+} в SrO при изменении внешнего поля.

2. В работе на модельной системе $\text{SrO} : 0,01\% \text{Co}^{2+}$ исследовались процессы установления равновесной заселенности нецентральных минимумов энергии и их спиновых уровней после включения или выключения постоянного электрического поля E ($E = (1 - 2) \cdot 10^5 \text{ В/см}$). Создавшаяся полем преимущественная ориентация дипольных моментов примесных центров проявлялась на эксперименте в изменении интенсивности линий спектра ЭПР и в возникновении дихроизма оптического спектра поглощения кристалла $\text{SrO} : \text{Co}^{2+}$. В ЭПР-и оптическом экспериментах использовалась геометрия $E \parallel [110]$ и регистрировалось изменение числа центров, дипольный момент которых перпендикулярен полю E . Скорость включения (выключения) поля варьировалась изменением постоянной времени τ_{RC} цепи заряда образца.

При $T = 4,2 \text{ К}$ время ион-решеточной релаксации иона Co^{2+} составляет $\tau_0 = 85 \pm 10 \text{ с}^{-2}$, Однако в тех случаях, когда скорость включения или выключения поля E достаточно мала (времена переключения τ_{RC} лежат в диапазоне $10^{-3} - 1 \text{ с}$), часть релаксационного процесса осуществляется со скоростью $1/\tau = 10 \text{ с}^{-1}$, которая на три порядка больше, чем $1/\tau_0$ ("ступеньки" $A_{\text{вкл}}, A_{\text{выкл}}$ на временных зависимостях ЭПР – и оптического поглощения, рис. 1). В указанных условиях после переключения поля наблюдается также кратковременное увеличение сигнала ЭПР (рис. 1, а), причем величина его результирующего изменения ($A_{\text{вкл}}, A_{\text{выкл}}$) соответствует приращению числа 90-градусных центров, получаемому из величины "ступеньки" на зависимости коэффициента поглощения $K(t)$ ($A_{\text{вкл}}, A_{\text{выкл}}$, рис. 1, б).

Зависимости продолжительности и амплитуды "всплеска" сигнала ЭПР от скорости выключения поля приведены на рис. 2. Кривая 2, представляющая собой отношение η сигнала в максимуме "всплеска" к сигналу за вычетом "всплеска", имеет хорошо выраженный максимум при $\tau_{RC} \cong 0,1 \text{ с}$.

Изложенные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при достаточно медленном включении (выключении) электрического поля изменение ориентации дипольного момента заметной части центров Co^{2+} происходит со скоростью $1/\tau \gg 1/\tau_0$. Возникающая при этом спиновая поляризация превышает равновесное значение более, чем в два раза (рис. 2, кривая 2).

3. Реориентационная релаксация нецентрального иона при низких температурах связана, главным образом, с туннельными прыжковыми процессами³⁻⁶. Слабая зависимость параметров обсуждаемого эффекта от температуры (измеренная в интервале 1,6 – 4,2 К) также указывает на туннельную природу "быстрого" релаксационного процесса. Постановка эксперимента в настоящей работе весьма благоприятна для наблюдения когерентного туннелирования, происходящего в условиях, когда внешнее электрическое поле компенсирует внутреннее (дефектное) поле – с точностью до естественной ширины уровней одноядерных состояний, и туннелирование происходит без участия фононов (так называемый туннельно-контролируемый процесс^{3,4} – ТКП). Действительно, если величина внешнего поля E превосходит полуширину $\langle \Delta E \rangle$ функции распределения внутреннего электрического поля, смещающего уровни соседних ям центра на величину $p \cdot \Delta E$, то за время изменения внешнего поля условия, максимально благоприятные для ТКП ($E(t) = -\Delta E$), осуществляются приблизительно для половины всех центров.

Рассмотрим на примере двухъямного потенциала процесс выключения поля, во время которого яма b , находившаяся при включенном поле выше ямы a , опускается. Увеличение заселенности ямы b происходит по четырем каналам ТКП, последовательно включаю-

щимся при совпадении спиновых уровней, принадлежащих ямам a и b (рис. 3). Вследствие спин-орбитального взаимодействия должен иметь место значительный спин-зависящий туннельный эффект⁴. Действительно, оценки показывают, что спин-орбитальные туннельные матричные элементы имеют в нашем случае тот же порядок величины, что и спин-независящие туннельные матричные элементы. В результате при включении каналов 1 и 4 происходит реориентационные переходы, которые сопровождаются изменением спинового состояния иона. При движении ямы b вниз сначала через каналы 1, 2 происходит заполнение уровня $b|-\rangle$, что приводит к возникновению неравновесной спиновой поляризации частиц в яме b ; затем через каналы 3, 4 заполняется уровень $b|+\rangle$, и спиновая поляризация уменьшается. Степень поляризации ослабляется также из-за спин-решеточной релаксации в пределах отдельной потенциальной ямы.

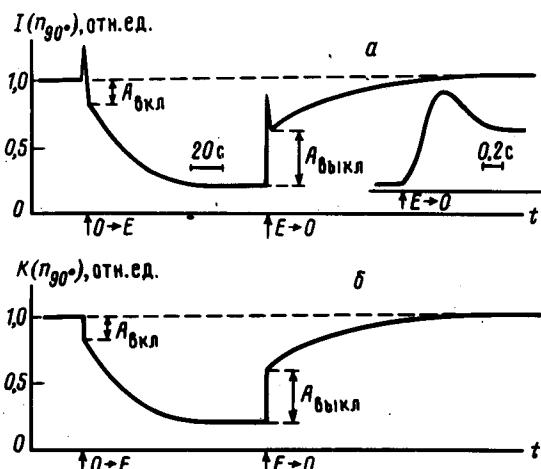


Рис. 1

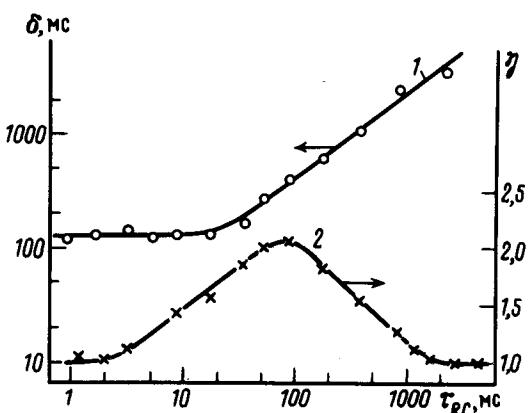


Рис. 2

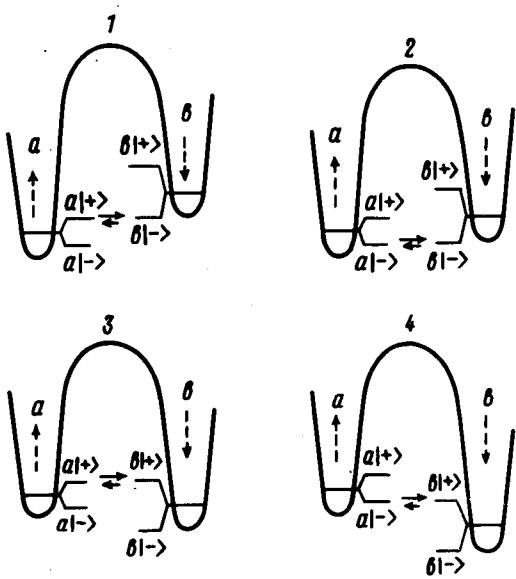


Рис. 3

Сравнение полученных для обсуждаемой модели приближенных решений кинетических уравнений с экспериментом показало, что спин-орбитальное и независящее от спина когерентное туннелирование позволяют качественно объяснить главные особенности наблюдаемого эффекта. Именно, находит объяснение форма временной зависимости эффекта спиновой поляризации и характерный масштаб времени протекания процесса (при этом туннель-

ные матричные элементы оказываются порядка $10^5 - 10^6$ Гц), характер зависимостей длительности и амплитуды процесса спиновой поляризации от скорости переключения поля. Так, с уменьшением τ_{RC} временные области "включения" четырех рассмотренных каналов ТКП приближаются друг к другу, что заметно сокращает длительность всего эффекта спиновой поляризации, и его амплитуду. При этом для $\tau_{RC} \ll \tau$ длительность процесса поляризации достигает минимального значения, которое при дальнейшем уменьшении τ_{RC} практически не изменяется. Следует подчеркнуть, что теория существенно лучше согласуется с экспериментом при учете спин-орбитального туннелирования, приводящего к переходам с изменением спинового состояния.

Таким образом, эффект спиновой поляризации и "быстрой" электродипольной реориентационной релаксации нецентрального иона Co^{2+} в SrO , наблюдаемый при включении и выключении внешнего поля, обязан когерентному туннелированию иона (ТКП), значительный вклад в которое вносят туннельные переходы с изменением его спинового состояния.

Авторы благодарят С.Н.Арутюнова за разработку метода регистрации быстрых изменений сигнала ЭПР.

Литература

1. Pirc R., Zeks B., Gosar P. J. Phys. Chem. Solids, 1966, 27, 1219.
2. Вихнин В.С., Сочава Л.С., Толпаров Ю.Н. ФТТ, 1984, 26, 2661.
3. Sussmann J.A. J. Phys. Chem. Solids, 1967, 28, 1643.
4. Вихнин В.С. ФТТ, 1978, 20, 1340.
5. Каган Ю.М., Максимов Л.А. ЖЭТФ, 1980, 79, 1363.
6. Vikhnin V.S., Sochava L.S., Tolparov Y.N. In "Defects in Insulating Crystals". Proc. of the Internat. Conf., Riga, 1981. Spr. - Ver., Berlin - New York, p. 601.