

НАБЛЮДЕНИЕ ГЕКСАДЕКАПОЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ ЯДЕР Al^{27} В КОРУНДЕ

В.В. Анисимов, В.Л. Комашня

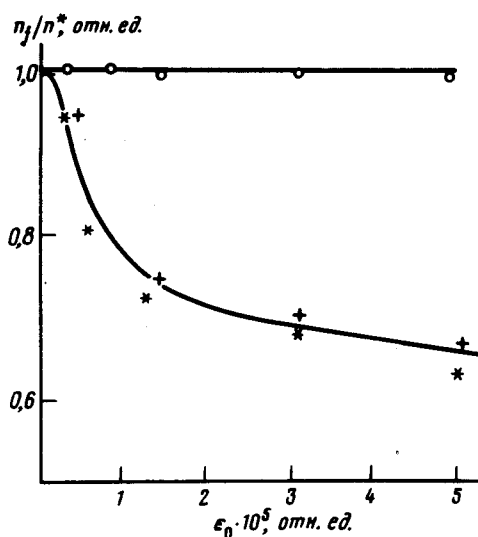
Методом акустического насыщения впервые наблюдались индуцированные звуком разрешенные гексадекапольные переходы (ГП) $|\Delta m| = 3$ между уровнями магнитного резонанса (МР) ядер Al^{27} в особо чистом монокристалле лейкосапфира.

Ядра со спином $I > 3/2$ могут обладать электрическим мультипольным моментом четвертого порядка. В ионном кристалле энергия взаимодействия таких ядер с окружением через гексадекапольный момент описывается гамильтонианом [1]:

$$H_{16} = \sum_{n=-4}^4 M_{16}^n E_{16}^{-n} \quad (1)$$

(M_{16}^n — компоненты оператора ядерного электрического гексадекапольного момента, E_{16}^{-n} — параметры электрического поля на ядре), диагональные матричные элементы которого определяют взаимодействие ядерного мультипольного момента M_{16} со статическим полем кристаллической решетки, а недиагональные — ядерную гексадекапольную спин-фононную связь (ЯГСФС). Анализ выражений (1) показывает, что ЯГСФС значительно слабее энергий магнитного дипольного и электрического квадрупольного взаимодействий, и хотя теоретически разрешены ГП $|\Delta m| = 1, 2, 3, 4$, практическое наблюдение одинарных и двойных ГП на фоне интенсивных дипольных ($|\Delta m| = 1$) и квадрупольных ($|\Delta m| = -1, 2$) переходов не представляется возможным. По этой причине в экспериментах акустического ядерного резонанса (АЯР) целесообразно изучать ГП $|\Delta m| = 3, 4$ (центральный переход $3/2 \leftrightarrow -3/2$ запрещен).

В работе [2] была предпринята попытка обнаружить ГП. Авторы наблюдали индуцированные звуком $|\Delta m| = 3$ переходы между уровнями МР ядер In^{115} в монокристалле InAs . Этот экспериментальный факт они объяснили существованием ГП ядер In^{115} ($I = 9/2$). Однако, такая интерпретация наблюдаемого насыщения некорректна. При анализе возможных причин $|\Delta m| = 3$ переходов необходимо учитывать запрещенные переходы за счет перемешивания спиновых состояний [3]. В ряде кристаллов вероятность таких квадрупольных переходов сравнима с вероятностью разрешенных ГП. Вообще, идентификация ГП в кубических кристаллах сопряжена со значительными экспериментальными трудностями. Более благоприятны некубические кристаллы такие как Al_2O_3 , в которых расщепленный зееманов спектр ядер Al^{27} ($I = 5/2$) позволяет возбуждать переходы между каждой парой уровней в отдельности, а продолжительное время спин-решеточной релаксации — проводить исследования при комнатных температурах.



Экспериментальные зависимости изменения интенсивностей различных компонент ЯМР (пропорциональных разностям заселенностей смежных пар уровней) ядер Al^{27} в лейкосапфире от амплитуды деформации при акустическом насыщении гексадекапольных переходов $5/2 \leftrightarrow -1/2$: + — линия $1/2 \leftrightarrow -1/2$; • — линия $3/2 \leftrightarrow 1/2$; * — линия $5/2 \leftrightarrow 3/2$

В настоящей работе сообщается о наблюдении акустического ядерного гексадекапольного резонанса Al^{27} в монокристалле Al_2O_3 особой чистоты (концентрация примесей менее $10^{-5}\%$). Эксперимент проводился при комнатной температуре на импульсной установке АЯР [4] путем регистрации амплитуды сигнала прецессии ядер Al^{27} до и после воздействия импульса насыщающего поля. Образец имел форму параллелепипеда $10 \times 10 \times 40$ мм³. Тригональная ось C_3 кристалла была сориентирована в плоскости торца, поэтому вращением образца вокруг своей оси в постоянном магнитном поле H_0 можно было устанавливать произвольное расщепление линий спектра МР. Характеристические времена квадрупольной спин-решеточной релаксации T_{1k} , измеренные с точностью $\pm 5\%$ для спутников ($5/2 \leftrightarrow 3/2$, $3/2 \leftrightarrow 1/2$) и центрального перехода при максимальном расщеплении уровней ($C_3 \parallel H_0$) составляли 85, 100, 115 сек, соответственно. Акустическое насыщение переходов $5/2 \leftrightarrow -1/2$ и $3/2 \leftrightarrow -3/2$ ядер Al^{27} производилось на частотах 9,5 и 10,5 МГц с помощью резонансных кварцевых пластин X-среза, приклеиваемых к торцу образца. Оптическая плоскопараллельность торцов (ла-

зерная обработка) обеспечивала установление в образце одномодовой стоячей ультразвуковой волны с относительной деформацией $\epsilon \leq 5 \cdot 10^{-5}$. Постоянство амплитуды колебаний контролировалось электромагнитным методом [5].

Результаты, полученные при возбуждении перехода $5/2 \leftrightarrow -1/2$ для случая $C_3 \parallel H_0$ представлены на рисунке в виде зависимостей относительных разностей заселенностей различных пар смежных уровней n_j/n^* от амплитуды деформации в ультразвуковой волне. При аналогичной ориентации образца и возбуждении ультразвуковых переходов $3/2 \leftrightarrow -3/2$ в пределах погрешности измерений ($\pm 5\%$) никакого изменения n_j/n^* не наблюдалось. В процессе эксперимента с особой тщательностью исключалось влияние различных паразитных электромагнитных наводок.

Анализируя результаты по методике, описанной в работе [6], нетрудно определить значения вероятностей вынужденных акустических $|\Delta m| = 3$ переходов при разных ϵ . Так при $\epsilon = 5 \cdot 10^{-5}$ получены значения $W_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ для перехода $5/2 \leftrightarrow -1/2$ и $W_2 < 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$ для перехода $3/2 \leftrightarrow -3/2$. Как известно, ГП $|\Delta m| = 3$ между уровнями $\pm 3/2$ запрещены, следовательно, различие в вероятностях исследованных переходов может быть обусловлено ЯГСФС. Оценим эффективности других механизмов межъядерных взаимодействий, способных вызывать $|\Delta m| = 3$ переходы. Спин-спиновые взаимодействия и взаимодействия ядер с дефектами решетки приводят к тому, что волновая функция Ψ_m каждого уровня m содержит примесь спиновых состояний с другими m' , что делает возможным запрещенные переходы. Экспериментальные значения вероятностей запрещенных квадрупольных переходов определялись по данным акустического возбуждения перехода $1/2 \leftrightarrow -1/2$ и составили величину менее 10^{-5} сек^{-1} при $\epsilon = 5 \cdot 10^{-5}$. Против участия квадруполь-квадрупольных взаимодействий соседних ядер Al^{27} в процессе акустического насыщения свидетельствует наблюдаемое различие вероятностей индуцируемых переходов, а магнитные октупольные переходы маловероятны, так как даже дипольные акустические переходы заметны на пределе чувствительности методов АЯР [7].

Аналогичные исследования в слабоокрашенном рубине ($10^{-3}\% Cr^{3+}$) показали отсутствие какого-либо отличия в насыщении между переходами $5/2 \leftrightarrow -1/2$ и $3/2 \leftrightarrow -3/2$.

Таким образом, проведенное исследование позволило впервые идентифицировать ядерные гексадекапольные переходы и тем самым доказать существование у ядер Al^{27} электрического гексадекапольного момента.

В заключение авторы выражают благодарность проф. В.А.Шутилову за содействие в работе и полезные обсуждения, а также Б.Г.Иванову за предоставленные кристаллы и помощь в подготовке их к экспериментам.

Ленинградский
электротехнический институт
им. В.И.Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию
3 сентября 1979 г.
3 декабря 1979 г.

Литература

[1] R.J.Mahler. Phys. Rev., 152, 325, 1966.

- [2] R.J.Machler, L.W.James, W.H.Tantilla. Phys. Rev. Lett., 16, 259, 1966.
- [3] А.Р.Кессель. Ядерный акустический резонанс, М., изд. Наука, 1969 г., 215 стр.
- [4] В.А.Шутилов, Г.Л.Антокольский. Сб. ЯМР, вып. 2, ЛГУ, 1968.
- [5] И.Г.Михайлов, В.А.Шутилов. Акуст. ж., 10, 98, 1964.
- [6] В.Л.Комашня, В.В.Анисимов, А.М.Белоногов. ФТТ, 21, 1569, 1979.
- [7] В.А.Шутилов, Г.Л.Антокольский. ФТТ, 9, 1231, 1967.
-