

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЯДЕРНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОННОЙ И ЯДЕРНОЙ ПОДСИСТЕМАМИ

В.В.Котов, А.Н.Погорелый

Экспериментально обнаружена "раздвижка" электронно-ядерных ветвей при совпадении частот ФМР и ЯМР в тонких ферромагнитных пленках. Эффект наблюдается при температурах жидкого гелия, когда взаимодействие между спиновыми подсистемами превышает затухание электронной и ядерной намагниченности.

В настоящей работе мы сообщаем о впервые экспериментально обнаруженном эффекте расталкивания ветвей электронно-ядерных колебаний в ферромагнитных пленках в результате взаимодействия электронной и ядерной подсистем при пересечении частотно-полевых зависимостей ФМР и ЯМР.

Этот эффект был предсказан в работах Игнатченко и Куденко [1], а попытка наблюдать его экспериментально при 300 К была сделана в нашей предыдущей работе [2]. Вместо ожидаемой "раздвижки" электронно-ядерных ветвей, мы наблюдали характерный "излом" на частотно-полевой зависимости ФМР и усиление сигнала ЯМР в области совпадения их частот. Было высказано предположение, что учет затухания может объяснить вышеуказанный эффект.

Подробный анализ условий возникновения "раздвижки" с учетом затухания в электронной и ядерной подсистемах, проведенный в теоретических работах Портиса [3], Ботвинко и Иванова [4], Игнатченко и Цифриновича [5] показал, что необходимым условием для возникновения "раздвижки" электронно-ядерных ветвей есть выполнение неравенства: $\omega_x \gg \omega_r$, где $\omega_x = \gamma_e (4\pi A m M)^{1/2}$ — обменная частота, ω_r — скорость релаксации в электронной подсистеме, m — ядерная намагниченность, M — электронная намагниченность, A — константа сверхтонкого взаимодействия. В случае же $\omega_x \approx \omega_r$, должны наблюдаться "изломы" на частотно-полевых зависимостях, подобно [2].

В ферромагнитных пленках неравенство $\omega_x \gg \omega_r$ может реализовать ся при низких температурах, так как $m \sim 1/TK$. Например, для пленок Fe — Ni — Co экспериментально измеренное значение скорости электронной релаксации в локальных областях составляет около $1,3 \cdot 10^8$ сек⁻¹, а обменная частота ω_x при 300 К равна $2 \cdot 10^8$ сек⁻¹ (т.е. при 300 К $\omega_x \approx \omega_r$), при 1,5 К достигает значения $3 \cdot 10^9$ сек⁻¹ (т.е. при 1,5 К $\omega_x \gg \omega_r$). Эксперимент проводился, как и в предыдущем случае, на пленках Fe — Ni — Co немагнитострикционного состава с содержанием кобальта около 40%, но при температурах жидкого гелия. Для того, чтобы избежать влияния на результаты измерений антиферромагнитного слоя окислов, пленки были получены в условиях сверхвысокого вакуума с последующим нанесением защитного покрытия. Образец помещался в нерезонансную, согласованную по волновому сопротивлению полоско-

вую линию. В области частот ниже 200 Мгц измерения проводили методом спигового эха, а на более высоких частотах — по поглощению энергии непрерывных высокочастотных колебаний.

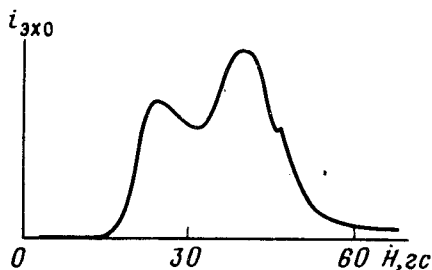


Рис. 1. Зависимость интенсивности спигового эха в пленках Fe — Ni — Co от величины внешнего магнитного поля. Частота 180 Мгц, температура 1,5 К, расстояние между возбуждающими импульсами 400 мксек

На рис. 1 показана зависимость амплитуды эхо-сигнала от величины внешнего магнитного поля, полученная при помощи интегратора и двухкоординатного самописца на частоте 180 Мгц, при расстоянии между возбуждающими импульсами 400 мксек и температуре 1,5 К. Четко видны два максимума, расположенные по обе стороны от значения магнитного поля, соответствующего невозмущенному ФМР. Отметим, что уже при температуре жидкого азота кривая имеет один максимум. Серия подобных кривых для различных значений частоты дала возможность построить электронно-ядерные ветви в координатах частоты и магнитного поля (рис. 2).

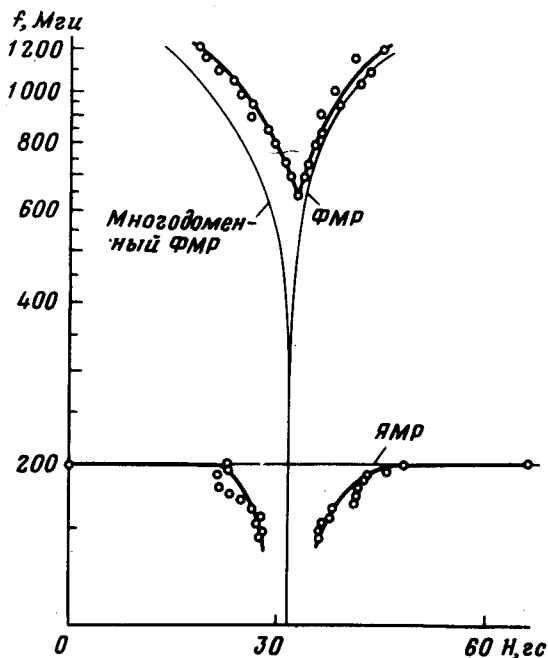


Рис. 2. Зависимость частоты электронного и ядерного магнитного резонансов в пленке Fe — Ni — Co от величины внешнего магнитного поля в отсутствие связи между подсистемами (сплошные тонкие линии) и при сильной связи для $T = 1,5$ К (экспериментальные точки и толстые линии)

На этом рисунке сплошными тонкими линиями показаны невозмущенные значения собственных частот системы, полученные при комнатной температуре, причем ФМР исследован при большой мощности в условиях насыщения ядерной подсистемы, а ЯМР — методом спигового эха. Экс-

периментальные точки нанесены для температуры 1,5 К, где "электронно-подобные" участок ветвей в верхней части рисунка измерены непрерывной методикой при очень малых уровнях мощности, а электронно-ядерные ветви в нижней части рисунка измерены методом спигового эха. В данном случае одна из ветвей электронно-ядерных колебаний соответствует взаимодействию ядерной подсистемы с многодоменным ФМР, а другая — взаимодействию с однодоменным ФМР.

Характерной особенностью поведения "электронно-подобных" участков электронно-ядерных ветвей является сильная зависимость коэффициента поглощения от величины возбуждающей мощности и температуры: при малых уровнях возбуждающей мощности и низких температурах (ниже 77 К) поглощение полностью исчезает при некоторой критической частоте (400 — 700 Мгц в зависимости от температуры). При больших же уровнях мощности наблюдается обычный ФМР без существенных особенностей во всем интервале частот и температур.

Исчезновение поглощения высокочастотной энергии в данном случае связано, по-видимому, с тем фактом, что верхняя электронно-ядерная ветвь, соответствующая "перепутыванию" многодоменного ФМР с ЯМР смещается в сторону магнитных полей больших поля анизотропии, т.е. в область где разрушается многодоменное состояние, а верхняя ветвь, соответствующая взаимодействию однодоменного ФМР с ЯМР смещается в сторону полей меньших поля анизотропии, т.е. в область где разрушается однодоменное состояние.

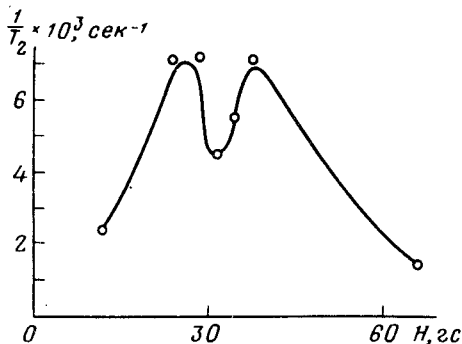


Рис. 3. Зависимость скорости поперечной релаксации (T_2^{-1}) "ядерно-подобных" колебаний в пленке Fe — Ni — Co от величины внешнего магнитного поля при $T = 1,5$ К и частоте 180 Мгц

Таким образом, смещение верхних ветвей происходит навстречу друг другу и точка их пересечения определяет ту граничную частоту, ниже которой поглощение отсутствует. Из-за большой крутизны частотно-полевой зависимости ФМР в исследованном диапазоне частот, граничная частота очень чувствительна к температуре и мощности. "Ядерно-подобные" участки этих электронно-ядерных ветвей по вышеуказанной причине экспериментально не наблюдаются.

Нижние электронноядерные ветви находятся в областях, соответствующих устойчивым много-и однодоменному состояниям, и поэтому могут

быть экспериментально исследованы полностью. Изменение частоты эхо-сигналов при движении по этим ветвям достигало в наших экспериментах 60 Мгц. При этом амплитуда эхо-сигнала постепенно уменьшается и измерения на более низких частотах импульсной методикой становятся затруднительными. Необходимо отметить, что подобные зависимости могут быть получены также и при температуре 4,2 К, однако с худшим разделением электронно-ядерных ветвей.

На рис. 3 показано изменение скорости поперечной релаксации электронно-ядерных колебаний в зависимости от величины внешнего магнитного поля, измеренной по спаду сигналов эхо при увеличении расстояния между возбуждающими импульсами. Данные приведены для температуры 1,5 К и частоты 180 Мгц. Как видно из рисунка, поведение скорости поперечной релаксации подобно данным рис. 1. Максимумы затухания практически совпадают со значениями собственных частот связанных электронно-ядерных колебаний.

Наконец, сравним полученные экспериментальные данные с некоторыми выводами теории. По данным Портиса, а также Игнатченко и Цифриновича максимальное значение величины раздвижки есть ω_x , что для температуры в 1,5 К составляет $\omega_x/2\pi \approx 480$ Мгц. По данным Ботвинко и Иванова раздвижка определяется из формулы:

$$\omega_x = \sqrt{cn} \omega_0,$$

где, c — концентрация магнитных ядер, n — параметр динамической связи, который для ядер кобальта составляет примерно $14/TK$, ω_0 — частота невозмущенного ЯМР. Для $T = 1,5$ К и $c = 0,4$ эта величина составляет примерно 400 Мгц. Величина раздвижки электронно-ядерных ветвей в нашем эксперименте может быть вычислена из анализа кривых в нижней части рис. 2. Если считать, что приведенные там электронно-ядерные ветви одним концом приближаются к значению невозмущенного ФМР в области нулевых частот, а другим — к частоте невозмущенного ЯМР, то видно, что величина раздвижки не превышает максимального значения вычисленного из теории.

Институт металлофизики
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
12 сентября 1978 г.

Литература

- [1] В.А.Игнатченко, Ю.А.Куденко. Изв. АН СССР, сер. физ., **30**, 77, 1966.
- [2] А.Н.Погорелый, В.В.Котов. Письма в ЖЭТФ, **14**, 305, 1971.
- [3] A.M.Portis. AIP Conf. Proc. (USA), N10, Pt1, 120, 1972.
- [4] М.Н.Ботвинко, М.А.Иванов. ФТТ, **15**, 1704, 1973.
- [5] В.А.Игнатченко, В.И.Цифринович. Препринт ИФ СО АН СССР-29Ф, стр.8, Красноярск, 1975.