

РОЛЬ НЕКОГЕРЕНТНЫХ ФОНОНОВ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА С ЯДЕРНОЙ СПИН-СИСТЕМОЙ

В.А.Голенищев-Кутузов, И.И.Садыков, Е.П.Хаймович

Исследованы прямой акустический магнитный резонанс и акустическое насыщение ЯМР в In Sb и Cs J . Впервые обнаружена анизотропия акустического насыщения ЯМР. Показана возможность корректного определения констант спин-фононной связи и времени жизни некогерентных фононов.

Согласно современным представлениям о механизмах взаимодействия ультразвука со спин-системой должна наблюдаться определенная угловая зависимость как интенсивности прямого акустического ядерного магнитного резонанса (ЯАР), так и фактора акустического насыщения ЯМР (АНЯМР) [1]. Однако во всех предыдущих работах по АНЯМР никакой угловой зависимости не было обнаружено [2, 3], тогда как результаты по ЯАР дают ожидаемую зависимость. Более того, для объяснения отсутствия угловой зависимости был предложен так называемый "дефектный" механизм [4].

В настоящей работе сообщается о первом наблюдении анизотропии АНЯМР в двух типах кристаллов InSb и CsJ , дается интерпретация полученных результатов, отмечается возможность корректного определения констант спин-фононной связи и времени жизни фононов по данным АНЯМР.

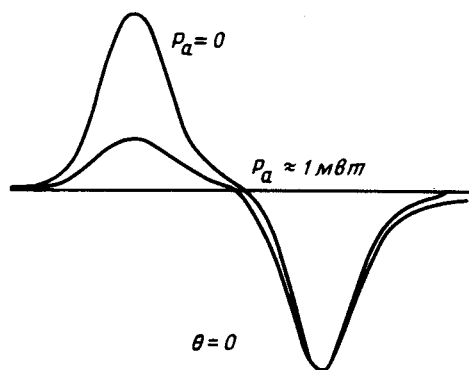


Рис. 1. Запись сигнала ЯМР ^{115}In при двух значениях вводимой в образец акустической мощности: $T_1 = 0,8$ сек (77К), $\nu_a = 10$ Мгц, $\nu_d = 5,03$ Мгц, $\Delta \nu_M = 30$ кгц

Эксперименты проводились на универсальном спектрометре, позволяющем исследовать на одном и том же образце как ЯАР, так и акустическое насыщение ЯМР в стационарном режиме в диапазоне частот $10 \div 20$ Мгц и при температурах $4,2 \div 300$ К [5]. Для измерения крайне слабого ЯАР поглощения $\alpha_n \sim 10^{-7} \div 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ образцы изготовлялись с точностью обработки торцов на плоскопараллельность 2 мкм/см , что

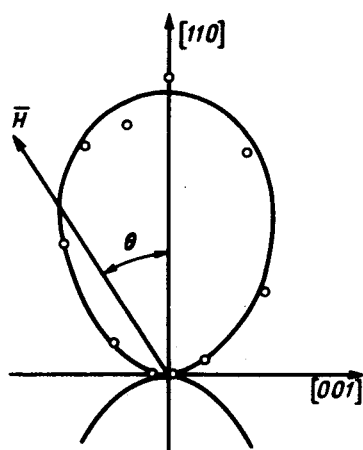


Рис. 2. Угловая зависимость ЯАР ^{115}In : направление распространения и поляризации ультразвука $[1\bar{1}0]$ и $[110]$ соответственно

позволило получить акустическую добротность $Q \sim 3 + 5 \cdot 10^4$. Это соответствует поглощению звука $\alpha_0 \sim 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Наряду с этим для повышения чувствительности и снижения уровня помех использовалась оригинальная методика [5]. Применяя модуляцию магнитного поля током прямоугольной формы, удалось одновременно записывать насыщенную и ненасыщенную ультразвуком линии ЯМР, , когда частоты акустичес-

кой накачки ν_a , датчика ЯМР ν_d и модуляции $\Delta \nu_M$ связаны соотношением $\nu_a/2 - \nu_d = \pm \Delta \nu_M$ (рис. 1). На рис. 2 представлены экспериментальные точки и ожидаемая теоретическая угловая зависимость ЯАР ^{115}In для переходов $\Delta m = \pm 2$ ($\alpha_n \sim \cos^2 \theta$). Факторы насыщения ЯАР (A/A_0) в зависимости от вводимой в образец акустической мощности для двух ориентаций образца ($Q = 5,5 \cdot 10^4$), соответствующих максимальному ($\theta = 0$) и минимальному ($\theta = \pi/2$) значениям поглощения ЯАР приведены на рис. 3. При уменьшении добротности ($Q = 10^3$) анизотропия исчезает (рис. 3). По данным рис. 2 и рис. 3 видно, что имеется определенная корреляция угловой зависимости ЯАР и АНЯМР.

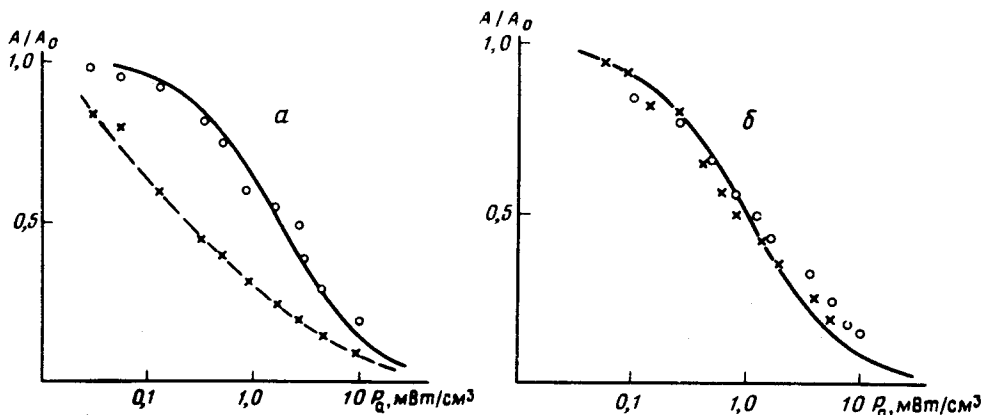


Рис. 3. Факторы насыщения ЯАР при двух значениях акустической добротности образца: $a - Q = 5,5 \cdot 10^4$ и $b - Q = 10^3$. Точки (X) и (O) соответствуют максимальному и минимальному поглощению ЯАР. Сплошная линия – теоретическая зависимость $A/A_0 = (1 + W_H^* T_1)^{-1}$

Полученные результаты можно объяснить, если учесть, что в реальных кристаллах на указанных частотах имеет место довольно сильное рассеяние энергии ультразвука пучка из-за дифракционных эффектов, несовершенства кристалла и неточности механической обработки образца [6]. Следовательно, в резонансном насыщении спин-системы кроме когерентных фононов в пучке, дающих ожидаемую угловую зависимость, участвуют некогерентные (диффузно рассеянные) фононы, приводящие к частичному или преобладающему изотропному насыщению ЯАР. Причем из наших данных следует, что плотности некогерентных и когерентных фононов соизмеримы даже при максимально достижимой добротности образца. Отметим, что на основе приведенных рассуждений легко объяснить факт полного насыщения всей спин-системы даже при относительно малом объеме пучка, обнаруженного в работе [7]. С учетом вероятностей акустических переходов, обусловлен-

ных как когерентными (W_K), так и некогерентными (W_H) фононами, и учитывая распределения амплитуды деформации вдоль пучка [2], можно написать

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\eta}{\sqrt{(1 + W'_H T_1)(1 + W'_K T_1 + W''_H T_1)}} + \frac{1 - \eta}{1 + W'_H T_1}, \quad (1)$$

где $\eta = V_n/V_0$, V_n и V_0 — объемы пучка и образца соответственно, T_1 — время спин-решеточной релаксации. Для вычисления констант спин-фононной связи S_{ij} в ЯАР и АНЯМР необходимо знать вероятность W_K . Ее можно получить из выражения (1), если предварительно вычислить W_H при той же вводимой мощности, когда $W_K = 0$ ($\theta = \pi/2$). Оценка констант спин-решеточной связи для ядер ^{115}In на основе измерений обоими методами (АЯР и АНЯМР) дала вполне совпадающие результаты.

Метод АНЯМР так же позволил оценить время жизни некогерентных фононов. Можно показать, что отношение рассеянной мощности (P_H) к вводимой (P_a) мощности $P_H/P_a = 1 - \tau_K/\tau_\Phi$, где τ_K — время распада пучка, τ_Φ — время жизни некогерентных фононов. Отсюда средняя энергия некогерентных фононов в образце $\langle E \rangle = \tau_\Phi P_H = (\tau_\Phi - \tau_K) P_a$. Используя значения P_a , соответствующие одному и тому же уровню насыщения при разных добротностях $Q = 5,5 \cdot 10^4$ и $Q = 10^3$ можно найти τ_Φ , которое для InSb оказалось равным $4 \cdot 10^{-3}$ сек.

Казанский
физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22 мая 1978 г.

Литература

- [1] Д.И.Болеф. Физическая акустика, 4А, под ред. У.Мэзона, М., изд. Мир, 1969 г.
- [2] E.F.Taylor, N.Blombergen. Phys. Rev., 113, 431, 1959.
- [3] Г.Л.Антокольский, Л.Н.Ферштат, В.А.Шутилов. ФТТ, 15, , 715, 1973.
- [4] Г.Л.Антокольский, Е.В.Черная, В.А.Шутилов. ФТТ, 15, 3250, 1973.
- [5] И.И.Садыков. ПТЭ, №1, 129, 1978; ПТЭ (1978, в печати)
- [6] Р. Труэл Ч.Эльбаум, Б. Чик. Ультразвуковые методы в физике твердого тела, М., изд.Мир, 1972.
- [7] T.Ohno, T.Kanashiro, T.Taki, M.Saton. J. Phys. Soc. Japan, 35, 305, 1973.