

ГИГАНТСКИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ПРОХОЖДЕНИЯ КВАЗИПОВЕРХНОСТНОЙ СПИНОВОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ТОНКУЮ ПЛЕНКУ ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА (ЖИГ)

*Ю.В.Гуляев, А.С.Бугаев, П.Е.Зильберман,
И.А.Игнатъев, А.Г.Коновалов, А.В.Луговской,
А.М.Медников, Б.Л.Нам, Е.И.Николаев*

Впервые экспериментально наблюдаются и интерпретированы предсказанные ранее в работе [1] гигантские осцилляции коэффициента прохождения волны Дэймона и Эшбаха (ДЭ) [2] через тонкую эпитаксиальную пленку ЖИГ.

Изучалось возбуждение и распространение квазиповерхностной спиновой волны (СВ) в структуре, показанной на рис. 1. Монокристаллические пленки ЖИГ на стандартной [111] подложке из гадолиний-галиевого граната были получены жидкофазной эпитаксией [3] из раствора-расплава $(Y_2O_3 - Fe_2O_3)(PbO - B_2O_3)$. Толщины пленок менялись в пределах 1,1 – 28 мкм. Измеренная ширина линии ФМР составляла $\lesssim 0,49$ во всем используемом нами диапазоне частот $\nu = 3 - 9$ ГГц. На свободную поверхность пленок фотолитографически наносились тонкие ($\lesssim 0,5$ мкм) золотые микрополоски с шириной ≈ 10 мкм, которые служили передающей и приемной антеннами. Расстояние между микрополосками $L \approx 4$ мм, длина полосок ≈ 3 мм. Структура помещалась в магнитное поле H_0 , параллельное полоскам. В выходном тракте ставился вентиль, полностью гасящий СВЧ мощность, отражаемую приемником.

Измерения времени задержки СВЧ импульса показали, что антенны возбуждают волну ДЭ – задержка монотонно убывала с ростом H_0 [4]. В этих условиях при непрерывном режиме работы для пленок с толщинами $a < 6$ мкм обнаружилась осцилляционная зависимость принимаемой мощности $P_{\text{вых}}$ от H_0 и ν . Типичные экспериментальные кривые (снятые самописцем) показаны на рис. 2. Кривая 1 представляет зависимость $f(H_0) = \{10 \lg(P_{\text{отр}}/P_0) - 8,5\}$, где P_0 – мощность СВЧ генератора, а $P_{\text{отр}}$ – мощность, отражаемая передающей антенной. Зная $f(H_0)$, можно рассчитать отбираемую антенной мощность $(P_0 - P_{\text{отр}})$.

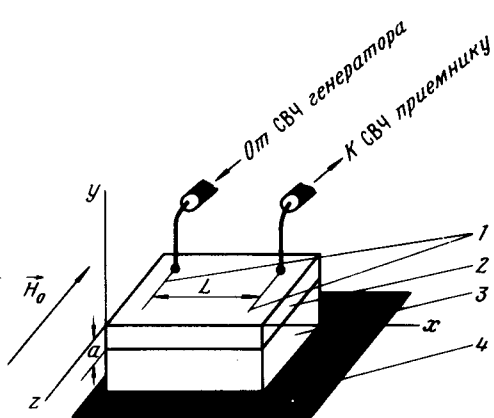


Рис. 1. Слоистая структура: 1 — микрополоски, 2 — пленка ЖИГ, 3 — подложка, 4 — металлическое основание

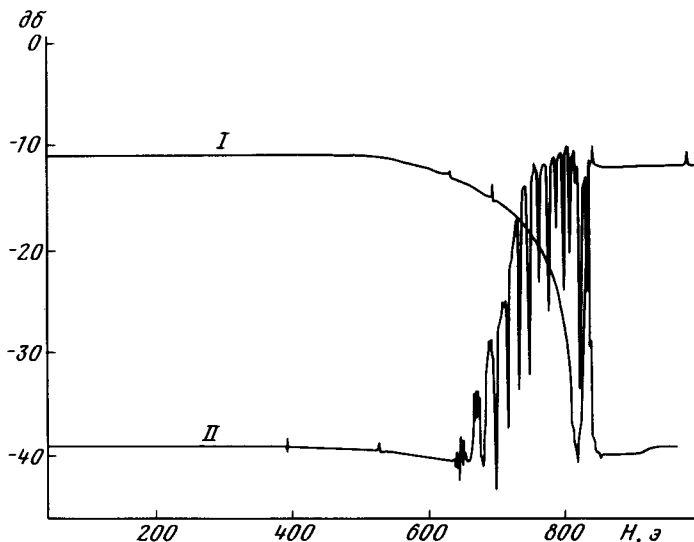


Рис. 2

При $H_0 \rightarrow 0$ последняя тратится в проводниках и на излучение. Видно, что такие потери слабо зависят от H_0 . В интервале полей (623–819) Э, в котором существуют волны ДЭ, отбираемая мощность начинает сильно зависеть от H_0 и увеличивается. Это показывает, что часть отбираемой мощности теперь идет на возбуждение волн ДЭ, и позволяет оценить эффективность возбуждения. Существенно, что согласно I, входная мощность СВ $P_{\text{вх}}$ не осциллирует в зависимости от H_0 . Кривая II представляет в децибелах сигнал на приемной антенне $K(H_0) = 10 \lg(P_{\text{вых}}/P_0)$. Наблюдаемые осцилляции этого сигнала нельзя объяснить интерференцией в выходном тракте. Пики интерференции (между наводкой и СВ, включая СВ, обтекающие пленку по границе с подложкой) находятся из условия $q_x(H_0)L \sim n\pi$, где $q_x(H_0)$ — волновое число волны ДЭ, а n — целое число. Отсюда расстояние между пиками по оси H_0 получается для наших параметров $\sim 4 \cdot 10^{-2}$ Э, что почти на три порядка меньше экспериментального периода осцилляций на рис. 2. Интерференция фактически наблюдается только на крайнем левом участке области осцилляций, что можно объяснить ослаблением здесь амплитуды СВ, которая становится сравнимой с амплитудой наводки.

С другой стороны, число и положение провалов на рис. 2 в точности совпадает с числом и положением линий поперечного спин-волнового резонанса (СВР) [5], которые при $n \gg 1$ находятся из условия $q_y(H_0, \nu) = n\pi$, где

$$q_y(H_0, \nu) = \sqrt{\frac{2\pi}{a}} \sqrt{\sqrt{1 - (\beta/4\pi) + (4\nu^2/\nu_m^2)} - 1 + (\beta/4\pi) - (2\nu_H/\nu_m)}, \quad (1)$$

$a = 3,3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ — постоянная неоднородного обмена ЖИГ, $\nu_H = \gamma H_0$ ($\gamma = 2,8 \text{ ГГц/кЭ}$), $\nu_m = 4\pi\gamma M_0$, $4\pi M_0 = 1760 \text{ Гс}$, кубической анизотропией пренебрежено и $\beta M_0 = 130 \text{ Э}$ — постоянная осевой объемной анизотропии пленки (β находилась из условия совпадения правой границы спектра ДЭ с резонансным полем однородной прецессии). Величина $q_y(H_0, \nu)$ есть волновое число объемных СВ, бегущих нормально к поверхности пленки. Согласно [1], такие волны могут излучаться волной ДЭ в пленке, если имеются скачки анизотропии на ее поверхностях. При наступлении СВР в плоскопараллельном резонаторе пленке запасается наибольшая энергия, которая берется от волны ДЭ, что и объясняет, по нашему мнению, провалы $P_{\text{ВЫХ}}$ на рис. 2. Это объяснение согласуется со всей совокупностью экспериментальных данных. В частности, по мере увеличения толщины "а" пленки осцилляции $P_{\text{ВЫХ}}$ постепенно ослабевают и при $a > 6 \text{ мкм}$ исчезают совсем. При достаточно больших "а" (критерий см. в [1]) излучаемые в глубь пленки СВ затухают, не успевая дойти до противоположной грани и отразиться. При этом затухание волны ДЭ должно монотонно зависеть от H_0 [6], что и наблюдается. Мы построили теорию распространения волны ДЭ в тонкой пленке, обобщающую [1] на случай произвольных значений $(2q_x a)$ и учитывающую анизотропию. На основе этой теории была вычислена зависимость $K(H_0)$ и сравнена с экспериментальной кривой II на рис. 2.

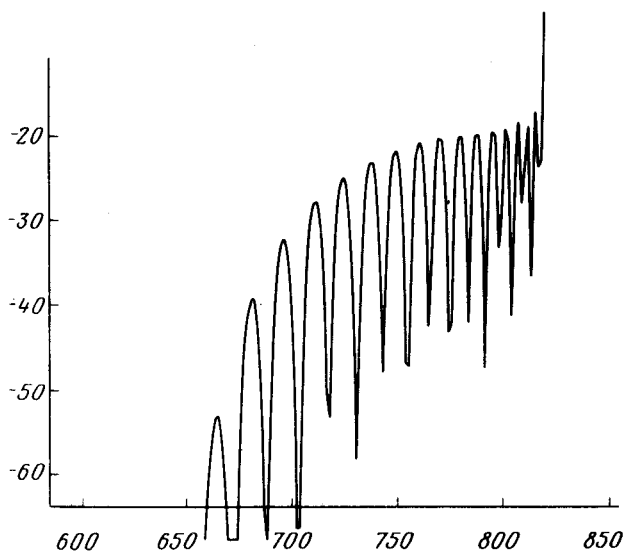


Рис. 3

Для получения наилучшего согласия параметр закрепленности спинов на поверхности $|d_s|$ [5] взят равным $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ для свободной и $1,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ для граничащей с подложкой поверхностей пленки ($d_s < 0$). Такие значения d_s ле-

жат в разумных пределах [5]. Теоретическая кривая $K(H_0)$ показана на рис.3. Как видим, она дает правильное общее описание всей картины осцилляций.

В работе [7] наблюдались изломы спектра волны ДЭ, объясняемые возбуждением СВР. Однако в [7] это был относительно слабый эффект. В нашем случае речь идет не о спектре, а о затухании. При этом получают гигантские осцилляции затухания (сравнимые с ним самим). Обнаруженное явление интересно тем, что раскрывает нетривиальную структуру волны ДЭ в тонких ферромагнитных пленках с узкой линией ФМР. Существование максимумов пропускания нужно учитывать в предпринимаемых попытках наблюдать усиление волны ДЭ током электронов в структурах с прилегающим полупроводником.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 августа 1979 г.

Литература

- [1] Ю.В.Гуляев, П.Е.Зильберман, А.В.Луговской. ФТТ, 21, 949, 1979.
 - [2] R.W.Daman, J.R.Eshbach. J. Phys. Chem. Sol., 19, 308, 1961.
 - [3] H.L.Livinstein, R.W.Landorf, S.Licht. IEEE Trans Mag., 8, 375, 1971.
 - [4] L.K.Brundle, N.J.Freedman. Electr. Lett., 4, 132, 1968.
 - [5] Н.М.Саланский, М.Ш.Ерухимов. Физические свойства магнитных пленок, Наука СО, 1975, стр. 40.
 - [6] Ю.И.Беспярых, В.И.Зубков, В.В.Тарасенко. ФТТ, 19, 3409, 1977.
 - [7] W.Schilz. Philips Res. Repts., 28, 50, 1978.
-