

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ СПИНОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПРИ НЕРЕЗОНАНСНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ*В.А.Голенищев-Кутузов, С.А.Мигачев*

Обнаружено инвертирование ядерной спин-системы ^{27}Al в рубине при стационарном нерезонансном акустическом насыщении на частотах 5 – 70 МГц. Показано, что взаимодействие ультразвука с ядерной спин-системой происходит посредством нерезонансного (релаксационного) поглощения энергии ультразвуковых волн спин-системой ионов Cr^{3+} .

Впервые обнаружено инвертирование ядерной спин-системы в стационарном режиме при нерезонансном с частотами спиновых переходов, акустическом воздействии. Показано, что взаимодействие ультразвука с ядерной спин-системой происходит посредством нерезонансного (релаксационного) поглощения энергии ультразвуковых волн спин-спиновой системой парамагнитных ионов.

Обычно отрицательные спиновые температуры ядерных систем достигаются за счет взаимодействия двух спиновых систем [1]. При непрерывном электромагнитном или акустическом воздействии на данную ядерную спин-систему наблюдалось только уменьшение разности заселенностей ее ядерных зеемановских уровней [2].

В данной работе сообщается о возникновении инверсии заселенностей всех ядерных зеемановских уровней ^{27}Al в рубине при непрерывном нерезонансном ультразвуковом возбуждении.

Эксперименты проводились на образцах с концентрациями ионов $\text{Cr}^{3+} \sim 0,01 - 0,05$ ат.%, при $T \sim 1,6 \div 4,2\text{K}$. Сигналы ЯМР наблюдались по автодинной схеме с помощью катушки, установленной вокруг цилиндрического образца. Оптическая ось S кристалла была перпендикулярна образующей цилиндра, угол θ между направлением оси S и постоянного внешнего магнитного поля H_0 мог варьироваться. Продольные акустические колебания возбуждались в образце кварцевым пьезопре-

образователем, приклеиваемым к одному из плоскопараллельных торцов цилиндра. Направление распространения ультразвуковых волн совпадало с направлением радиочастотного поля H_1 и было перпендикулярно направлению постоянного поля H_0 . Амплитуда деформации, создаваемой в образце, контролировалась емкостным методом [3]. Для получения максимальных значений амплитуды деформации частота ультразвука выбиралась соответствующей условию механического резонанса образца. Напряженность H_1 выбиралась такой, чтобы избежать насыщения сигналов ЯМР. Сигналы ЯМР от всех переходов ($l = 5/2$) наблюдались при фиксированном значении $H_0 \sim 0,8 T$ посредством свиппирования частоты автодинного генератора. При этом частоты переходов с $\Delta m = \pm 1$ находились в диапазоне 8,0 – 9,6 МГц, а частоты переходов с $\Delta m = \pm 2$ в диапазоне 16 – 20 МГц.

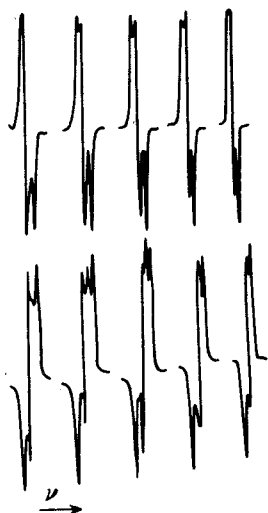


Рис. 1. Спектр ЯМР ^{27}Al в $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$ (0,01 ат.%). Вверху – в отсутствие накачки. Внизу – при нерезонансном акустическом воздействии

При $T \sim 1,6\text{K}$ и относительной деформации $\epsilon_0 \sim 5 \cdot 10^{-5}$ в образце с $c \sim 0,01$ ат. % во всем исследованном диапазоне частот ультразвуковой накачки 4 ÷ 70 МГц наблюдались сигналы ЯМР, соответствующие инверсной заселенности для всех спиновых переходов (рис. 1). При повышении T до 2,2K эффект инверсии пропадал даже при увеличении ϵ_0 до $2 \cdot 10^{-4}$. Время установления равновесия в инвертированной системе при включении накачки зависело от уровня подаваемой мощности и различалось на всех переходах. Скорость установления равновесия близка для ЯМР переходов $\pm 5/2 \leftrightarrow \pm 3/2$ и $\pm 3/2 \leftrightarrow \pm 1/2$ (рис. 2). Время установления равновесия после выключения накачки зависело от длительности и мощности акустического воздействия. В том случае, когда они были достаточны для установления динамического равновесия, восстановление спин-системы после снятия накачки было одинаковым на всех ЯМР переходах. В случае, когда динамическое равновесие в спин-системе не достигалось, т. е. акустическое воздействие было недостаточным, характер восстановления качественно совпадал на всех ЯМР переходах, но оно происходило с различными скоростями, причем наиболее быстро устанавливалось равновесие на переходе $1/2 \leftrightarrow -1/2$, а наиболее медленно на переходах $\pm 5/2 \leftrightarrow \pm 3/2$.

Эффект нерезонансной инверсии обладает угловой анизотропией. С ростом θ скорость установления и коэффициент инверсии при данном значении ϵ_0 падают (рис. 3). С увеличением θ до 25° инверсия уже не наблюдалась даже при $\epsilon_0 \geq 2 \cdot 10^{-4}$.

При уменьшении ϵ_0 до $2 \cdot 10^{-6}$ эффект пропадал, однако на резонансных частотах для ЯМР переходов с $\Delta m = 2$ и $\Delta m = 1$ наблюдалось изменение заселенностей ядерных зеемановских уровней, качественно описываемое существующими теориями [2]. В образцах с концентрацией ионов Sr^{3+} 0,03 ат. % эффект нерезонансной инверсии уменьшался, и при $c \sim 0,05$ ат. % наблюдалось только нерезонансное изменение заселенностей, которое уже не обладало анизотропией. О наблюдении подобного эффекта сообщалось ранее [4].

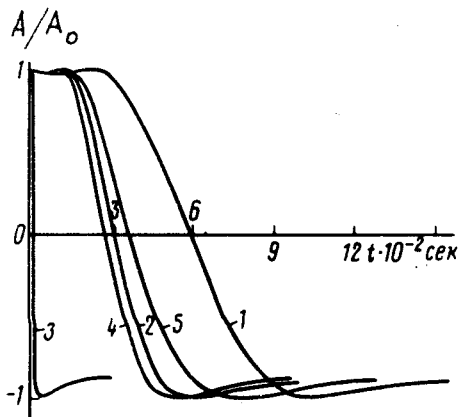


Рис. 2. Характер изменения интенсивностей A/A_0 сигналов ЯМР при включении акустической накачки (нумерация переходов: 1 — $-5/2 \leftrightarrow -3/2$, 2 — $-3/2 \leftrightarrow -1/2$, 3 — $-1/2 \leftrightarrow +1/2$, 4 — $+1/2 \leftrightarrow +3/2$, 5 — $+3/2 \leftrightarrow +5/2$)

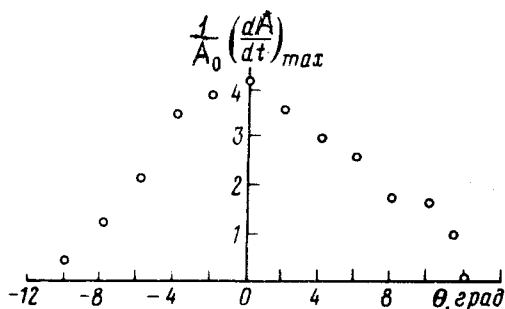


Рис. 3. Угловая анизотропия скорости изменения интенсивности для центрального перехода ЯМР при акустической накачке

Следует отметить, что попытки обнаружить подобный эффект при электромагнитном насыщении не дали результатов. При поляризациях поля $H_1 \parallel H_0$ и $H_1 \perp H_0$ на контуре ЯМР до 30 В не было обнаружено заметного изменения интенсивностей сигналов ЯМР при нерезонансной накачке.

Возникновение нерезонансной инверсии невозможно объяснить только за счет релаксационных процессов в ядерной спин-системе ^{27}Al , поскольку имеющиеся к настоящему моменту факты показывают, что инверсия всех ядерных переходов в стационарном режиме происходит только за счет изменений в электронной спин-системе [1]. Хотя сейчас весьма затруднительно дать строгое объяснение обнаруженным экспериментальным фактам, но опираясь на имеющиеся данные и модели [5 -- 7], можно предположить следующий механизм.

Возникновение инверсии можно представить как двухступенчатый процесс. На первом этапе происходит нерезонансное (релаксационное) поглощение энергии звуковой волны диполь-дипольной системой электронных спинов Cr^{3+} , которое, как показано в [5], имеет место при $\omega_a \sim \omega_{\text{CC}}$, где ω_{CC} — средняя частота спин-спиновых взаимодействий. При этом ультразвуковое поле модулирует расстояния между электронными спинами. Это приводит к появлению инверсной температуры спин-спиновой системы ионов Cr^{3+} , вызывающему инверсию ядерной зеемановской системы ^{27}Al за счет теплового контакта между системами [8]. Именно в модуляции расстояний заключается принципиальное отличие ультразвукового воздействия от электромагнитного. В пользу предложенного механизма говорит упоминавшийся выше факт отсутствия эффекта нерезонансной инверсии при электромагнитном насыщении.

Авторы благодарны В.А.Ацаркину и Л.Л.Буишвили за ряд полезных обсуждений.

Казанский
физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22 июня 1980 г.
После переработки
2 октября 1980 г.

Литература

- [1] В.А.Ацаркин. УФН, 126, 3, 1978.
- [2] В.А.Голенищев-Кутузов, В.В.Самарцев, Н.К.Соловаров, Б.М.Хабибуллин. Магнитная квантовая акустика. М., изд. Наука, 1977.
- [3] Х.Г.Богданова, Ю.В. Владимирцев. В. А.Голенищев-Кутузов, Н.А.Шамуков. ПТЭ, №5, 166, 1969.
- [4] И.И.Садыков. VII Всесоюзное совещание по квантовой акустике. Тезисы докладов. Харьков. 1972, стр. 157.
- [5] Н.Г. Колоскова, У.Х.Копвиллем, Б.И.Кочелаев. Сб. Физические проблемы спектроскопии. М., изд. Наука, 2, 91, 1963.
- [6] Ю.В.Владимирцев, В.А.Голенищев-Кутузов, У.Х.Копвиллем. ФТТ, 9, 361, 1967.
- [7] Ш.Ф.Муртазин. ФТТ, 7, 1690, 1965.
- [8] Л.Л.Буишвили. ЖЭТФ, 49, 1868, 1965.