

КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТИ ВРЕМЕН
СПИН-РЕШЕТОЧНОЙ РЕЛАКСАЦИИ В РУБИНЕ ПРИ ГЕЛИЕВЫХ
ТЕМПЕРАТУРАХ. РЕЛАКСАЦИЯ В НУЛЕВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.А. Маненков, Ю.К. Данилеко

В нескольких работах [1-5] была обнаружена довольно сильная зависимость времен спин-решеточной релаксации T_1 в рубине от концентрации ионов C_{Zn}^{3+} . Однако недавно появилось сообщение [6], в котором авторы пришли к выводу о независимости величин T_1 в кристаллах рубина, выращенных специальным методом из газовой фазы. Кроме того, в некоторых работах [3, 5, 7] была наблюдена аномальная зависимость времени релаксации от температуры в области $1,6 + 4,2^{\circ}\text{K}$ при больших концентрациях C_{Zn}^{3+} , хотя в других исследований этого не было обнаружено.

Учитывая противоречивость отмеченных фактов и имея в виду большую важность вопроса о концентрационной зависимости времени спин-решеточной релаксации для теории парамагнитной релаксации в кристаллах, а также практическую ценность кристаллов рубина в связи с его широким применением в квантовых усилителях и генераторах, мы предприняли тщательные измерения времен релаксации в рубине при гелиевых температурах в широком интервале концентраций ионов C_{Zn}^{3+} от 0,05 до 0,7%.

Исследовались образцы, выращенные методом Вернейля в сильно восстановительной среде с соотношением содержания газов $\text{H}_2:\text{O}_2 \approx 5:1$. Измерения величин T_1 проводились методом импульсного насыщения линий парамагнитного резонанса на частотах $\nu_1 = 11472 \text{ МГц}$ и $\nu_2 = 9400 \text{ МГц}$. Частота ν_1 точно соответствует начальному расщеплению уровней $\pm 1/2$ и $\pm 3/2$ основного состояния электрическим кристаллическим полем ($\delta = 0,3824 \text{ см}^{-1}$). Поэтому измерения на этой частоте в нулевом магнитном поле представляют особый интерес для выяснения природы концентрационной зависимости времен релаксации. В этом случае мы имеем дело с двухуровневой системой и, сле-
414

довательно, отсутствуют процессы спин-спиновой кросс-релаксации, которые зависят от концентрации парамагнитных ионов и существенно влияют на процессы восстановления населеностей в многоуровневых системах.

Исследования на частоте ν_1 перехода $\pm 1/2 \leftrightarrow \pm 3/2$ в нулевом магнитном поле показали, что релаксационные кривые являются однозэкспоненциальными при всех изученных концентрациях и не зависят от длительности насыщающих импульсов. Это подтверждает (см. [2]), что эффекты кросс-релаксации для указанного перехода действительно отсутствовали и наблюдаемые релаксационные кривые соответствовали спин-решеточной релаксации.

На частоте ν_2 изучался переход $1/2 \leftrightarrow -1/2$ при параллельной ориентации оси C кристаллов рубина по отношению к внешнему магнитному полю напряженностью $H = 3360$ э. Наблюдавшиеся на этой частоте при некоторых концентрациях C_{Z}^{3+} двухэкспоненциальные релаксационные кривые соответствовали как спин-решеточной, так и кросс-релаксации. Разделение этих двух процессов производилось путем исследования зависимости формы релаксационных кривых от длительности насыщающих импульсов [2].

Величины T_I^{-1} в рубине для переходов $\pm 1/2 \leftrightarrow \pm 3/2$ в нулевом магнитном поле и $1/2 \leftrightarrow -1/2$ в поле $H = 3360$ э. при различных концентрациях ρ ионов C_{Z}^{3+} , измеренные при температуре $T = -4,2^{\circ}\text{K}$, приведены соответственно на рис. 1 и 2 (f есть отношение числа ионов C_{Z}^{3+} к числу ионов Mg^{2+}). Эти величины хорошо укладываются в зависимость:

$$T_1^{-1}(f) = T_1^{-1}(0) + T_1^{-1}(1) \cdot f^n \quad (I)$$

при значениях параметров: $T_1^{-1}(0) = 9 \text{ сек}^{-1}$, $T_1^{-1}(1) = 2 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$, $n = 2$ для перехода $\pm 1/2 \leftrightarrow \pm 3/2$ и $T_1^{-1}(0) = 9,6 \text{ сек}^{-1}$, $T_1^{-1}(1) = 10^6 \text{ сек}^{-1}$, $n = 1,9$ для перехода $1/2 \leftrightarrow -1/2$. Здесь $T_1^{-1}(0)$ — скорость спин-решеточной релаксации при бесконечном магнитном разбавлении кристалла (т.е. при $f = 0$), а $T_1^{-1}(1)$ соответствует скорости релаксации при $f = 1$. Величина $T_1(0)$ получена экстраполяци-

ей кривой $T_I(f)$ к очень малым концентрациям. Прямые a на рис. I и 2, имеющие тангенс угла наклона 2 и 1,9 соответственно, иллюстрируют хорошее совпадение измеренных величин T_I с формулой (I) во всем изученном интервале концентраций ионов C_{Sr}^{3+} .

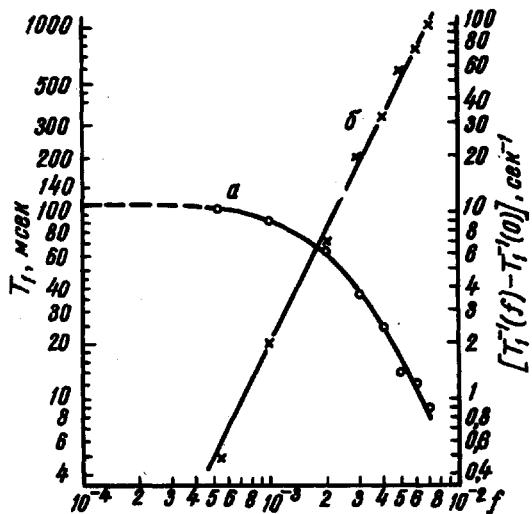


Рис. I. Зависимость времени релаксации T_I от концентрации f (а) и величина $T_I^{-1}(f) - T_I^{-1}(0)$ (б) в рубине для перехода $\pm 1/2 \leftrightarrow \pm 3/2$ в нулевом магнитном поле при $T = 1,6 + 4,2^\circ\text{K}$. О — экспериментальные точки, \times — точки, пересчитанные по экспериментальным значениям

Исследования температурной зависимости величин T_I показали, что в интервале $T = 1,6 + 4,2^\circ\text{K}$ она следует закону $T_I \sim T^{-1}$ при всех изученных концентрациях ионов C_{Sr}^{3+} , не проявляя каких-либо аномалий даже при больших концентрациях.

Полученные нами данные позволяют сделать следующие выводы о спин-решеточной релаксации в рубине. Из температурной зависимости времен релаксации следует, что она осуществляется за счет прямых процессов обмена энергией спин-системы с решеткой. Характер концентрационной зависимости скорости релаксации указывает на эффект

тивность двух различных механизмов спин-фононного взаимодействия. Один из них зависит от концентрации парамагнитных ионов и ответствен за релаксацию при малых концентрациях ($f \leq 0,05\%$). Этим механизмом, очевидно, является механизм Кронига-Ван Флека. Расчеты [8] подтверждают это заключение. Второй механизм, приводящий к

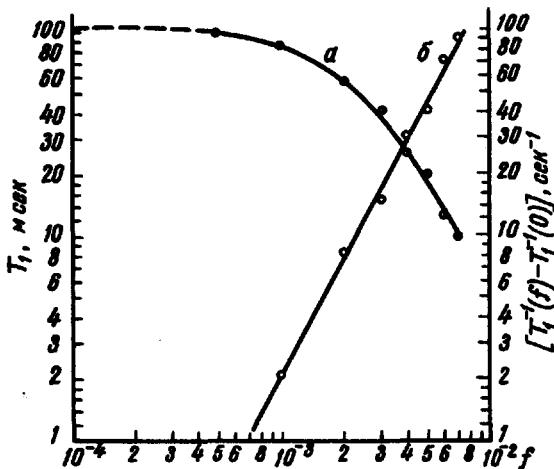


Рис. 2. Зависимость $T_1(f)$ (а) и $T_1^{-1}(f) - T_1^{-1}(0)$ (б) в рубине для перехода $1/2 \leftrightarrow -1/2$ при $\theta = 0^\circ$ в магнитном поле $H = 3360$ э, при $T = 4,2^\circ\text{K}$. ◉ — экспериментальные точки, ○ — точки, пересчитанные по экспериментальным значениям

концентрационной зависимости времени релаксации, становится доминирующим при $f \gtrsim 0,3\%$. Природа этого механизма, вероятно, связана с взаимодействиями между ионами Cr^{3+} . Рассмотренные [9-11] различные механизмы (релаксация через "обменные пары", релаксация посредством модуляции косвенных обменных взаимодействий) в принципе указывают на концентрационную зависимость скорости спин-решеточной релаксации, однако не дают наблюдаемого (примерно квадратичного) характера такой зависимости. Для установления адекватного механизма, ответственного за наблюдаемую концентрационную зави-

смость, необходимы дальнейшие теоретические исследования.

Авторы благодарны А.А.Поповой за предоставление кристаллов рубина.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
7 сентября 1965 г.

Литература

- [1] А.А.Маненков, А.М.Прохоров. ЖЭТФ, 38, 729, 1960.
- [2] А.А.Маненков, А.М.Прохоров. ЖЭТФ, 42, 75, 1962.
- [3] J.Misida. J.Phys. Soc. Japan, 12, 1519, 1962.
- [4] J.C.Gill. Proc. Phys. Soc., 79, 58, 1962.
- [5] S.Feng, N.Bloembergen. Phys. Rev., 130, 531, 1963.
- [6] K.J.Standley, R.A.Vaughan. Phys. Lett., 10, 33, 1964.
- [7] J.H.Pace, D.E.Sampson, J.S.Thorp. Proc. Phys. Soc., 76, 697, 1960.
- [8] P.L.Donoho. Phys. Rev., 133, A 1080, 1964.
- [9] J.H.Van Vleck. Advances in Quantum Electronics, p. 388, Columbia Univ. Press, N.-Y ., 1961.
- [10] N.Bloembergen, P.S.Pershant. Там же, p.373.
- [II] С.А.Альтшуллер, ЖЭТФ, 43, 2318, 1962.