

ЯМР- γ ДВОЙНОЙ РЕЗОНАНС В ТАНТАЛЕ

В.К.Войтовецкий, С.М.Черемисин, С.Б.Сазонов

Измерены спектры поглощения мессбауэровского излучения Ta^{181*} (W) в тантале в условиях воздействия на ядра источника, помещенного в постоянное магнитное поле напряженностью 3400 Э, переменного магнитного поля с резонансной для возбужденного состояния частотой 3 МГц и напряженностью 150, 300 и 360 Э, поля с частотой 4 МГц и напряженностью 300 Э и без переменного поля. Соответствующее предсказанию теории резкое изменение спектра в поле с напряженностью 300 и 360 Э при резонансной частоте свидетельствует об обнаружении ЯМР-резонанса.

В Ta^{181} , имеющем мессбауэровский уровень со временем жизни $\tau \approx 10^{-5}$ сек и обладающем большим магнитным моментом основного и изомерного состояний, возможно прямое возбуждение ЯМР- γ двойного резонанса радиочастотным полем, без дополнительного усиления поля на ядре. (Для Fe^{57} , например, необходимо дополнительное усиление $\sim 10^2 - 10^3$ [1-3]). Отсутствие магнитострикционных колебаний в тантале устраняет также одну из основных трудностей, возникающих в подобных экспериментах с магнитоупорядоченными веществами. Для четкого проявления эффекта двойного резонанса, правда, необходимо, при напряженности постоянного поля $\sim (3-4) \cdot 10^3$ Э, воздействовать на ядра Ta^{181} в источнике или в поглотителе резонансным переменным полем (частота \sim МГц) напряженностью несколько сот эрстед.

Первая попытка наблюдения двойного резонанса в Ta^{181} при действии на источник постоянного поля напряженностью $H_0 = 1800$ Э и переменного поля напряженностью (амплитуда поля) $H_{\sim} = 10$ Э была предпринята Кайндлом и Саломоном [4].

В настоящей работе приведены результаты экспериментов, в которых при поле на источнике $H_0 = 3400$ Э с помощью танталового поглотителя анализировались мессбауэровские спектры Ta^{181*} в условиях воздействия на ядра источника резонансного для возбужденного состояния (частота $F = 3$ МГц) радиочастотного поля $H_{\sim} \approx 150$; $H_{\sim} \approx 300$; $H_{\sim} \approx 360$ Э, а также поля с $F = 4$ МГц и $H_{\sim} \approx 300$ Э, и наблюдался двойной резонанс в тантале.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Источник мессбауэровского излучения Ta^{181*} (W^{181*} в матрице вольфрама) помещался в перпендикулярные друг другу и направлению анализируемого излучения постоянное и переменное магнитные поля. Прошедшее через поглотитель излучение детектировалось газовым пропорциональным счетчиком ($Ar - Kr$ с небольшой добавкой CH_4).

Источники активностью 7 — 10 мкюри (размер 2×7 мм²) были изготовлены диффузией металлического W^{181*} в матрицу вольфрама толщиной 10 — 30 мкм. W^{181*} был получен облучением танталовой мишени на внутреннем дейтонном пучке сильноточного циклотрона ФЭИ и после от-

деления от исходного тантала и очистки от примесей на ионообменных колонках (анионит Дауэкс 1×8) восстанавливался в токе водорода до металла. Поглотителем служила предварительно прошедшая термообработку танталовая фольга толщиной 2 мкм.

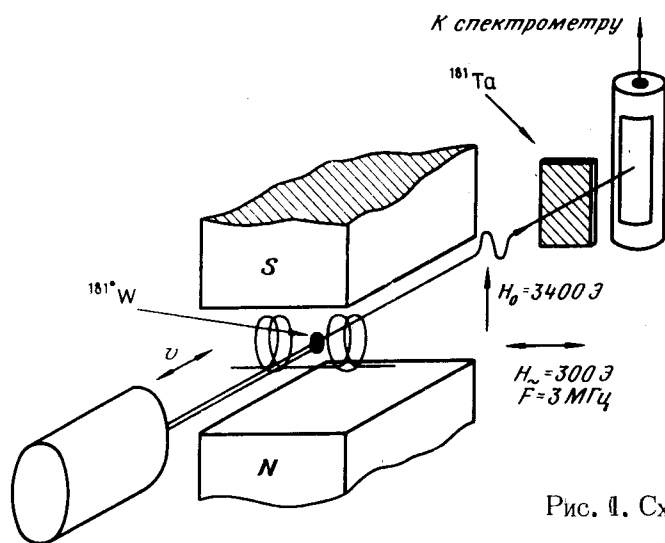


Рис. 4. Схема эксперимента

Постоянное магнитное поле создавалось электромагнитом, а радиочастотное — катушкой генератора диаметром 12 мм, содержащей восемь витков медной трубки диаметром 2 мм, по которой пропусклась вода. Подводимая к катушке мощность достигала 500 Вт, но источник, укрепленный на теплоотводе — штоке электродинамического вибратора из BeO , при этом заметно не нагревался.

Мессбауэровские спектры поглощения измерялись в режиме постоянных ускорений; присущие такому режиму параболические искажения нулевой линии не превышали 0,1 — 0,2%. Напряженность переменного магнитного поля измерялась с помощью пробной катушки.

На рис. 2 показаны экспериментальные мессбауэровские спектры поглощения в тантале (измерялся не весь спектр) при $H_0 = 3400$ Э без переменного магнитного поля (а) и с переменным магнитным полем $F = 3$ МГц, $H_1 \approx 150$ Э (б) и $H_1 \approx 300$ Э (в). Измерения проводились сериями, попеременно при $H_1 \approx 150$ Э, $H_1 = 0$ и $H_1 \approx 300$ Э. Статистическая точность каждой точки спектра $\pm 0,1\%$.

Структура линий, соответствующих переходам с зеемановских подуровней возбужденного состояния ядра, — положение и относительная интенсивность — приведены на рис. 4, а. Не все эти линии разрешены в экспериментальном спектре — (рис. 2, а) из-за значительного неоднородного уширения.

В условиях двойного резонанса, когда частота переменного поля равна разности энергий соседних зеемановских подуровней возбужденного состояния, при достаточно большой напряженности переменного поля каждая линия (рис. 4, а) должна расщепляться на $2I_B + 1$ компонент (I_B — спин ядра в возбужденном состоянии) [5, 6]. Компоненты линий, естественно, не разрешены в экспериментальных спектрах (рис. 2, б, в, а также

рис. 3, б, в), но это расщепление, пропорциональное H_{\sim} , приводит к кардинальному изменению всего спектра.

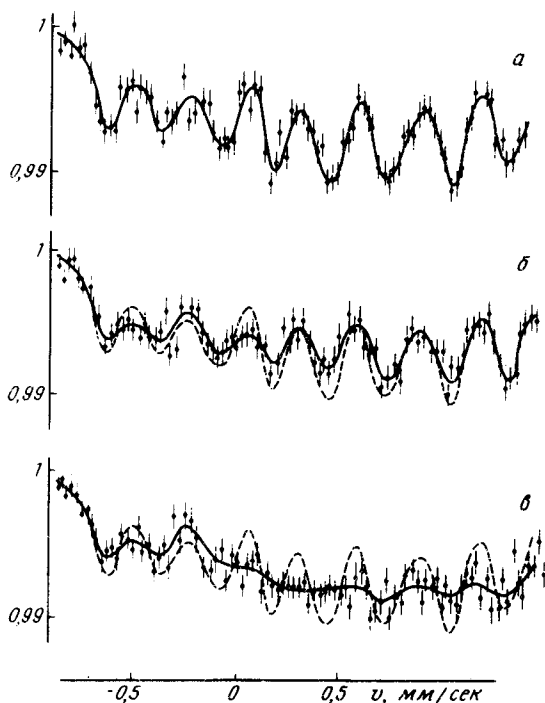


Рис. 2. Экспериментальные мессбауэровские спектры поглощения излучения ^{181}Ta (W) в тантале при $H_0 = 3400$ Э: а — $H_{\sim} = 0$; б — $F = 3$ МГц, $H_{\sim} \approx 150$ Э; в — $F = 3$ МГц, $H_{\sim} \approx 300$ Э. Пунктиром показан спектр при $H_{\sim} = 0$

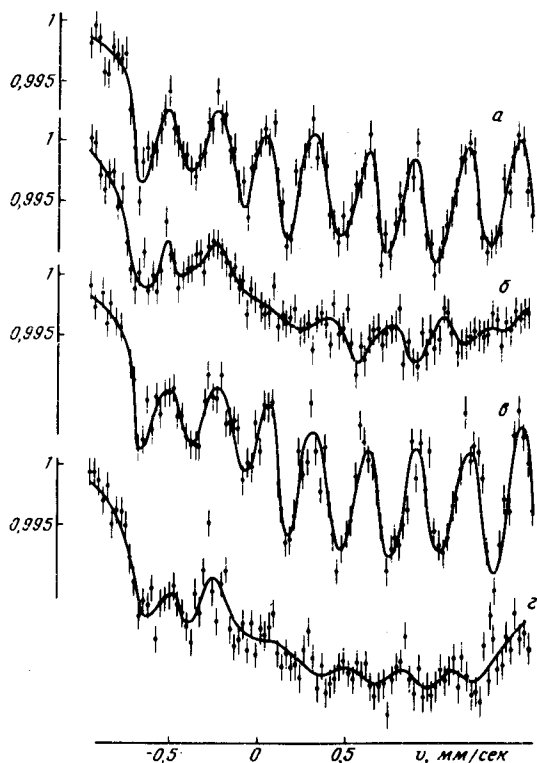


Рис. 3. Экспериментальные мессбауэровские спектры поглощения излучения ^{181}Ta (W) в тантале при $H_0 = 3400$ Э: а — $H_{\sim} = 0$; б — $F = 3$ МГц, $H_{\sim} \approx 360$ Э; в — $F = 4$ МГц, $H_{\sim} \approx 300$ Э; з — $F = 3$ МГц, $H_{\sim} \approx 300$ Э

При $H_{\sim} \approx 150$ Э (рис. 2, б) амплитуда линий в средней части спектра значительно уменьшается, а при $H_{\sim} \approx 300$ Э (рис. 2, в) все линии, за исключением двух крайних слева почти полностью размываются. Эти изменения согласуются с ожидаемыми в расчетных спектрах (рис. 4, б, в, г). (Некоторое отличие в общем наклоне экспериментальных и расчетных кривых связано с ранее отмеченным небольшим параболическим искажением нулевой линии).

На рис. 3 представлены результаты измерений, проведенных с другим источником. В этих экспериментах применялась дополнительная дискриминация импульсов пропорционального счетчика по времени нарастания, что позволило увеличить эффект резонансного поглощения до 18% при ширине линии $\Gamma = 0,14$ мм/сек. При дальнейшем увеличении напряженности резонансного переменного поля (рис. 3, б; расчетная кривая — рис. 4, д) происходит еще более резкая перестройка спектра, особенно в правой его части — положение пиков и провалов на кривой смещается, на месте пика оказывается провал, и наоборот; это связано с перекрытием интенсивных компонент расщепленных соседних линий.

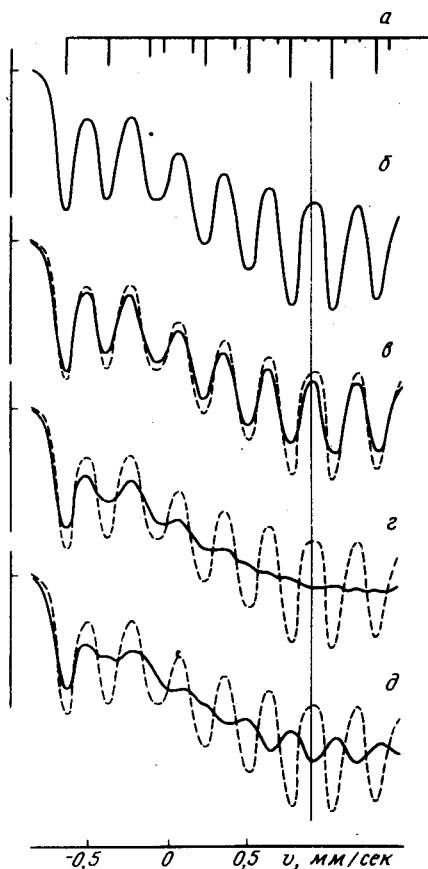


Рис. 4. а — Структура спектра излучения ^{181}Ta (W) (положение и относительная интенсивность линий) при $H_0 = 3400$ Э, $H_{\sim} = 0$. Положение нерасщепленной линии ($H_0 = 0$) отмечено вертикальной прямой. Расчетные мессбауэровские спектры поглощения ^{181}Ta (W) в тантале при $H_0 = 3400$ Э: б — $H_{\sim} = 0$; в — $F = 3$ мГц, $H_{\sim} = 150$ Э; г — $F = 3$ мГц, $H_{\sim} = 300$ Э; д — $F = 3$ мГц, $H_{\sim} = 360$ Э. Расчет выполнен для условий строгого резонанса, в приближении тонкого поглотителя. Значение $F = 3$ мГц может в пределах нескольких процентов отличаться от значения реальной резонансной частоты из-за неточности в величине магнитного момента возбужденного состояния. Пунктиром показан спектр при $H_{\sim} = 0$

При воздействии на ядра источника переменного магнитного поля, частота которого сдвинута относительно резонанса — $F = 4$ мГц. $H_{\sim} \approx$

≈ 300 Э (рис. 3, в) спектр практически не отличается от спектра при $H_{\sim} = 0$ (рис. 3, а). Для сравнения на рис. 3, г приведен также спектр, полученный с переменным полем при той же напряженности $H_{\sim} \approx 300$ Э, но с резонансной частотой $F = 3$ мГц. (Для повышения статистической точности здесь использованы данные измерений с двумя источниками). Из сопоставления рис. 3, а, в и г следует, что наблюдаемое и согласующееся с теоретическим предсказанием резкое изменение спектра в переменном магнитном поле имеет резонансный характер.

В одном из экспериментов был измерен мессбауэровский спектр поглощения излучения Ta^{181*} в тантале при действии на ядра источника только переменного магнитного поля ($F = 3$ мГц, $H_{\sim} \approx 300$ Э) и сопоставлен со спектром, полученным без магнитных полей (одиночная линия). Спектры поглощения практически идентичны. Это означает, что если уровни ядра не расщеплены постоянным магнитным полем, и, следовательно, резонансные переходы между зеемановскими подуровнями отсутствуют, переменное магнитное поле в пределах ошибки измерений ($\pm 0,5\%$ в каждой точке) не влияет на спектр.

Полученные результаты свидетельствуют об обнаружении ЯМР-у двойного резонанса.

Авторы признательны В.М.Галицкому, И.И.Гуревичу и Ю.М.Кагану за обсуждение результатов работы, А.Ю.Дудкину за участие в подготовке экспериментов и в проведении измерений, И.Л.Корсунскому, Ю.Ф.Пажину и Ю.Н.Пшонкину за изготовление источников мессбауэровского излучения.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
24 октября 1979 г.

Литература

- [1] W.Meisel. Mössbauerspectrometrie, Proc. of 4-th Int'l Conf. of Soc. Countries, 1972.
- [2] L.Pfeiffer. J. de Phys., 35, С 1-67, 1974.
- [3] С.С.Якимов, А.Р.Мкртчян, В.Н.Зарубин, К.В.Сербинов, В.В.Сергеев. Письма в ЖЭТФ, 26, 16, 1977.
- [4] G.Kaindl, D.Salomon. Bull. Am. Phys. Soc., 16, 640, 1971; D.Solomon. Ph. D. Thesis, 1972.
- [5] M.N.Hack, M.Hameresh. Nuovo Cim., 19, 546, 1961.
- [6] H.Gabriel. Phys. Rev., 184, 359, 1969.