

ПРЯМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЯДЕРНОГО СПИНОВОГО РЕЗОНАНСА В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

И.И. Садыков, Е.П. Хаймович

Впервые измерено очень малое изменение диэлектрических потерь ($\text{tg} \delta \approx 10^{-9}$), вызванное резонансным поглощением энергии ядерной спин-системой. Эффект назван ядерным электрическим резонансом (ЯЭР). Найдены константы R_{ij} , связывающие приложенное электрическое поле и индуцированный им градиент поля на ядрах кристалла GaAs.

В работах [1 - 3] исследовались влияния электрических полей на зеемановские уровни ядер. Как известно, электрическое поле непосредственно на ядра не действует. Поэтому авторы [1] исходили из того, что поле E_k , смещая заряды решетки, создает градиент V_{ij} на ядре, который, в свою очередь, взаимодействует с квадрупольным моментом ядра Q_j .

До сих пор это явление наблюдалось двумя методами: расщеплением линии ЯМР статическим полем [1, 3] и насыщением сигнала ЯМР переменным электрическим полем резонансной частоты [2].

В настоящей работе сообщается о первом наблюдении прямого поглощения ядерной спин-системой энергии электрического поля на частоте переходов $\Delta m = \pm 2$. Этот эффект в дальнейшем будем называть ядерным электрическим резонансом (ЯЭР). Для обнаружения ЯЭР был использован ранее разработанный спектрометр ядерного акустического резонанса (ЯАР) [4] с некоторыми усовершенствованиями: акустический резонатор заменен электрическим резонансным LCR-контуром (рис. 1). Между двумя пластинами конденсатора C_0 помещался исследуемый образец высокоомного ($5 \cdot 10^7$ Ом·см) кристалла GaAs с размерами $0,3 \times 1,6 \times 1,6$ см³.

Поле E_k прикладывалось вдоль пьезоэлектрически неактивной оси кристалла [001]. Для повышения чувствительности метода контур с образцом помещался в гелиевый криостат. На рис. 1 приведены сигналы ЯЭР от ядер ^{75}As , ^{69}Ga , ^{71}Ga , полученных на частоте электрического поля 16,68 МГц и в магнитных полях 11,44; 18,15 и 6,42 кГс соответственно. При этом магнитное поле модулировалось током прямоугольной формы с частотой 6,6 Гц и амплитудой модуляции в два - три раза превышающей ширину линии ЯЭР. Для интерпретации полученных нами результатов воспользуемся феноменологическим подходом, развитым в работе [1].

В линейном по E_k приближении

$$V_{ij} = \sum_k R_{ijk} E_k + \sum_{lm} \sum_k S_{ijlm} d_{lmk} E_k \quad (1)$$

Величина градиента V_{ij} определяется в основном первым слагаемым, содержащим тензор третьего ранга R_{ijk} . Второй член учитывает вклад обратного пьезоэлектрического эффекта, пропорционального пье-

зомодулю d_{lmk} и тензору связи S_{ijlm} . Вклад этого слагаемого для исследуемого образца GaAs не превышает 1% и им можно пренебречь. Отметим, что тензоры R_{ijk} и d_{lmk} отличны от нуля только для кристаллов без центра инверсии. При больших напряженностях полей в (1) следует добавить нелинейные по E_K члены. Однако наши оценки и эксперимент [3] показывают, что, по крайней мере в полях ≤ 2000 В/см, вклад даже квадратичных членов (электрострикции [5]) пренебрежимо мал. Поэтому в последующих расчетах будет использоваться $V_{ij} = \sum_k R_{ijk} E_k(t)$, где $E_K(t)$ — осциллирующее поле.

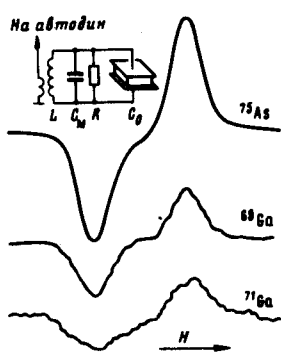


Рис. 1

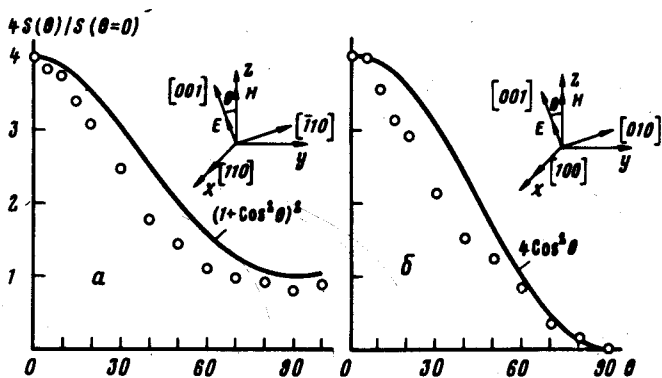


Рис. 2

Рис. 1. Записи сигналов ядерного электрического резонанса в GaAs и схема подключения электрического контура с образцом к автодину. $C_0 = 7,2$ пф — конденсатор с образцом, $C_M = 3,2$ пф — дополнительная емкость монтажа, $Q_3 = 1100$ и $\nu = 16,68$ МГц. Постоянная интегрирования 10 сек

Рис. 2. Экспериментальные точки и теоретические зависимости площади кривой сигнала ЯЭР от угла θ для двух ориентаций осей кристалла, электрического (E) и магнитного (H) полей по отношению к лабораторной системе координат

Диэлектрические свойства веществ характеризуются тангенсом угла потерь $\text{tg} \delta$. Поэтому ЯЭР поглощение будем выражать через $\text{tg} \delta_{\text{Я}}$. Можно показать, что

$$\text{tg} \delta_{\text{Я}} = \frac{P_{\text{Я}}(C_0 + C_M)}{P_3 Q_3 C_0}, \quad (2)$$

где $P_{\text{Я}}$ и P_3 — мощности, поглощаемые спин-системой и электрическим LCR-контуром, Q_3 — добротность контура. Квантовомеханический расчет $P_{\text{Я}}$ с учетом (1) аналогичен расчету мощности поглощения энергии ультразвука при ядерном акустическом резонансе [6]. Тогда

$$\text{tg} \delta_{\text{Я}} = \frac{[R_{ijk} K(\theta)]^2}{4 \epsilon_0} \frac{N \nu (\pi e Q_{\text{Я}})^2 g(\nu)}{kT} F(J, m). \quad (3)$$

Здесь ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость, N — число спинов в единице объема, ν — частота, $g(\nu)$ — функция формы, $F(J, m)$ — функция, определяемая спином ядра и характером перехода $\Delta m = \pm 1, \pm 2$, $K(\theta)$ определяет ориентационную зависимость ЯЭР. Из свойств симметрии кристалла GaAs вытекает, что существует только один, отличный от нуля, элемент тензора R_{14} (в обозначениях Фогта).

В таблице приведены значения $\text{tg } \delta_{\text{Я}}$, ширины линии ЯЭР на половине интенсивности и использованные в расчетах значения $Q_{\text{Я}}$. Для сравнения представлены значения R_{14} , полученные другими методами

Изотопы	$\text{tg } \delta_{\text{Я}}, 10^{-9}$	$\Delta\nu, \text{кГц}$	$Q_{\text{Я}}, 10^{-24} \text{см}^2$	$R_{14}, 10^{16} \text{см}^{-1}$		
					[1]	[2]
^{75}As	93 ± 6	$4,34 \pm 0,15$	0,30	1,56	1,55	2,0
^{69}Ga	$18 \pm 1,3$	$3,85 \pm 0,13$	0,19	1,35	1,05	1,5
^{71}Ga	$3,5 \pm 0,3$	$5,0 \pm 0,17$	0,12	1,28	0,9	1,5

Отношение $P_{\text{Я}}/P_{\text{Э}}$ входящее в выражение (2), измерялось по амплитуде $A_{\text{С}}$ — сигналов ЯЭР и $A_{\text{К}}$ — сигнала калибратора, а также с учетом эквивалентного сопротивления LCR-контура $R_{\text{Э}}$ и калибратора $\Delta R_{\text{К}}$. Указанные параметры связаны соотношением [4]:

$$\frac{\Delta R_{\text{Э}}}{R_{\text{Э}}} = \frac{P_{\text{Я}}}{P_{\text{Э}}} = \frac{A_{\text{С}}}{A_{\text{К}}} \frac{R_{\text{Э}}}{\Delta R_{\text{К}}}$$

Точность измерений R_{14} в основном определяется обычно большой погрешностью $Q_{\text{Я}}$.

Этим методом также исследовалась угловая зависимость площади сигнала $S(\theta)$ см. рис. 2. Имеется качественное соответствие данных эксперимента с теоретической зависимостью. Причем это согласие в прямом ЯЭР лучше, чем в методе насыщения [2]. К существенным достоинствам предложенного метода следует отнести большую точность измерений, а также то, что малый уровень подаваемой на образец ВЧ мощности ($\lesssim 10^{-6}$ Вт) полностью исключает вклад нелинейных эффектов.

Авторы выражают благодарность В.К.Нурмухаметову за предоставление образца.

Казанский физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 апреля 1981 г.
После переработки
14 августа 1981 г.

Литература

- [1] Gill D., Bloembergen N. Phys. Rev., **129**, 1963, 2398.
- [2] Brun E., Mahler R.J., Mahon H., Pierce W.L. Phys. Rev., **129**, 1963, 1965.
- [3] Dumas K.A., Soest J.F., Sher A. Phys. Rev., **B20**, 1979, 4406.
- [4] Садыков И.И. ПТЭ, №1, 1978, 129; ПТЭ, №6; 1978, 92.

[5] *Желудев И.С.* Основы сегнето электричества, М.: Атомиздат, 1973.

[6] *Болеф Д.И.* Физическая акустика, 4А, М.: Изд. Мир, 1969.
