

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТОУПРУГИЙ РЕЗОНАНС В БОРАТЕ ЖЕЛЕЗА

Х.Г.Богданова, Р.А.Багаутдинов, В.А.Голенищев-Кутузов,
Г.Р.Еникеева, Л.И.Медведев

Впервые обнаружена резонансная генерация магнитоупругих колебаний в условиях ЯМР ядер ^{57}Fe в FeBO_3 при воздействии на образцы переменным магнитным полем или ультразвуком при температурах 77 и 4,2 К.

Эффект генерации магнитоупругих (МУ) колебаний, обвязанный колебаниям связанной системы (электронно-ядерная и фоновая подсистемы), имеет пороговый характер относительно величины переменного магнитного поля H_1 или деформации ϵ ультразвуковых (УЗ) волн и возникает при определенных значениях постоянного магнитного поля H_0 .

В первом случае образцы с естественной концентрацией изотопа ^{57}Fe (2,2 ат. %) помещались в катушку импульсного спектрометра ЯМР "Брукнер СХР-100", оснащенную акустическим датчиком для регистрации УЗ излучения образца, которое возникало после подачи радиочастотного (РЧ) импульса. Исследовалось поведение сигналов свободной индукции (ССИ) и частотный спектр ССИ после фурье-преобразования в зависимости от амплитуды H_1 , величины и направления H_0 , температуры T .

Во втором случае изучалось затухание (α) и частотный спектр ($\Delta\nu_{\text{зв}}$) возбуждаемых внешним пьезопреобразователем и проходящих через образец непрерывных и импульсных УЗ колебаний в зависимости от H_0 , ϵ и T . В обоих экспериментах H_1 и H_0 , находились в плоскости (111), при этом $H_1 \parallel H_0$ или $H_1 \perp H_0$ и волновой вектор УЗ колебаний $k \parallel [111]$.

При малом уровне $H_1 < 4 \cdot 10^{-2}$ Э и $H_0 = 0$ спектр ССИ состоит из двух линий с шириной ~ 5 кГц. По температурной, частотной и полевой зависимости параметров этих линий мы отнесли их к резонансным колебаниям ядер ^{57}Fe в доменах и доменных стенах. С ростом H_0 до 40 Э при $H_1 \parallel H_0$ линия от ядер в доменных стенах исчезает вследствие монодоменизации образца.

При увеличении H_1 мы натолкнулись на качественно новое проявление МУ взаимодействия. Когда $H_1 > 0,1$ Э и $H_0 < 150$ Э ($H_1 \perp H_0$), $T = 77$ К наблюдалось уменьшение интенсивности ССИ и одновременное возникновение связанных МУ колебаний. Эти колебания происходили в широком спектре частот (~ 1 МГц), состоящем из отдельных полос с шириной ~ 30 кГц и интервалами между ними, соответствующими акустическим размерным резонансам образцов вдоль оси [111], при этом интенсивность линии ЯМР уменьшается почти до нуля (рис. 1, кривая 1).

Такие же МУ колебания возбуждались и при свипировании частоты непрерывного ультразвука с $\epsilon > 10^{-5}$, их спектр сходен с колебаниями при РЧ возбуждении и может быть объяснен наличием продольных и поперечных типов колебаний, связанных с возбуждением различных частей образца, ограниченных доменными стенками. На справедливость этого предположения указывает изменение спектра нерезонансных МУ колебаний с ростом H_0 . В тех же условиях наблюдалось значительное затухание поперечных УЗ волн.

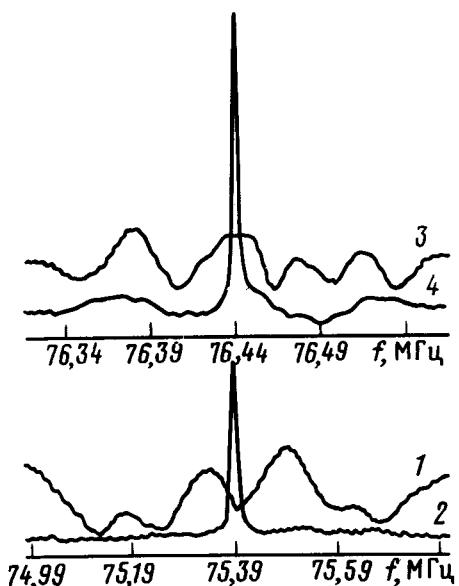


Рис. 1

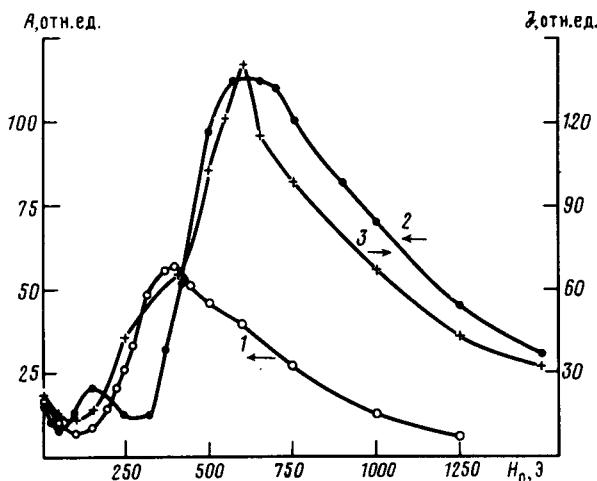


Рис. 2

Рис. 1. Частотный спектр МУ колебаний: 1 – $H_0 = 85 \text{ Э}, H_1 = 0,9 \text{ Э}, T = 77 \text{ К}; 2 - H_0 = 350 \text{ Э}, H_1 = 0,9 \text{ Э}, T = 77 \text{ К}; 3 - H_0 = 300 \text{ Э}, H_1 = 12 \text{ Э}, T = 4,2 \text{ К}; 4 - H_0 = 3,8 \text{ кЭ}, H_1 = 12 \text{ Э}, T = 4,2 \text{ К}$

Рис. 2. Зависимость интенсивностей магнитной A и упругой J компонент МУ колебаний на частоте ЯМР от H_0 при $T = 77 \text{ К}$: 1 – $H_1 = 0,9 \text{ Э}, 2 - H_1 = 1,6 \text{ Э}, 3 - \epsilon = 10^{-5}$

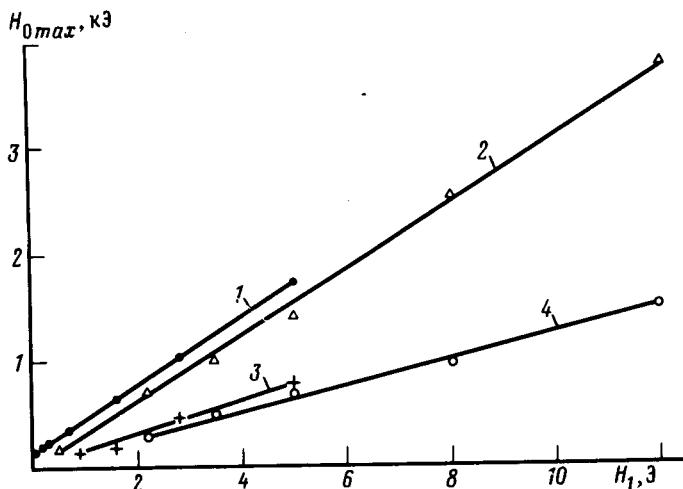


Рис. 3. Зависимость $H_{0\max}$ от H_1 при: 1, 3 – $T = 77 \text{ К}, 2, 4 - T = 4,2 \text{ К}$

При $H_1 \perp H_0$ и фиксированных значениях $0,1 \text{ Э} < H_1 < 1 \text{ Э}$ (77 К) с увеличением H_0 происходило уменьшение интенсивности нерезонансных МУ колебаний и при определенных значениях H_0 возникала резонансная генерация узкого спектра МУ колебаний на частоте ЯМР (рис. 1, кривая 2), полевая зависимость которой приведена на рис. 2 (кривая 1). При $H_1 > 1 \text{ Э}$ появляются две области H_0 , в которых наблюдается усиление

резонансных МУ колебаний (рис. 2, кривая 2 и рис. 3). Анализ спектра ССИ показал, что перезонансные МУ колебания, возникающие после окончания РЧ импульса, быстро затухают (время релаксации магнитоупругих волн $\tau_{ph} \sim 1$ мкс) и при увеличении H_0 сменяются резонансными МУ колебаниями, затухающими значительно медленнее ($\tau_p \sim 80$ мкс) для обоих значений температуры. Резонансные МУ колебания возникают в узкой области частот ~ 13 кГц, совпадающих с шириной размерного акустического резонанса, с центром на частоте ЯМР.

Аналогично при распространении УЗ волн в окрестности частоты ЯМР с ростом ϵ возникало уменьшение (до 7 раз) затухания поперечных мод в тех же магнитных полях, что и при подаче РЧ импульсов (рис. 2, кривая 3), т. е. возникал эффект, аналогичный акустической самоиндущей прозрачности.

Таким образом, можно предположить, что при возбуждении образцов переменным магнитным полем или ультразвуком вследствие сильного магнитоупругого взаимодействия возникают магнитоупругие колебания. Широкий спектр этих колебаний связан с участием доменов и доменных стенок. Далее эти МУ колебания посредством электронно-ядерного взаимодействия вызывают на частоте ЯМР переходы между ядерными спиновыми уровнями.

Поскольку процессы испускания и поглощения ядром одного фонона $\sim H_E B_i / H_A$, где H_E – эффективное поле обменных сил, B_i – магнитоупругая константа, H_A – поле анизотропии, то при рекордных для бората железа значениях этих параметров, такой процесс становится доминирующим². При этом спектр перезонансных МУ колебаний трансформируется и его ширина определяется шириной линии ЯМР. Дополнительное усиление МУ колебаний возникает при совпадении частоты ЯМР с размерными резонансами поперечных УЗ колебаний. Участие резонансных спиновых переходов подтверждается и угловой анизотропией амплитуды УЗ колебаний, удовлетворяющих акустическому ЯМР.

Зависимость значений H_{0max} , при которых возникает максимальное усиление МУ колебаний при фиксированных H_1 на частоте ЯМР, от интенсивности H_1 (рис. 3) можно объяснить возникновением ориентационного фазового перехода по деформации, т. е. скачкообразной переориентацией спинов от зеемановской ($m \parallel H_0$) к угловой конфигурации ($\langle m, H_0 \rangle \neq 0$). Такой эффект наблюдался ранее только при статической деформации в гематите³.

В нашем случае, поскольку колебания намагниченности синхронно следуют за переменными деформациями, возникает периодическая переориентация спинов. Сопоставление результатов³ с нашими данными показало, что величина ϵ в УЗ волне ($\sim 10^{-5}$) вполне соответствует условию динамического ориентационного ФП в прилагаемых магнитных полях.

С понижением температуры от 77 до 4,2 К обнаруженные эффекты становятся более четкими. В частности возрастает амплитуда и полевое разрешение пиков ядерного МУ резонанса (рис. 1, кривые 3, 4) и происходит температурный сдвиг H_{0max} (рис. 3, кривые 2, 4).

Литература

- Богданова Х.Г., Багаутдинов Р.А., Голенищев-Кутузов В.А., Еникиеева Г.Р., Медведев Л.И. ФТТ, 1986, 28, 924.
- Туров Е.А., Петров М.П. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1969.
- Ожогин В.И. Изв. АН СССР, сер. физ., 1978, 42, 1625.