

05;12

## Спектр и потери поверхностных магнитостатических волн в одномерном магнетонном кристалле

© С.Л. Высоцкий, С.А. Никитов, Н.Н. Новицкий, А.И. Стогний, Ю.А. Филимонов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал  
410019 Саратов, РоссияИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
103907 Москва, РоссияГНПО „Научно-практический центр НАНБ по материаловедению“,  
220072 Минск, Белоруссия

e-mail: vysotsl@gmail.com

(Поступило в Редакцию 18 июня 2010 г.)

Экспериментально исследованы спектр и потери на распространение поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) в одномерном ферритовом магнетонном кристалле в зависимости от угла  $\varphi$  между направлениями волновых векторов ПМСВ и периодической решетки кристалла. Описано изменение положения брэгговских запрещенных зон при изменении угла  $\varphi$ . В узком интервале углов  $\varphi \approx 57^\circ$  обнаружено возникновение широкой полосы непропускания вблизи длинноволновой границы ПМСВ  $f_0$ . При  $70 < \varphi < 90^\circ$  показано существование магнитостатической волны с волновым вектором, перпендикулярным направлению поля подмагничивания, на частотах ниже  $f_0$ .

В последние годы наблюдается всплеск интереса к исследованию распространения дипольных магнитостатических волн (МСВ) в пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ), на поверхности которых вытравлены одно- или двумерные периодические решетки — магнетонных кристаллах. Рассмотрено возникновение полос непропускания в спектре поверхностных (ПМСВ), прямых объемных (ПОМСВ) и обратных объемных (ООМСВ) волн [1–4], процессы параметрической неустойчивости [5] и формирования солитонов [6] ПМСВ. Однако как в недавних работах, так и в исследованиях одномерных МК, проведенных в 1990 гг., направления волновых векторов МСВ  $\mathbf{q}$  и периодической решетки  $\mathbf{Q}$ , как правило, совпадали. Известно лишь несколько работ, в которых угол между  $\mathbf{q}$  и  $\mathbf{Q}$  выбирался не равным нулю. В [7] теоретически исследовалось наклонное падение ПМСВ на участок пленки с синусоидально неровной поверхностью. Направление ПОМСВ на отражающую решетку под углом  $45^\circ$  было использовано при разработке фильтров СВЧ [8]. Теоретическое исследование распространения ПМСВ в пленке ЖИГ с периодически модулированным внутренним магнитным полем при произвольной ориентации векторов  $\mathbf{q}$  и  $\mathbf{Q}$  и экспериментальные измерения при  $\varphi = 0–35^\circ$  были проведены в [9].

Целью настоящей работы является изучение спектра и потерь на распространение ПМСВ в одномерном ферритовом МК при изменении угла  $\varphi$  в интервале  $0–90^\circ$ .

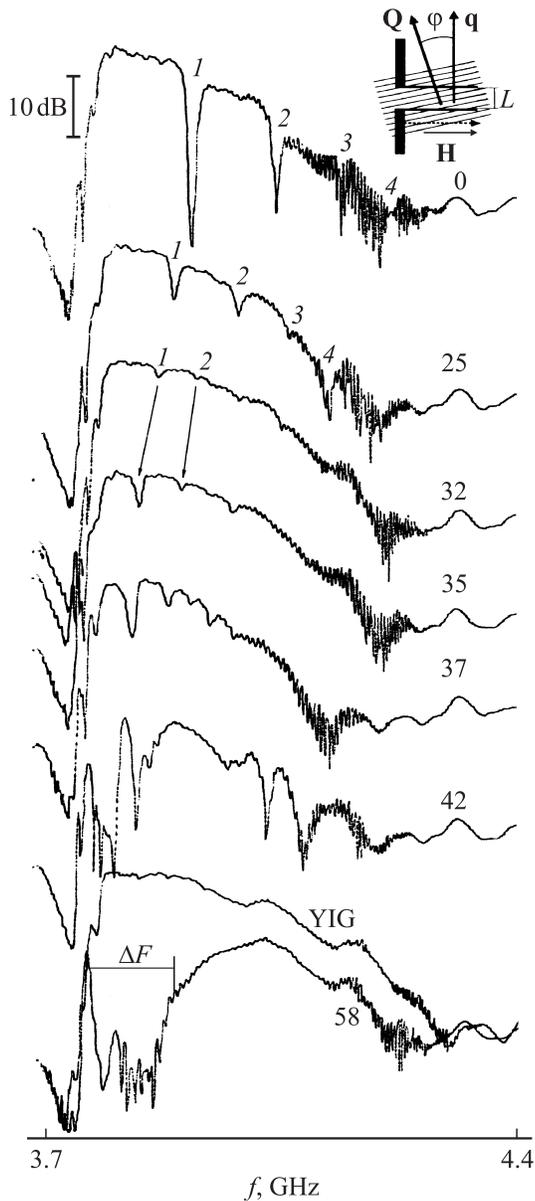
Исследованный МК был изготовлен из прямоугольной пленки ЖИГ плоскостным размером  $9 \times 9$  мм, толщиной  $4.1 \mu\text{m}$ , с намагниченностью насыщения  $4\pi M_0 = 1750$  Gs, шириной линии ферромагнитного резонанса  $0.6$  Oe. По всей поверхности пленки с помощью ионно-лучевого распыления [10] формировалась пери-

одическая структура из канавок глубиной  $0.7 \mu\text{m}$ , шириной  $70 \mu\text{m}$  с периодом решетки  $d = 100 \mu\text{m}$ . Образец располагался в микрополосковой линии задержки (ЛЗ) на преобразователях длиной  $4$  мм, шириной  $30 \mu\text{m}$ , расстояние между которыми составляло  $L = 2, 3$  и  $4$  мм, и поворачивался на угол  $\varphi$  с точностью не хуже  $1^\circ$  (см. вставку к рис. 1). Измерения амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик выполнялись с использованием измерителя разности фаз и ослабления ФК2-18 по стандартной схеме включения ЛЗ в разрыв измерительного тракта.

На рис. 1 представлены АЧХ, полученные при  $L = 3$  мм и величине направленного вдоль микрополосковых преобразователей постоянного магнитного поля  $H = 727$  Oe. Числа около кривых соответствуют величине угла  $\varphi$ . Видно, что при  $\varphi = 0$  АЧХ содержит полосы увеличения затухания ПМСВ, отмеченные номерами 1–4. Центральным частотам полос с номерами 1 ( $f_1$ ) и 2 ( $f_2$ ) отвечают ярко выраженные минимумы АЧХ, величина затухания в которых („глубина пика затухания“) соответственно на  $\sim 30$  и  $\sim 15$  dB больше, чем на прилегающих к полосам частотах. Полосы 3 и 4 находятся в области сильной интерференции ПМСВ и прямой электромагнитной наводки; отвечающие им частоты определялись по минимуму уровня АЧХ ( $f_3$ ) или как центр области „замирания“ интерференции ( $f_4$ ). Соответствующие частотам  $f_1–f_4$  длины волн  $\lambda_1–\lambda_4$  были оценены с использованием ФЧХ в предположении, что набег фазы  $\theta(\varphi)$  ПМСВ связан с ее волновым числом соотношением  $q(f) = 2\pi/\lambda(f) = \theta(f)/L$ , и оказались в хорошем соответствии с расчетом по известному соотношению Брэгга

$$2d \cos \varphi = n\lambda$$

при  $n = 1, 2, 3, 4$ .

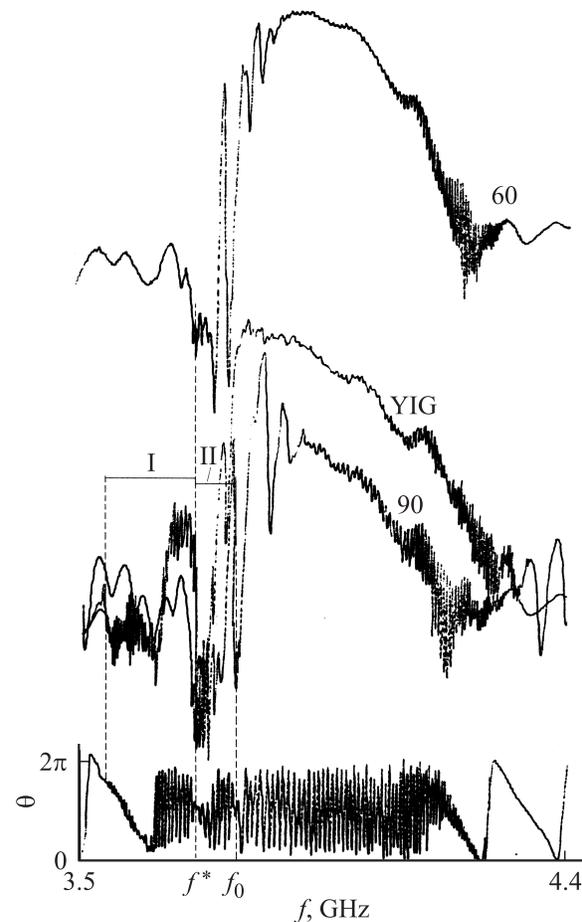


**Рис. 1.** АЧХ микрополосковой линии задержки с одномерным МК. Цифрами отмечены полосы непропускания. Числа у кривых отвечают величине угла  $\varphi$ , кривые с отметкой YIG получены для пленки железо-иттриевого граната.

При увеличении  $\varphi$  от 0 до 32° частоты  $f_1$ – $f_4$  уменьшаются (см. рис. 1) аналогично поведению центральной частоты единственной экспериментально наблюдававшейся в [9] полосы увеличения затухания ПМСВ в исследованном интервале 0–35°. Глубина пиков 1 и 2 также монотонно уменьшается и при  $\varphi = 32^\circ$  не превышает 1 dB (см. рис. 1). Однако в интервале 32–37° при продолжении смещения вниз по частоте (показано на рис. 1 стрелками) глубина этих пиков растет, а дальнейшее увеличение приводит к усложнению вида АЧХ — число пиков увеличивается (см. кривую для 37°), возникают высокочастотные участки усиления затухания (42°). Наконец, в интервале углов 56–58° в длинноволновой

части АЧХ формируется полоса  $\Delta F$  шириной примерно 200 MHz (см. рис. 1), затухание ПМСВ в которой более чем на 20 dB увеличивается по сравнению со случаем пленки ЖИГ (ср. кривые, помеченные 58° и YIG). Уже при  $\varphi = 60^\circ$  эта область трансформируется в серию затухания, глубина которых монотонно убывает с ростом частоты (см. рис. 2, кривая 60°).

Дальнейшее увеличение  $\varphi$  слабо влияет на вид АЧХ в области частот  $f > f_0$ , где  $f_0 = \gamma \sqrt{H(H + 4\pi M_0)}$  — длинноволновая граница спектра ПМСВ [11],  $\gamma = 2.8 \text{ MHz/Oe}$  — гиромагнитное отношение в ЖИГ. Однако в интервале углов  $70 < \varphi < 90^\circ$  наблюдается распространение МСВ при  $f < f^* < f_0$  — см. область I на рис. 2 на АЧХ при  $\varphi = 90^\circ$  (в сравнении со случаем пленки ЖИГ) и ФЧХ. Причина их возникновения связана, по-видимому, с тем, что при величинах  $\varphi$ , близких к 90°, участки поверхности МК, расположенные между канавками, могут рассмариваться как узкие поперечно намагниченные волноводы, в которых МСВ с волновым вектором  $\mathbf{q} \perp \mathbf{H}$  могут существовать на частотах  $f < f_0$  [12]. При  $\varphi = 90^\circ$  ширина области I составляет  $\sim 150 \text{ MHz}$ , что хорошо согласуется с результатами расчета аналогично [12]. Наличие сигнала в



**Рис. 2.** АЧХ микрополосковой линии задержки с одномерным МК. Числа у кривых отвечают величине угла  $\varphi$ , кривые с отметкой YIG получены для пленки железо-иттриевого граната.

интервале  $f^* - f_0$  (область II на рис. 2) обусловлено паразитным возбуждением ООМСВ широкой ( $\sim 0.5$  mm) частью микрополосковой линии (см. пунктир на вставке к рис. 1) и наблюдалось при всех измерениях как в МК, так и в пленке ЖИГ.

Таким образом, в работе проведено исследование распространения ПМСВ в одномерном магнетном кристалле на основе пленки ЖИГ в условиях неколлинеарной дифракции. Показано, что при увеличении угла  $\varphi$  от 0 до  $\sim 32^\circ$  центральные частоты брэгговских полос пропускания уменьшаются. Дальнейшее увеличение угла  $\varphi$  сопровождается ростом затухания ПМСВ вблизи длинноволновой границы, где в узком интервале углов вблизи  $\varphi \sim 57^\circ$  наблюдается широкая полоса непропускания. При  $70 < \varphi < 90^\circ$  обнаружено существование МСВ с волновым вектором  $\mathbf{q} \perp \mathbf{H}$  на частотах ниже  $f_0$ .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 08-07-119-а, 08-02-00785-а, 09-07-00186-а), Федеральной целевой программы „Кадры“ (ГК № 02.740.11.0014), Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП 2.1.1/2695).

## Список литературы

- [1] *Высоцкий С.Л., Никитов С.А., Филимонов Ю.А.* // ЖЭТФ. 2005. Т. 128. С. 636–644.
- [2] *Chumak A.V., Serga A.A., Wolff S. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. P. 172 511.
- [3] *Ysotsky S.L., Nikitov S.A., Filimonov Yu.A., Pavlov E.S.* // Abstr. Int. Conf. „Functional Materials“. Crimea, Partenit, 2007. P. 301.
- [4] *Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 022 508.
- [5] *Высоцкий С.Л., Кожевников А.В., Казаков Г.Т.* и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15. № 3. С. 58–73.
- [6] *Дроздовский А.В., Черкасский М.А., Устинов А.Б.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. Вып. 1. С. 17–22.
- [7] *Гуляев Ю.В., Никитов С.А.* // ФТТ. 1982. Т. 23. С. 3678–3679.
- [8] *Castera J.P., Volluett G., Hartemann P.* // Ultrasonics Symposium. 1980. P. 514.
- [9] *Вороненко А.В., Герус С.В., Харитонов В.Д.* // Изв. вузов. Физика. 1988. Т. 31. № 11. С. 76–85.
- [10] *Стогний А.И., Серов А.А., Корякин С.В., Паньков В.В.* // ПТЭ. 2008. Т. 2. С. 162–165.
- [11] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
- [12] *O'Keeffe T.W., Patterson R.W.* // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. P. 4886–4895.