

СВЯЗЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЯДЕР С ТЕМПЕРАТУРОЙ ЭЛЕКТРОННОГО СПИН-СПИНОВОГО РЕЗЕРВУАРА

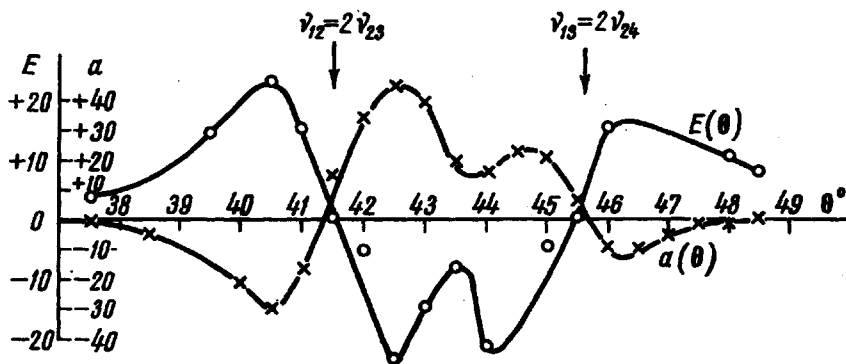
В.А.Ацаркин, А.Е.Мефед, М.И.Родак

За последнее время появились теоретические работы [1,2], указывающие на возможность нового механизма динамической поляризации ядер в парамагнитных кристаллах за счет непосредственной передачи температуры от резервуара электронных спин-спиновых взаимодействий парамагнитной примеси (системы $S-S$) к зеемановской системе ядер решетки (системе Z_N); на существование прямого контакта между системами $S-S$ и Z_N косвенно указывают и некоторые экспериментальные данные [3]. Цель нашей работы — получение убедительных доказательств непосредственной связи между системами $S-S$ и Z_N и осуществление за счет этой связи динамической поляризации ядер.

Из теории следует, что сдвиг температуры T_{SS} системы $S-S$ может осуществляться как при не строго резонансном насыщении линии ЭПР, так и при насыщении линий в условиях кросс-релаксации [4–7]. Если тепловой контакт между $S-S$ и Z_N достаточно хорош (намного лучше контакта этих систем с решеткой), то в обоих случаях можно ожидать и соответствующего изменения зеемановской температуры ядер (T_{Z_N}), т.е. их динамической поляризации. В частности, появляется возможность поляризации ядер при кросс-релаксации в электронной системе, даже если насыщение линии ЭПР производится точно на ее вер-

шине, тогда как при классическом "солид-эффекте" [8, 9] динамическая поляризация ядер достигается за счет насыщения запрещенных электронно-ядерных переходов, расположенных на крыльях линии ЭПР.

Мы проводили насыщение линий иона Cr^{3+} в рубине (концентрация хрома 0,05%) точно в резонансе, т.е. в максимуме поглощения, при температуре $T_0 = 1,8^\circ\text{K}$ на волне 3,2 см импульсами длительностью



\circ , E — усиление поляризации ядер Al^{27} при строго резонансном насыщении линии 2–3 ЭПР иона Cr^{3+} (левая шкала); \times , a — величина поглощения (в произвольных единицах) в центре той же линии после ее прохождения от вершины до высокочастотного крыла в условиях насыщения (правая шкала). θ — угол между осью кристалла и постоянным магнитным полем. Стрелки указывают точки кратности частот при гармонической кросс-релаксации

0,4 мсек и частотой следования 50 μs ; одновременно наблюдался сигнал ЯМР от ядер Al^{27} . Динамическая поляризация ядер действительно была достигнута при ориентациях внешнего магнитного поля, соответствующих областям кросс-релаксации иона Cr^{3+} . На рисунке показана зависимость усиления поляризации ядер (E) от угла θ между магнитным полем и осью кристалла при насыщении перехода 2–3 иона хрома. Углы, при которых $E \sim 1$, соответствуют точной кратности частот при гармонической кросс-релаксации: $\nu_{1-2} = 2\nu_{2-3}$ и $\nu_{1-3} = 2\nu_{3-4}$ (нумерация уровней снизу вверх). В областях наибольшей поляризации отклонение от точной кратности составляет $\sim 300 \text{ M}\mu\text{s}$, причем знак E всюду соответствует ожидаемому знаку T_{SS} при кросс-релаксации. Аналогичные результаты получены и для других областей кросс-релаксации с соотношением частот 1:1 и 1:2.

Для контроля за величиной T_{SS} мы применили специальную методику, состоящую в быстром (по сравнению со спин-решеточной релаксацией электронов) прохождении части линии ЭПР от ее вершины до далекого крыла в условиях насыщения с последующим наблюдением этой же линии слабым индицирующим сигналом (величину поглощения в центре линии, измеренную при индикации, в дальнейшем будем обозначать a). Процедура насыщения при этом фактически состоит из двух этапов:

1 — насыщение точно в резонансе, выравнивающее заселенности уровней электронной зеemanовской системы (Z_e), но не затрагивающее системы $S-S$; 2 — не строго резонансное насыщение, результат которого зависит от начального значения T_{SS} . Если $T_{SS} = T_0$, поглощение на втором этапе будет незначительным и система Z_e практически останется насыщенной ($\alpha = 0$); если же система $S-S$ была, например, "переохлаждена" ($0 < T_{SS} \ll T_0$), то насыщение высокочастотного крыла линии (расстройка $\Delta > 0$) приведет к поглощению энергии системой $S-S$ на частоте Δ . Одновременно будут происходить и переходы на верхний уровень в системе Z_e (равновесие наступит при равенстве нулю суммы бoльцмановских факторов систем Z_e и $S-S$ [4-6]); в результате система Z_e окажется инвертированной, что будет отмечено при индикации ($\alpha < 0$). Если система $S-S$ была "перегрета" ($T_{SS} < 0$, $|T_{SS}| \ll T_0$), насыщение того же крыла линии приведет к уменьшению фактора насыщения системы Z_e , что даст при индикации $\alpha > 0$. Те же эффекты, но с переменной знака, возникают и при насыщении низкочастотного крыла линии.

Пользуясь этой методикой, мы обнаружили полную корреляцию между величинами E и α , а, следовательно, между T_{Z_N} и T_{SS} (см. рисунок). Синхронное изменение E и α наблюдалось и в процессах установления и распада поляризации ядер (соответствующие постоянные времени составляли 25 и 35 *сек*; первая величина указана без учета скважности импульсов и соответствует "чистому" времени 0,5 *сек*). Указанная корреляция между E и α имела место как при кросс-релаксации, так и при обычном методе поляризации ядер насыщением крыла линии ЭПР. Отметим, что в обоих случаях значительная величина E достигалась уже при факторе насыщения, равном 1; это, очевидно, исключает возможность классического механизма динамической поляризации [8,9], связанного с насыщением запрещенных электронно-ядерных переходов.

Полученные данные свидетельствуют о существовании хорошего прямого теплового контакта между системами $S-S$ и Z_N в рубине; во всяком случае, время релаксации первой системы ко второй было в наших опытах, видимо, короче времени прохождения линии ЭПР при насыщении (менее 1 *мсек*). Изложенные результаты, являясь, по-видимому, первым экспериментальным подтверждением нового механизма поляризации ядер, дают и новый метод поляризации — путем использования кросс-релаксации в электронной системе. Кроме того, появляется возможность детального изучения электронной кросс-релаксации по наблюдению сигнала ЯМР, а также и непосредственно по сдвигу T_{SS} , измеряемому описанным здесь методом быстрого прохождения линии ЭПР при насыщении.

Авторы благодарят М.Е.Жаботинского, А.В.Францессона и С.К.Моршнева за помощь и интерес к работе, а также авторов работы [3] за любезную присылку препринта.

Литература

- [1] М.А.Кожушнер, Б.Н.Провоторов. Сб. Радиоспектроскопия твердого тела. Атомиздат, стр.5, 1967.
- [2] Л.Л.Буишвили. ЖЭТФ, 49, 1868, 1965.
- [3] R.L.Kuhl, B.D.Nageswara-Rao. Phys. Rev., 158, 284, 1967.
- [4] Б.Н.Провоторов. ЖЭТФ, 41, 1582, 1961; ЖЭТФ, 42, 882, 1962; ФТТ, 4, 2940, 1962.
- [5] М.И.Родак. ЖЭТФ, 45, 730, 1963; ФТТ, 6, 521, 1964.
- [6] J.Jeener, H.Eisendrath, R.Van Steenwinkel. Phys. Rev., 133, A478, 1964.
- [7] И.Д.Маш, М.И.Родак. ФТТ, 7, 717, 1965.
- [8] A.Abragam, W.G.Proctor. Compt. rend., 246, 2253, 1958.
- [9] A.Abragam, M.Borghini. Progress in Low Temperature Physics, ed. by C.J.Gorter, 4, 384, 1964, Amsterdam; К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер. Пер. с англ. Изд-во "Мир", 1965.

ГАЗОКИНЕТИЧЕСКИЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

В.Д.Борман, Л.Л.Горелик, Б.И.Николаев, В.В.Смицицын

Известно, что коэффициенты переноса газов с несферичными молекулами уменьшаются в магнитном поле [1-6]. Эффект объясняется тем, что ввиду присущей молекулам несферичности прецессия их магнитных моментов в магнитном поле приводит к увеличению их эффективного сечения столкновений. В настоящей заметке приводятся результаты исследования указанного эффекта во взаимно перпендикулярных постоянном и переменном магнитных полях ("скрещенные" поля). Поскольку в таких полях конец вектора момента вращения молекулы описывает пространственную кривую (а не окружность, как в случае постоянного поля) можно было предположить, что в этих полях должно иметь место дополнительное увеличение сечения столкновений. Кроме того, учитывая резонансный характер прецессии в этих полях [7], можно было предположить, что упомянутое увеличение должно иметь максимум при равенстве частоты переменного поля частоте прецессии. Ниже приводятся результаты экспериментов, подтверждающих существование резонансного эффекта на примере теплопроводности кислорода.

На рис.1 приведена принципиальная схема установки.* Датчик представляет собой две сообщающиеся между собой стеклянные камеры (внутренним диаметром 15 мм), в которых натянуты подогреваемые током платиновые нити ϕ 50 мк. Последние являются двумя плечами моста Уитстона. В диагональ моста включен фотооптический усилитель