

**ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
СПИН-СПИНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ЭПР**

В.А.Ацаркин, С.К.Моршнев

За последнее время получила развитие теория магнитного резонанса в твердом теле, рассматривающая диполь-дипольные взаимодействия парамагнитных частиц (ядер или электронов) как отдельный энергетический

резервуар, обладающий собственной температурой $T_{\text{ВЗ}}$, отличной, вообще говоря, как от температуры спинов в магнитном поле ("зеемановской системы"), так и от температуры решетки [1-5]. В частности, было показано, что при насыщении однородно уширенной линии магнитного резонанса на частоте $\nu \pm \Delta$, несколько большей или меньшей частоты точного резонанса ν_0 , разница энергий резонансного и насыщающего квантов $h\Delta$ должна поглощаться спин-спиновым резервуаром или, соответственно, извлекаться из него, что может привести к сильному повышению (вплоть до перехода в область отрицательных значений) или же к понижению тем-

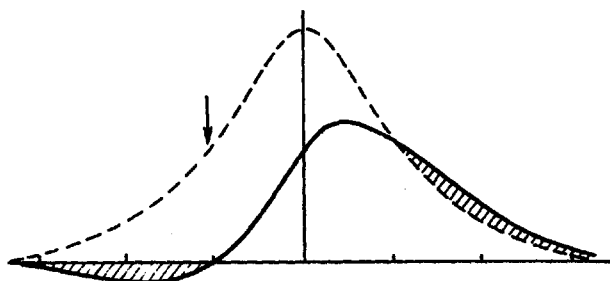


Рис. 1. Теоретическая форма линии при не строго резонансном насыщении. Пунктир-линия в отсутствии насыщения. Стрелка показывает расстройку насыщающего сигнала относительно центра линии. Области инверсии и увеличенного поглощения заштрихованы

пературы $T_{\text{ВЗ}}$, вследствие этого, к существенному изменению формы линии магнитного резонанса. При таком не строго резонансном насыщении следует, в частности, ожидать [5] возникновения области отрицательного поглощения (инверсии сигнала магнитного резонанса) на одном крыле линии и увеличение сигнала поглощения по сравнению с равновесным — на другом крыле (рис. 1). До сих пор, насколько нам известно, не существует прямых доказательств пригодности упомянутой теории в ЭПР; данная работа имела целью экспериментальную проверку применимости теории для этого случая.

Опыты проводились в диапазоне 3 см при температуре 1,8°K на монокристаллах $\text{K}_3\text{Co}(\text{CN})_6 : \text{Fe}^{3+}$ (концентрация железа составляла ~0,5%). Это вещество выбрано потому, что его спектр ЭПР состоит лишь из одной линии (эффективный спин $S' = 1/2$), не имеющей сверхтонкой структуры [6]. Ширина линии $\Delta\nu$ составляла около 60 Мгц; она является по-видимому, однородной, так как восстановление сигнала ЭПР после насыщения (в центре линии) описывается одной экспонентой (постоянная времени $\tau_1 \approx 40$ мсек).

В наших опытах не строго резонансное насыщение линии ЭПР производилось коротким (50-80 мсек) насыщающим импульсом, а индикация осуществлялась непрерывным слабым сигналом при низкочастотной моду-

ляции магнитного поля. Время прохождения через линию ЭПР составляло несколько миллисекунд; таким образом, в течение времени, необходимого для индикации, Зеemanовская система была практически изолирована от решетки. Этого, однако, нельзя заранее утверждать по отношению к спин-спиновому резервуару, температура которого, сдвинутая в результате не строго резонансного насыщения, релаксирует к равновесной в течение некоторого характеристического времени τ_1'' , вообще говоря, меньшего, чем τ_1 . Вследствие этого эффекты, связанные с сильным сдвигом T_{B3} , должны наиболее четко проявляться в первые моменты после выключения насыщающего импульса. Поскольку эти эффекты (инверсия и возрастание поглощения) максимальны в областях, отстоящих от точки, в которой достигается насыщение, на величину порядка ширины линии (рис.1), мы производили индикацию на частоте $\nu_{\text{инд}}$, отличающейся от частоты насыщения $\nu_{\text{нас}}$ примерно на эту же величину.

Некоторые результаты экспериментов представлены на рис. 2, а, б (см. вклейку), где показаны осциллограммы линии поглощения при не строго резонансном насыщении в двух случаях. Рис. 2, а соответствует ситуации, когда в момент окончания насыщающего импульса сигналы на частотах индикации и насыщения оказываются по одну и ту же сторону от вершины линии, а рис. 2, б – случаю, когда эти сигналы оказываются на противоположных крыльях линии ($\nu_{\text{нас}} - \nu_{\text{инд}} = -1,0 \Delta\nu$ и $-1,3 \Delta\nu$ соответственно). Видно, что в первом случае сразу же после окончания импульса действительно наблюдается область инверсии, а во втором – область увеличенного (по сравнению с равновесным) поглощения. Сравнение этих результатов с теоретическими формулами работ [5] приводит к хорошему совпадению, если принять, что величина локального магнитного поля $\gamma H_{\text{лок}} \approx \Delta\nu / 2$. При этом оказывается, что рис. 2, а, б, соответствует температура $T_{B3} \approx 0,012^\circ\text{K}$. Обработка результатов, проведенная с учетом изменения температуры T_{B3} за время прохождения линии сигналом индикации, дала возможность оценить время τ_1 установления равновесия между спин-спиновым резервуаром и решеткой: $\tau_1' \sim 1-2 \text{ мсек}$. Таким образом $\tau_1' / \tau_1 \ll 1$, откуда следует [5], что при непрерывном не строго резонансном насыщении эффекты, связанные со сдвигом T_{B3} , будут в данном веществе весьма слабыми. Сравнительно малая величина τ_1' связана, возможно, со взаимодействием между спин-спиновым резервуаром и ядрами кобальта и калия, обладающими значительными магнитными моментами (подобный механизм рассмотрен в работе [7]).

Были проведены также опыты, при которых осуществлялось изэнтропическое прохождение линии ЭПР от дальнего крыла до вершины в условиях насыщения. После снятия насыщения на этом же крыле линии наблюдалось отрицательное поглощение (инверсия), что свидетельствует о возникновении сильного сдвига температуры T_{B3} . Существенно, что инверсия в этом случае достигается без прохождения через точный резонанс (вершину линии); по существу, здесь мы имеем дело с так называемым размагничиванием во вращающейся системе координат (ADRF), известным в ЯМР [2].

Проведенные опыты показывают, что в парамагнитных кристаллах действительно может существовать энергетический резервуар спин-спино-

вых взаимодействий, температуру которого можно сильно сдвигать, используя, в частности, не строго резонансное насыщение линии ЭПР. Отметим также, что в данной работе отрицательное поглощение (рис. 2, а) было получено в условиях, отличающихся от всех применявшихся до сих пор методов достижения инверсии в системах с двумя зеемановскими подуровнями ($S = 1/2$).

Авторы выражают глубокую благодарность М.И.Родак, способствовавшей постановке и проведению этой работы, а также М.Е.Лаботинскому и А.В.Францессону за помощь и полезные дискуссии.

Институт
радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
12 мая 1967 г.

Литература

- [1] Б.Н.Провоторов. ЖЭТФ, 41, 1582, 1961; 42, 882, 1962; ФТТ, 4, 2940, 1962.
- [2] A.G.Anderson, S.R.Hartmann. Phys.Rev. 128, 2023, 1962.
- [3] J.Jeener, H.Eisendrath, R.Van Steenwinkel. Phys.Rev. 133, A478, 1964.
- [4] М.И.Родак. ЖЭТФ, 45, 730, 1963; И.Д.Маш, М.И.Родак. ФТТ, 7, 717, 1965.
- [5] М.И.Родак. ФТТ, 6, 521, 1964; Канд. диссертация, М., 1965.
- [6] J.Baker, B.Bleaney, K.Bowers. Proc. Phys.Soc., B69, 1205, 1956.
- [7] R.L.Kyhl, B.D.Nageswara-Rao. Preprint, Mass.Inst.Techn., 1966.