

## ДВОЙНОЙ АКУСТО-МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС $\text{Cr}^{53}$ – $\text{Al}^{27}$ В РУБИНЕ

*Ю.В.Владимирцев, В.А.Голенищев-Кутузов,  
У.Х.Копеллем, Н.А.Шамухов*

Впервые для детектирования акустического ЯМР (АЯМР) от малого количества ядер применена другая спин-система с большим количеством ядер ( $\text{Cr}^{53}$  в  $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$ ). Таким путем достигнута рекордная чувствительность по измерению коэффициента поглощения звука  $\sigma \sim 10^{-10} \text{ см}^{-1}$ , обусловленного АЯМР. Впервые обнаружен АЯМР на ядре парамагнитного иона и оценен коэффициент усиления спин-фононного взаимодействия, обусловленного связью между ядерным спином и электронной оболочкой парамагнитного иона.

Идея опыта состоит в том, что насыщение звуком системы  $\text{Cr}^{53}$  вызывает удлинение времени продольной релаксации ядер  $\text{Al}^{27}$ , которых в образце в  $10^3$  раз больше, чем ядер  $\text{Cr}^{53}$ . Таким образом сигнал АЯМР на  $\text{Cr}^{53}$  обнаруживается по убыванию интенсивности обычного ЯМР от  $\text{Al}^{27}$ . При этом сигнал ЯМР на  $\text{Al}^{27}$  убывает не потому, что энергия ультразвука попадает в спин-систему  $\text{Al}^{27}$ , а вследствие перекрывания ультразвуком канала продольной релаксации ядер  $\text{Al}^{27}$  через ионы  $\text{Cr}^{3+}$ . Этим каналом служит, по-видимому, резервуар магнитных диполь-дипольных взаимодействий  $\text{Cr}^{3+} \leftrightarrow \text{Cr}^{3+}$  [1]. АЯМР на  $\text{Cr}^{53}$  приводит к поднятию температуры диполь-дипольной системы [1] и резкому удлинению времени продольной релаксации ядер  $\text{Al}^{27}$ , а тем самым

убыванию сигнала ЯМР ядер  $Al^{27}$ . Из-за отношения частот ЯМР ядра  $Cr^{53}$  и средней частоты диполь-дипольных взаимодействий  $Cr^{3+} \leftrightarrow Cr^{3+}$  происходит дальнейшее возрастание чувствительности измерения  $\sigma$  в  $[\nu(Cr^{53})/\nu(Cr^{3+} \leftrightarrow Cr^{3+})]^2 = 10^2$  раз и всего с учетом концентрации в  $10^5$  раз.

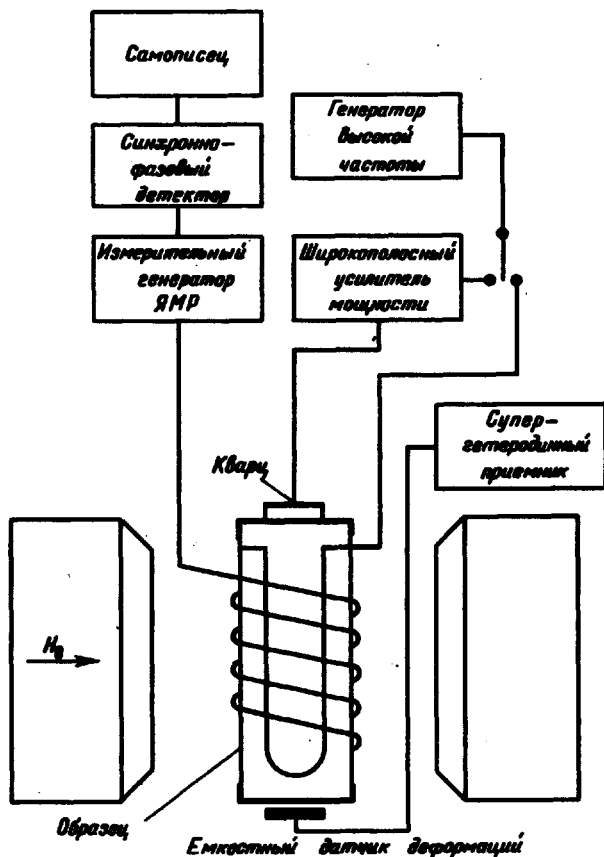


Рис. 1. Блок-схема спектрометра двойного резонанса

Двойной акусто-магнитный ядерно-ядерный резонанс наблюдался при  $4,2^\circ K$  в отшлифованном лазерном монокристалле  $Al_2O_3$ , содержащем 0,1 ат. % ионов  $Cr^{3+}$ . Измерительный генератор ЯМР настраивался на частоту  $3570 \text{ кГц}$ . Значение статического магнитного поля ( $H_0 = 3210 \text{ Гс}$ ), параллельного оптической оси  $C_3$  кристалла, устанавливалось таким, чтобы с синхронного детектора получить максимальный сигнал, соответствующий максимуму первой производной линии ЯМР ядра  $Al^{27}$  (переход ядерного спина  $|1/2\rangle \leftrightarrow |3/2\rangle$  с частотой  $3570 \text{ кГц}$ ). Величина этого сигнала  $I_0$  указана на рис. 2. В дальнейшем при по-

стоянном значении поля  $H_0$  наблюдалось изменение величины сигнала в максимуме первой производной линии ЯМР ядер  $Al^{27}$  под действием дополнительного переменного магнитного поля, перпендикулярного  $H_0$  (переключатель генератора высокой частоты в положении А, рис. 1) или ультразвукового поля (переключатель в положении В). На рис. 2 изображены кривые зависимости величины сигнала в максимуме первой производной соответственно от частоты переменного магнитного поля

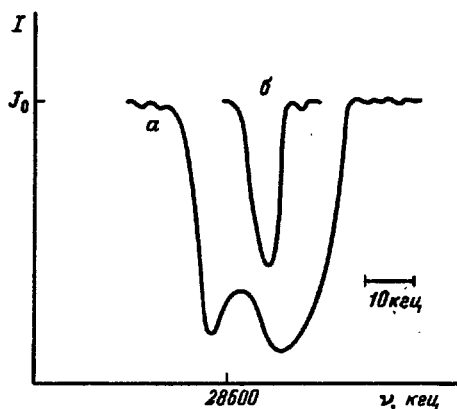


Рис. 2. *a* – сигнал ЯМР от ядер  $Cr^{53}$ , *б* – сигнал АЯМР от ядер  $Cr^{53}$ . Скорость развертки возбуждающего электромагнитного поля 340  $\mu\text{с}/\text{сек}$

(*a*) и ультразвука (*б*). Кривая (*a*) соответствует переходу  $|-1/2\rangle \leftrightarrow |-3/2\rangle$  ядра  $Cr^{53}$  (распространенность 10%), относящемуся к состоянию спина иона  $Cr^{3+} |1/2\rangle$ . Она получена при амплитуде переменного магнитного поля  $H \sim 0,01 \text{ эс}$ . Следует отметить, что частота этого перехода  $\nu_0 = 28610 \text{ кГц}$  практически не зависит от величины  $H_0$ , а ширина на полуинтенсивности  $\Delta\nu_{1/2} = 4 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}$ . Это качественно согласуется с результатами работ [2, 3]. Кривая (*б*) соответствует тому же переходу ядра  $Cr^{53}$ , но уже при звуковом насыщении.

Ширина линии АЯМР  $Cr^{53}$ , снятой описанным способом, оказалась порядка  $\Delta\nu_p \sim 6 \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1}$  (рис. 2, *б*).

Физическая причина узости линии АЯМР ядра  $Cr^{53}$  по отношению к ширине линии обычного ЯМР ядра  $Cr^{53}$  не вполне ясна. Возможно, что она вызвана движением ядер под действием звуковых колебаний, что может привести к усреднению неоднородностей внутреннего поля. Пусть операторы спин-фононного и спин-фотонного взаимодействия для  $Cr^{53}$  характеризуются соответственно константами  $\epsilon G$  и  $g\beta H$ , где  $\epsilon$ ,  $G$ ,  $g$  и  $\beta$  – соответственно относительная переменная деформация, тензор

спин-фононного взаимодействия,  $g$ -фактор и ядерный магнетон. При равенстве величины звукового и магнитного насыщения сигнала ЯМР  $Al^{27}$  получаем:  $G = kgBH\epsilon^{-1}$ , где  $k$  — коэффициент усиления поля  $H$  на ядре  $Cr^{53}$  из-за поляризации электронной оболочки  $Cr^{3+}$  [4]. В нашем случае  $k \sim 10$  и  $\epsilon \sim 10^{-6}$ , следовательно  $10^{-18}$  эр $\epsilon$  (единиц деформации) $^{-1}$ . При этом коэффициент поглощения звука, обусловленный ядрами  $Cr^{53}$ , составит всего  $\sigma \sim \pi \Delta n \nu_0 \Delta \nu_1^{-1} G^2 \rho^{-1} \nu^2 \hbar^{-1} = 10^{-10}$  см $^{-1}$ , где  $\Delta n$  — разность заселенностей,  $\nu = 10^6$  см/сек — скорость звука,  $\rho = 4$  г.см $^{-3}$  плотность кристалла. Значение  $G$  в  $10^2$  раз превышает обычное значение тензора спин-фононного взаимодействия ядра в диамагнитном кристалле. Эффект усиления АЯМР из-за контактной связи был предсказан теоретически в работе [5].

Для экранировки образца и контура ЯМР от проникновения высокочастотного напряжения, возбуждающего кварц, концы образца металлизировались с учетом глубины скин-слоя и заключались в экраны. При замене кварца диэлектриком сигнал ЯМР  $Al^{27}$  не изменялся при подаче электромагнитного возбуждения.

Дополнительным доказательством того, что обнаруженный эффект действительно вызван звуком, является резкое различие в ширине линий АЯМР  $Cr^{53}$  при электромагнитном и звуковом возбуждении.

Казанский  
физико-технический институт  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
1 ноября 1968 г.

### Литература

- [1] У.Х.Копвиллем. Диссертация, Казанский университет, 1958, стр. 22 — 23.
- [2] J. Lambe, N. Laurance, E. C. Mc. Irvine, R. W. Terhune. Phys. Rev., 122, 1161, 1961.
- [3] H. Joshioka. J. Phys. Soc. Japan, 20, 623, 1965.
- [4] К.А.Валиев. Уч.записки Казанского университета. 117, кн.9, 149, 1957.
- [5] Ш.Ш.Башкиров, У.Х.Копвиллем. V Всесоюзное совещание по теории полупроводников, Баку, 1962; Тезисы докладов стр. 9.