

## ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСНОГО РАДИОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ НА СВЕРХТОНКУЮ СТРУКТУРУ ЯДЕРНЫХ УРОВНЕЙ В ПАРАМАГНИТНОМ КРИСТАЛЛЕ

С.С.Якимов, А.Р.Мкртчян, В.Н.Зарубин,  
К.В.Сербинов, В.В.Сергеев

Сообщаются результаты исследования эффекта Мессбауэра на примесных ядрах  $\text{Fe}^{57}$  в парамагнетике  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} : \text{Fe}^{3+}$  при одновременном воздействии постоянного и переменного магнитных полей. Показано, что радиочастотное (РЧ) поле резонансной частоты вызывает заметное уширение компонент мессбауэровского спектра, обусловленное расщеплением подуровней возбужденного состояния ядра  $\text{Fe}^{57}$ .

В 1961 году Хаком и Хамермешем [1] был проведен расчет изменения формы мессбауэровской линии в переменном магнитном поле, частота которого равна частоте сверхтонкой структуры возбужденного состояния ядра. Основным результатом этой работы заключается в том, что в достаточно больших РЧ полях каждая компонента спектра расщепляется на  $(2I_e + 1)$  компонент, где  $I_e$  – спин возбужденного состояния ядра. Аналогичный результат позднее был получен Габриэлем [2].

В работах [1, 2] показано, что уширение и расщепление компонент мессбауэровского спектра становится заметным лишь в том случае, когда амплитуда РЧ поля соизмерима с шириной мессбауэровской линии ( $H_{\text{РЧ}} \approx \Gamma$ ). Для ядер  $\text{Fe}^{57}$ , например, величина  $H_{\text{РЧ}}$  должна составлять не менее 10 кэ на частотах порядка десятков Мгц. Очевидно, что такие поля не могут быть получены в настоящее время в лабораторных условиях.

Известно, однако, что в ферромагнитных материалах существует механизм усиления РЧ поля за счет обменного взаимодействия, в результате которого напряженность эффективного РЧ поля, действующего на ядро, оказывается достаточной для выполнения условия  $H_{\text{эфф}} \approx \Gamma$ .

Однако, попытки экспериментального наблюдения этого явления (в геометрии поглощения резонансных мессбауэровских  $\gamma$ -квантов) в форме, предсказанной в работах [1, 2] не дали положительных результатов [3]. Дело в том, что возникновение магнитоупорядоченных колебаний в магнитоупорядоченных образцах при воздействии  $H_{pч}$  приводит к появлению большого количества "сателлитов" в мессбауэровском спектре [4]. Это в значительной степени затрудняет его расшифровку и не дает возможности сделать однозначного заключения о влиянии РЧ поля непосредственно на структуру ядерных уровней.

Более того, специальные исследования, предпринятые с целью обнаружения эффекта в опытах по резонансному рассеянию  $\gamma$ -квантов в магнитоупорядоченных веществах показали, что даже в тех случаях, когда такое влияние имеет место [5], наблюдаемая величина эффекта оказывается существенно меньше предсказываемой теорией.

В парамагнитных кристаллах, при определенных условиях, также существует возможность усиления РЧ поля за счет сверхтонкого электронно-ядерного воздействия [6]. Можно показать, что коэффициент усиления для ядер  $Fe^{57}$  достигает в них величины  $\sim 10^3$ . Отсутствие магнитоупорядоченных колебаний в парамагнетиках при таком же по порядку величины коэффициенте усиления, что и в магнитоупорядоченных веществах, позволяет считать их более предпочтительными объектами исследования обсуждаемого здесь нового физического явления.

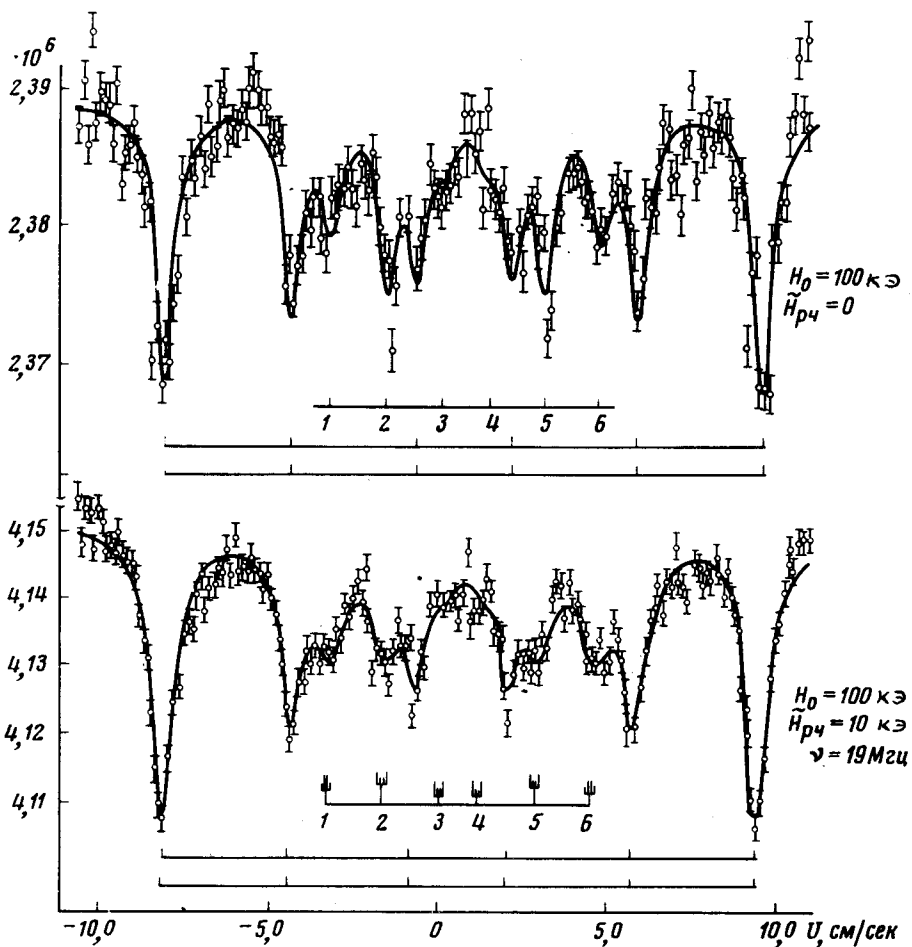
В настоящей работе изучение влияния РЧ поля на резонансное поглощение  $\gamma$ -квантов с энергией 14,4 кэВ ядрами  $Fe^{57}$  проводилось на мессбауэровском спектрометре, работающем в режиме постоянных скоростей движения источника ( $Co^{57}$  в Сг, активность 100 мКи). В качестве поглотителя использовался монокристалл нитрата алюминия  $Al(NO_3)_3 \times 9H_2O: Fe^{3+}$ , с концентрацией примесных ионов железа (90%  $Fe^{57}$ ) не более 0,5 мол% [7, 8]. Радиочастотное поле  $H_{pч}$  создавалось катушкой специального генератора с независимым возбуждением, выходной каскад которого являлся резонансным усилителем мощности [9]. Исследуемый образец, омываемый жидким азотом, помещался в стакане из оргстекла, соединенном с металлическим криостатом. Катушка генератора индуктивностью  $L \approx 1$  мкГн была введена в вакуумный объем криостата и крепилась на держателе образца таким способом, что сам образец находился в центре катушки, ось которой совпадала с направлением пучка  $\gamma$ -квантов. Постоянное магнитное поле  $H_0$ , прикладываемое к образцу перпендикулярно пучку  $\gamma$ -квантов, создавалось двумя ферритовыми кольцами, укрепленными с внешней стороны криостата.

Ранее было установлено [7, 8], что мессбауэровские спектры поглощения ядер  $Fe^{57}$  в этом кристалле, помещенном в стабилизирующее магнитное поле  $H_0 \geq 100$  э при  $T \leq 77$  К, представляют собой суперпозицию зеемановских спектров от трех крамеровских дублетов, на которые расщепляется электронный спин иона  $Fe^{3+}$  в кристаллическом поле. Для одного из этих дублетов тензор сверхтонкого взаимодействия  $A_{jk}$  является полностью изотропным, так что поле  $H_{ст} = 255$  кэ для зеемановского спектра, соответствующего этому дублету (линии 1 - 6 - см. рисунок), всегда параллельно  $H_0$ . Можно показать, что в этом случае эффективное переменное поле, действующее на ядро  $Fe^{57}$ , определяется вели-

чиной:  $H_{\text{эфф}} \approx H_{\text{рч}} H_{\text{ст}} / H_0$ . При  $H_0 = 100 \text{ э}$  и  $H_{\text{рч}} = 10 \text{ э}$  напряженность

поля  $H_{\text{эфф}} = 25 \text{ кэ}$  оказывается соизмеримой с экспериментальной шириной компонент мессбауэровского спектра в  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} : \text{Fe}^{3+}$  ( $\Gamma_{\text{эксп}} \approx 20 \text{ кэ}$ ).

В этих условиях действие РЧ поля резонансной частоты (для возбужденного состояния ядра в интересующем нас зеемановском спектре  $\nu_{\text{рез}} = 19 \text{ Мгц}$ ) будет приводить только к уширению линий 1 – 6. Линии, соответствующие двум совпадающим "анизотропным" крамеровским дублетам не должны при этом претерпевать какого-либо заметного изменения [8].



Мессбауэровские спектры ядер  $\text{Fe}^{57}$  в  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} : \text{Fe}^{3+}$  при  $T = 77\text{K}$  в постоянном ( $H_0$ ) и радиочастотном ( $H_{\text{рч}}$ ) магнитных полях ( $H_{\text{рч}} \perp H_0$ ). Источник  $\text{Co}^{57}$  в  $\text{Cr}$  ( $T = 300\text{K}$ ).

Из рисунка видно, что при наложении РЧ поля изменилась именно эта часть спектра. Линии 1 – 6 уширились более чем в полтора раза, тогда

как остальные практически не изменились. Существенно, что в наиболее четкой форме влияние РЧ поля проявилось для компонент 2 и 5, поскольку характер расщепления (соотношение интенсивностей) этих линий приводит к большему, по сравнению с компонентами 1 и 6, уширению их огибающей в результирующем спектре. Таким образом, влияние РЧ поля имеет в данном случае "избирательный", резонансный характер, причем, величина наблюдаемого эффекта качественно согласуется с выводами теории [1, 2]. Для наблюдения же визуального расщепления отдельных компонент спектра, очевидно, необходим существенно больший набор статистики  $\gamma$ -квантов.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что в кристалле  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}:\text{Fe}^{3+}$  сравнительно легко осуществить условия, необходимые для экспериментального наблюдения резонансного воздействия радиочастотного поля на сверхтонкую структуру ядерных уровней  $\text{Fe}^{57}$ . Этот факт является весьма обнадеживающим при проведении исследований с целью детального изучения резонансных явлений в парамагнетиках.

Авторы глубоко признательны И.К.Кикоину за постоянный интерес и внимание к этой работе и А.М.Афанасьеву за весьма полезные обсуждения постановки задачи и результатов эксперимента.

Поступила в редакцию  
16 мая 1977 г.

### Литература

- [1] M.N.Hack, M.Hamermesh. Nuovo Cimento, 19, 546, 1961.
- [2] H.Gabriel. Phys. Rev., 184, 359, 1969.
- [3] E.Mattias. In Hyperfine Structure and Nuclear Radiations, Amsterdam, 1968.
- [4] L.Pfeiffer, N.D.Heiman, J.C.Walker. Phys. Rev., B6, 74, 1972.
- [5] N.D.Heiman, J.C.Walker, L.Pfeiffer. Phys. Rev., 184, 281, 1969.
- [6] A.Abragam. The Principles of Nuclear Magnetism, Oxford, 1961; А.Абрагам. Ядерный магнетизм. ИИЛ М., 1963.
- [7] С.С.Якимов, В.Н.Зарубин. Письма в ЖЭТФ, 18, 641, 1973.
- [8] А.М.Афанасьев, В.Н.Зарубин, С.С.Якимов. ЖЭТФ, 70, 1957, 1976.
- [9] С.С.Туманян, О.Д.Ветров, А.Р.Мкртчян, Л.А.Кочарян, А.Р.Аракелян, Вопросы радиоэлектроники, 6, 106, 1975.