

УДК 538.245  
© 1990

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В ТОНКИХ СЛОЯХ ОДНООСНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Ю. Ф. Огрин, С. В. Мериакри, И. И. Петрова

Исследовано влияние толщины пластин одноосного ферромагнетика на спектр электромагнитно-спиновых возбуждений. Наблюдение прохождения СВЧ сигнала через пластины гексаферрита бария позволило сделать заключение о зависимости доменной структуры от толщины образца.

В настоящее время большим вниманием исследователей пользуются одноосные ферромагнетики с большим полем анизотропии ( $H_A \geq 10$  кЭ), позволяющим изучать электромагнитные и спиновые возбуждения на частотах 100 ГГц и выше. Большое количество работ в этом направлении посвящено изучению магнитостатических колебаний (однородных и неоднородных) в однодоменных и многодоменных образцах таких материалов [1]. Некоторые работы посвящены исследованию процессов возбуждения и распространения электромагнитных и спиновых волн в пленках и пластинах одноосных ферритов. В работе [2] проведен теоретический расчет в магнитостатическом приближении ( $\omega/c \rightarrow 0$ ) спектра магнитостатических волн в пластине одноосного феррита с полосовой доменной структурой. Отмечен ряд особенностей в спектре, связанный с наличием доменной структуры. Расчет полного спектра электромагнитных возбуждений в одноосном феррите с полосовой доменной структурой и легкой осью, перпендикулярной плоскости слоя, был проведен в [3]. Было показано, что учет электромагнитного запаздывания приводит к появлению в спектре новых ветвей, отсутствующих в магнитостатическом приближении. Развитием цитируемой работы стала работа [4], где рассматривалась структура диэлектрик—феррит—металл во внешнем магнитном поле. В этой структуре легкая ось  $C_0 \parallel H_0$  и перпендикулярна плоскости слоя. Экспериментальному изучению бегущих магнитостатических волн в пластинах одноосного ферромагнетика (гексаферрита бария) посвящена работа [5], в которой наблюдаемая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) интерпретировалась на основе предположения о возбуждении прямых объемных магнитостатических волн. В работе [6] получено дисперсионное уравнение для полного спектра электромагнитных возбуждений в пластине ферромагнетика с касательным намагничиванием с учетом электромагнитного запаздывания. Показано, что весь спектр возбуждений в пластине разбивается на четыре типа мод: объемные электромагнитные моды, поверхностная электромагнитная мода, поверхностная спиновая мода, объемные спиновые моды. Определен характер дисперсионных кривых для некоторых из них. Отметим, что в этой работе не проанализированы дисперсионные зависимости объемных спиновых мод, занимающих основную часть спектра спинового типа ( $\omega \rightarrow \text{const}$ ,  $q \rightarrow \infty$ ).

Цель данной работы — выявление характера зависимости дисперсионных кривых объемных спиновых мод от толщины пластин  $d$  ферромагнетика и экспериментальное исследование прохождения СВЧ сигнала через пластины гексаферрита бария различных толщин в области частот су-

ществования объемных спиновых мод и поверхностных электромагнитной и спиновой мод (25—50 ГГц).

Анализ дисперсионного уравнения показал, что дисперсионные кривые  $\omega(q)$  объемных спиновых мод располагаются в области  $\omega < \omega_0$  ( $\omega_0$  — частота поперечного ФМР) и начинаются на кривой светового конуса ( $\omega = qc$ , где  $q$  — продольное волновое число), а частоты отсечки задаются уравнениями

$$kd = \pi(n + 1), \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left[ 1 - \frac{\epsilon(\omega_H + \omega_m)^2 - \epsilon\omega^2}{\omega_H(\omega_H + \omega_m) - \omega^2} \right]. \quad (1)$$

$k$  — поперечное волновое число;  $\omega_H = 2\pi\gamma H$ ;  $\omega_m = 2\pi\gamma 4\pi M_S$ ;  $\gamma$  — гиромагнитная постоянная;  $4\pi M_S$  — намагниченность насыщения. Причем при минимальном значении  $q$  по толщине пластины укладывается число полуволн, равное номеру моды, а при увеличении  $q$  в каждой моде величина  $k$  увеличивается и вблизи частоты  $\omega_0$   $k \rightarrow \infty$ . Число объемных спиновых мод вблизи этой частоты также неограниченно растет. Зависимости  $\omega(q)$  для этих типов волн при уменьшении  $d$  изменяются таким образом, что при заданном значении  $q$  стягиваются в область насыщения (т. е. к линии  $\omega = \omega_0$ ), а при заданном значении  $\omega$  — к прямой светового конуса. Анализ дисперсионных кривых поверхностных спиновой и электромагнитной мод показал некоторое расхождение с результатами работы [6], в которой дисперсионные кривые обеих мод выходят из точки пересечения светового конуса и прямой поперечного ФМР. Точное решение показывает, что дисперсионная кривая электромагнитной ветви начинается в окрестности частоты  $\omega = \omega_H + (\omega_m/2)$  на световом конусе, а кривая спиновой ветви выходит из точки, находящейся на линии поперечного ФМР, но при  $q = (\omega_H + \omega_m) \sqrt{(\omega_H/\omega_m)}/c$ .

На основании особенностей в законе дисперсии, полученных в [6], и в результате анализа, представленного выше, можно ожидать, что в частотной зависимости интенсивности прошедшей через пластину волны следует ожидать полосу подавления, ширина которой будет уменьшаться при уменьшении  $d$ . При этом высокочастотный край полосы, определяемый началом поверхностной электромагнитной моды, смещаться не должен.

Экспериментально исследовались АЧХ устройства, состоящего из двух отрезков волновода, оканчивающихся запредельными частями, между которыми размещалась исследуемая пластина гексаферрита, скошенные концы которой выходили из запредельной части в середине волновода так, что плоскость пластины была параллельна узкой грани волновода. Исследовались пластины толщиной 1—0.1 мм, шириной 5 мм и длиной 20—30 мм. Параметры исследуемого материала:  $H_A = 12.5$  кЭ,  $4\pi M_S = 3.2$  кГс,  $\epsilon = 15$ ,  $\text{tg } \delta \approx 10^{-3}$ . Измерения проводились с использованием панорамных измерителей Р2-65, Р2-68 в диапазоне частот 25—50 ГГц. Максимальный уровень затухания, измеряемый этими приборами, составляет  $\approx 50$  дБ. Поэтому при измерениях более высоких уровней затухания использовалась вторая методика, в которой измерения проводились на фиксированных частотах СВЧ генератора (Г4-141). При этом сигнал после детекторной секции измерялся высокочувствительным усилителем низкой частоты, настроенным на частоту амплитудной модуляции входного СВЧ сигнала. Кроме того, эта методика позволяла использовать также и модуляционный метод измерения. В этом случае на вход устройства подавался непрерывный СВЧ сигнал, а измерения проводились на частоте модуляции внешнего магнитного поля с глубиной  $\approx 2 \div 3$  Э. Таким способом можно было выделить в распространяющихся волнах часть, за которую ответственна магнитная подсистема.

На рис. 1 представлены типичные АЧХ устройства с пластинами ГФ различных толщин в нулевом магнитном поле  $H_0$ . На АЧХ наблюдаются полосы загашения с величиной подавления больше 50 дБ (поэтому «дно» полосы имеет срезанный вид). Левый край полосы пологий, а правый более резкий. При уменьшении толщины пластины ширина полосы  $\Delta f$ ,

измеряемая по уровню  $\approx 3$  дБ от нижней части АЧХ, изменяется от  $\Delta f \approx \approx 12$  ГГц для  $d=0.7-0.4$  мм до  $\Delta f \approx 2-3$  ГГц для  $d \approx 0.15$  мм. При этом частота левого края монотонно сдвигается в область более высоких частот и становится равной 39—40 ГГц для  $d \approx 0.15$  мм. Частота правого края полосы для  $d \approx 0.7-0.3$  мм остается постоянной и равной 48 ГГц и резко снижается при  $d 0.3$  мм. Резкость верхнего и пологость нижнего края полосы поглощения объясняются зависимостью групповой скорости  $V_{гр}$  от частоты. В соответствии с анализом дисперсионных кривых  $V_{гр}$  резко возрастает при переходе из области возбуждения поверхностной спиновой волны в область существования поверхностной электромагнитной. И, наоборот, при понижении частоты в области объемных спиновых волн  $V_{гр}$  спадает более плавно. Очень большую полосу заграждения ( $\approx 12$  ГГц для

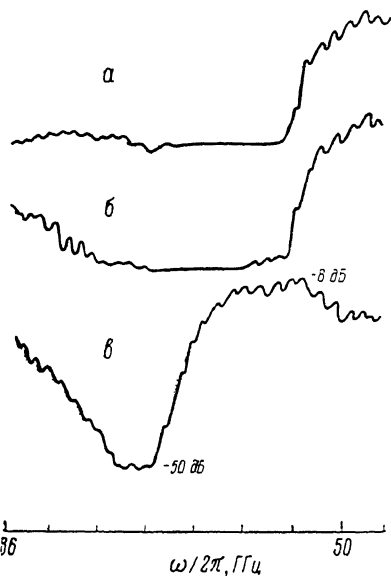


Рис. 1. АЧХ устройств с пластинами ГФ различной толщины в нулевом магнитном поле.

Толщина, мм: а — 0.39, б — 0.3, в — 0.1.

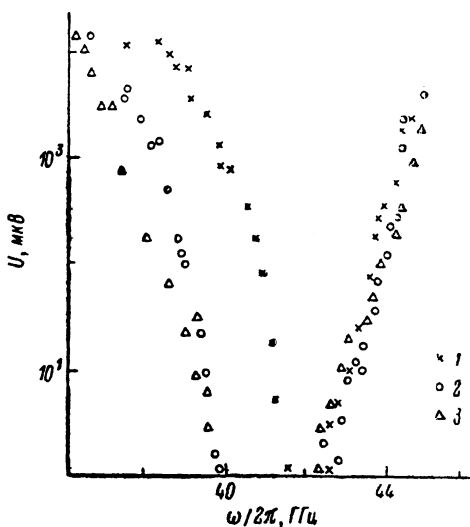


Рис. 2. АЧХ устройств с пластинами ГФ различной толщины во внешнем поле  $H_0=600$  Э.

Толщина, мм: 1 — 0.2, 2 — 0.3, 3 — 0.39.

толстых образцов) можно объяснить наличием доменной структуры, расширяющей из-за междоменных размагничивающих полей спектр электромагнитных возбуждений в сторону больших частот [7]. Сужение полосы поглощения при уменьшении толщины пластин происходит из-за смещения левого края полосы, происходящего, как уже отмечалось, вследствие перегруппировки дисперсионных кривых объемных спиновых волн в область насыщения и к прямой светового конуса. При этом правый край полосы должен оставаться на месте. Резкое смещение правого края в область более низких частот для пластины  $d < 0.3$  мм позволяет сделать предположение о том, что в тонких пластинах ГФ при включении внешнего поля сохраняется квазимонодоменное состояние. Опыты по влиянию внешнего поля на вид АЧХ подтверждают эти предположения. Включение внешнего поля приводит к смещению левого края АЧХ в сторону больших частот (из-за увеличения внутреннего поля) для всех значений  $d$ , правый же край для толстых пластин смещается в сторону меньших частот (так как исчезновение доменов сдвигает границу спектра гораздо сильнее, чем увеличение внутреннего поля), а для тонких пластин — в сторону больших, как и должно быть в случае монодоменного состояния. Выше уже отмечалось, что во внешнем магнитном поле АЧХ устройств с разными толщинами пластин ГФ должны иметь полосы заграждения, правый край которых совпадает, а полоса тем меньше, чем тоньше пла-

стина. Это продемонстрировано на рис. 2, где представлены АЧХ, измеренные с использованием методики второго типа. Уровень затухания в полосе заграждения составляет 70—80 дБ.

Следует отметить, что при  $d < 0.1$  мм на АЧХ полоса заграждения вообще не наблюдается. По-видимому, это связано с тем, что при этих толщинах ширина полосы заграждения становится меньше ширины естественного ФМР и поэтому не наблюдается.

В заключение необходимо добавить, что первые результаты по наблюдению полосовой доменной структуры в исследуемых пластинах гексаферрита бария подтверждают предположения о монокристаллическом состоянии пластин при  $d < 0.1$  мм.

Авторы выражают искреннюю благодарность за полезные дискуссии П. Е. Зильберману, В. В. Тарасенко, Ю. И. Беспятым, В. Д. Харитонову и Е. Е. Чигряй за любезно предоставленную измерительную аппаратуру.

#### Список литературы

- [1] Костенко В. И., Сигал М. А. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 4. С. 1217—1219.
- [2] Зависляк И. В., Данилов В. В. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. № 2. С. 72—76.
- [3] Головкин Я. Д., Зависляк И. В. // УЖФ. 1986. Т. 31. № 8. С. 1158—1160.
- [4] Головкин Я. Д., Зависляк И. В., Костенко В. И., Сигал М. А. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 11. С. 3492—3494.
- [5] Игнатьев А. А., Лепесткин А. Н. // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 9. С. 1829—1831.
- [6] Gerson T. J., Nadau J. S. // IEEE Trans. MTT. 1974. V. 22. N 8. P. 757—763.
- [7] Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука. 1973. С. 591.

Институт радиотехники и электроники  
АН СССР  
Фрязино  
Московская область

Поступило в Редакцию  
25 января 1989 г.  
В окончательной редакции  
11 августа 1989 г.