

- [9] Salazar A., Sanchez-Lovega A., Fernandez J.J. // Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 11. P. 4150-4156.
- [10] Fujimori H., Asakura Y., Suzuki K., Uchida S. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. Vol. 26. N 10. P. 1759-1764.
- [11] Wetsel G.C., McDonald F.A. // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 41. N 10. P. 926-928.
- [12] Inglehart L.J., Lepoutre F., Charbonnier F.J. // Appl. Phys. 1986. Vol. 59. N 1. P. 234-240.
- [13] Cielo P., Rousset G., Bertrand L. // Appl. Opt. 1986. Vol. 25. N 8. P. 1327-1334.
- [14] Глазов А.Л., Муратиков К.Л. // Дефектоскопия. 1989. № 9. С. 35-41.
- [15] Глазов А.Л., Муратиков К.Л. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 164-170.
- [16] McDonald F.A., Wetsel G.C., Jamieson G.E. // Can. J. Phys. 1986. Vol. 64. N 9. P. 1265-1268.
- [17] Legal La Salle E., Lepoutre F., Roger J.P.J. // Appl. Phys. 1988. Vol. 64. N 1. P. 1-5.
- [18] Surnev S., Ivanov D. // Rev. Phys. Appl. 1990. Vol. 25. P. 457-462.
- [19] Skumanich A., Fournier D., Boccara A.C., Amer N.M. // Appl. Phys. Lett. 1985. Vol. 47. N 4. P. 402-404.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
6 сентября 1991 г.

05:09  
© 1993 г.

Журнал технической физики, т. 63, в. 4, 1993

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И СПИН-ВОЛНОВЫЕ РЕЗОНАНСЫ В ДВУХСЛОЙНЫХ ФЕРРИТОВЫХ ПЛЕНКАХ

*В.И.Зубков, Э.Г.Локк, А.С.Хе, В.И.Шеглов*

Исследование распространения магнитостатических волн (МСВ) в двухслойных ферритовых пленках (ДФП) актуально для выяснения функциональных возможностей твердотельных устройств аналоговой обработки информации. Хотя распространение поверхностных МСВ (ПМСВ) в ДФП теоретически подробно исследовано <sup>[1-10]</sup>, экспериментальных работ мало <sup>[11-13]</sup>, что связано со сложностью и плохой воспроизводимостью технологии получения ДФП. Ниже приведены результаты экспериментального исследования распространения МСВ в ДФП как без, так и при наличии спин-волновых резонансов (СВР).

Эксперимент проводился на ДФП из слоев легированного галлием и чистого железо-иттриевого граната. Как и в <sup>[11-13]</sup>, измерялись дисперсионные кривые ПМСВ (зависимости частоты ПМСВ  $f$  от ее волнового числа  $k$ ), распространяющихся в направлении, перпендикулярном постоянному магнитному полю  $H_0$  (при  $H_0 = 579$  Э). Как и в <sup>[11,13]</sup>, на всех ДФП обнаружена одноосная анизотропия. Для определения параметров ДФП по дисперсионным кривым на основе <sup>[6]</sup> была создана программа расчета разности между намагниченностью насыщения слоя  $4\pi M^c$  и полем одноосной анизотропии  $H^{a,c}$  по нижней границе частотного диапазона существования соответствующей ветви ПМСВ, а также толщин слоев  $d^c$  по наклону дисперсионных кривых. Если на дисперсионных кривых наблюдались разрывы в некоторых интервалах значений  $f$  и  $k$ , то центральные частоты этих интервалов отождествлялись с частотами серии СВР, в которой СВР отличаются номерами  $n$  (от 0 до  $\infty$ ). По <sup>[14]</sup> рассчитывались

частоты серии СВР (при обменных граничных условиях “свободный и закрепленный поперечный спин”) при варьировании обменной постоянной  $\alpha$ , а значение  $\alpha$  и номера СВР  $n$  выбирались из условия наилучшего совпадения экспериментально измеренных и расчетных частот СВР. Дисперсионные кривые ПМСВ для ДФП 2, 5, 6 и 7 (их параметры даны в нижеследующей таблице) приведены на рис. 1-4, где штриховыми линиями даны расчетные дисперсионные кривые там, где они не совпадают с экспериментальными (сплошные линии).

Результаты по определению параметров ДФП сведены в таблицу, в которой указаны намагниченности насыщения слоев (верхнего —  $4\pi M_{+1}$ , а нижнего —  $4\pi M_{-1}$ ), их толщины (верхнего —  $d_{+1}$ , нижнего —  $d_{-1}$ ), а также наличие или отсутствие СВР в слое. В столбце “1-й способ” даны параметры слоев ( $4\pi M_{\pm 1}^m, d_{\pm 1}^m$ ), которые измерялись изготовителями ДФП на однослойных ферритовых пленках (ОФП), выращенных одновременно с ДФП. В столбце “2-й способ” приведены результаты расчета разницы между намагниченностями насыщения и полями одноосной анизотропии слоев ( $4\pi M_{\pm 1}^c - H_{\pm 1}^{a,c}$ ) и толщин слоев  $d_{\pm 1}^c$  ДФП по экспериментальным дисперсионным кривым. Из сравнения этих столбцов видно, что намагниченности насыщения хорошо совпадают между собой, если поля

Номер ДФП	1-й способ			
	$d_{+1}^m$ , мкм	$4\pi M_{+1}^m$ , Гс	$d_{-1}^m$ , мкм	$4\pi M_{-1}^m$ , Гс
1	18.3	1750	4.9	580
2	8.8	1750	4.5	580
3	6.9	590	15.8	1750
4	6	640	5.9	1750
5	9.6	630	8.7	1750
6	7.4	1200	8.5	1730
7	7.6	1420	10	1780

Продолжение

Номер ДФП	2-й способ					
	$d_{+1}^c$ , мкм	$4\pi M_{+1}^c - H_{+1}^{a,c}$ , Гс	СВР	$d_{-1}^c$ , мкм	$4\pi M_{-1}^c - H_{-1}^{a,c}$ , Гс	СВР
1	20.7	1812	Нет	5	614	Нет
2	9	1802	Нет	5	722	Нет
3	6.5	726	Да	16	1884	Нет
4	6	707	Да	5.8	1875	Да
5	7.2	798	Да	7.4	1908	Да
6	5.7	1317	Да	6.3	1825	Да
7	7.6	1565	Да	7.9	1927	Да

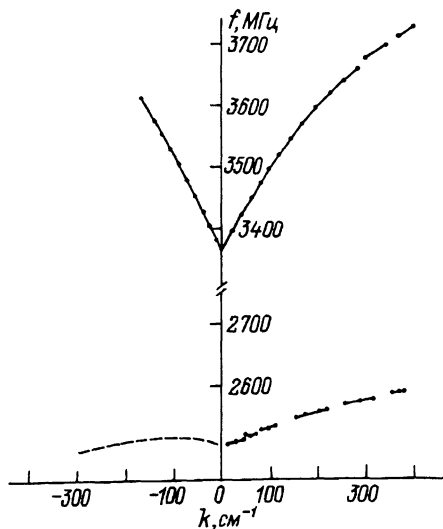
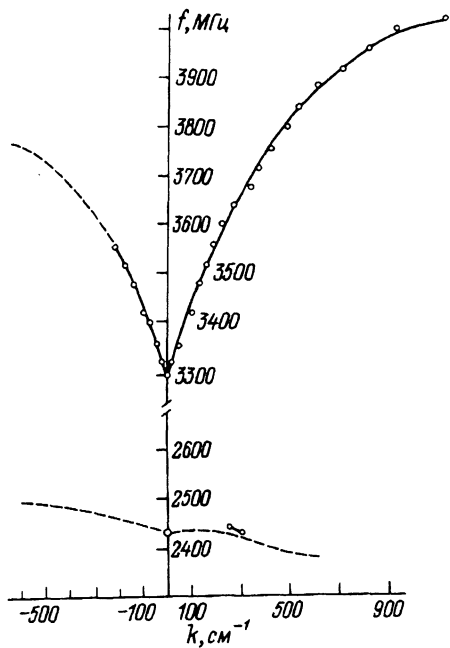


Рис. 1. Дисперсионная зависимость ПМСВ в ДФП 2.

Рис. 2. Дисперсионная зависимость ПМСВ в ДФП 5.

одноосной анизотропии  $H_{\pm 1}^{a,c}$  имеют порядок 120–160 Э, как это показано в [11,13], а толщины слоев ДФП несколько отличаются от таковых в ОФП.

Взяв параметры из таблицы, по критериям, приведенным в [6], легко установить, что в ДФП 1–6 в поле  $H_0 = 579$  Э невозможен резонанс внешней и внутренней ПМСВ, а в ДФП 7 он имеет место. В случае, когда такой резонанс невозможен, ПМСВ распространяются при  $k > 0$  в верхнем слое по границе феррит–воздух, в нижнем слое по границе между ферритовыми слоями, при  $k < 0$  в верхнем слое по границе феррит–феррит, а в нижнем слое по границе феррит–подложка [6].

Из рис. 1–4 видно, что в большинстве ДФП (ДФП 1–6) при  $k < 0$  не возбуждалась одна из двух ветвей ПМСВ: либо ПМСВ, распространяющаяся по границе раздела ферритовых слоев, если верхний слой имел меньшую намагниченность насыщения по сравнению с нижним ( $M_{+1} < M_{-1}$ , ДФП 3–6) (рис. 2–4), либо ПМСВ, распространяющаяся по границе феррит–подложка, при  $M_{+1} > M_{-1}$  (ДФП 1 и 2) (рис. 1). В тех же ДФП, где наблюдаются все ветви ПМСВ (ДФП 7) (рис. 4), указанные ПМСВ возбуждаются лишь в узком интервале волновых чисел (0–50  $\text{см}^{-1}$ ). Отмеченная закономерность обнаруживается и в [11–13].

Из рис. 2–4 видно, что на дисперсионных кривых ПМСВ наблюдаются разрывы, обусловленные СВР. Лучше всего разрешены СВР на дисперсионной кривой ПМСВ, распространяющейся по границе феррит–воздух в верхнем слое ДФП. При распространении ПМСВ по границам нижнего слоя ДФП количество СВР больше на дисперсионной кривой ПМСВ с  $k > 0$ , распространяющейся по границе феррит–феррит. Проводилось сравнение рассчитанных частот СВР с частотами разрывов на

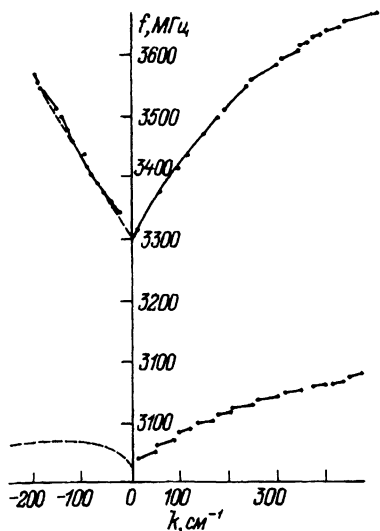


Рис. 3. Дисперсионная зависимость ПМСВ в ДФП 6.

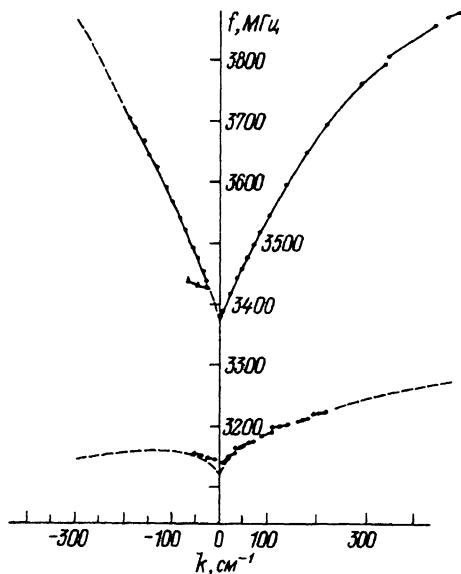


Рис. 4. Дисперсионная зависимость ПМСВ в ДФП 7.

дисперсионных кривых ПМСВ. Оказалось, что условие “свободный поверхностный спин” не выполняется ни в одном слое ДФП. Граничное условие “закрепленный поверхностный спин” описывает частоты СВР в ДФП 5 и 7 (рис. 2 и 4). При этом в верхнем слое ДФП 5 возбуждаются СВР с номерами  $n$  от 3 до 7 (при обменной постоянной  $\alpha = 3.3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ ), а в нижнем — СВР с номерами  $n = 16$  и  $17$  (при  $\alpha = 10^{-11} \text{ см}^2$ ). В ДФП 7 возбуждаются СВР в верхнем слое с номерами  $n$  от 2 до 6, а в нижнем — с  $n = 13$  и  $14$  ( $\alpha$  в обоих слоях равна  $2.3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ ). В остальных случаях наблюдается разнообразие зависимостей частот СВР от их номера  $n$ : разность частот соседних СВР может как уменьшаться с увеличением  $n$  (дисперсионные кривые ПМСВ в обоих слоях ДФП 4 и в верхнем слое ДФП 3), так и оставаться постоянной (дисперсионные кривые ПМСВ в ДФП 6) (рис. 3). В ДФП 3, 4 и 6 распределение частот СВР может объясняться как неполным закреплением поверхностных спинов, так и неоднородностью намагниченности насыщения и обменной постоянной  $\alpha$  по толщине слоев. Так, частоты СВР в зависимости от их номера  $n$  в ОФП линейно неоднородной намагниченностью насыщения по толщине [15] ведут себя так же, как и в ДФП 3, 4 и 6.

Из сравнения рис. 1–4 и столбцов таблицы видна закономерность: СВР в любом из слоев ДФП не наблюдались, если толщина этого слоя ДФП ( $d_{\pm 1}^c$ ), рассчитанная по [6], превышала измеренную на ОФП ( $d_{\pm 1}^m$ ), и наблюдались при обратном соотношении толщин. Это наталкивает на мысль о том, что разница толщин  $d_{\pm 1}^c - d_{\pm 1}^m$  характеризует степень закрепления спинов на границе между ферритовыми слоями: если  $d_{\pm 1}^c > d_{\pm 1}^m$ , то граница между ферритовыми слоями размыта и поверхностные спины на ней не существуют: если  $d_{\pm 1}^c \leq d_{\pm 1}^m$ , то граница между ферритовыми слоями является дополнительным ферритовым слоем толщиной

$\approx (d_{\pm 1}^m - d_{\pm 1}^c)$  с градиентом намагниченности насыщения по толщине. В этом слое спины закреплены полностью или частично. Разность толщин  $d_{\pm 1}^m - d_{\pm 1}^c$  в большей мере позволяет судить о степени закрепления спинов на поверхностях ДФП, чем малость толщины того или иного слоя  $d_{\pm 1}$ . Так, в малых по толщине нижних слоях ДФП 1 и 2 СВР не наблюдались, хотя они были на ОФП, выращенных вместе с ними.

В нижнем слое ДФП 7 при  $k < 0$  помимо дисперсионной кривой ПМСВ наблюдалась дополнительная ветвь МСВ (рис. 4, треугольники,  $|k|$  от 25 до 75 см<sup>-1</sup>), обусловленная возбуждением аномальных прямых объемных МСВ [16,17].

Разрывы на дисперсионных кривых ПМСВ (рис. 2-4), по-видимому, можно использовать для создания в СВЧ диапазоне полосно-заграждающих фильтров с полосами от 5 до 15 МГц.

Измерение параметров ДФП по способам 1 и 2 можно использовать для диагностики состояния спинов на поверхностях ДФП.

Авторы признательны А.В.Вашковскому, Б.А.Калиникосу, П.А.Колодину за обсуждение результатов работы, а П.С.Костюку, А.В.Маряхину и Б.П.Наму за предоставление ДФП.

### Список литературы

- [1] Goedsche F. // Phys. Stat. Sol. (a). 1970. Vol. 41. N 2. P. 711-719.
- [2] Wolfram F. // J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. N 11. P. 4748-4749.
- [3] Беспятыл Ю.И., Зубков В.И. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 11. С. 2386-2394.
- [4] Hu W., Liu F. // J. Magn. & Mag. Mat. 1983. Vol. 35. N 1. P. 153-156.
- [5] Вашковский А.В., Стальмазов А.В. // РЭ. 1984. Т. 29. № 5. С. 901-907. Там же. № 12. С. 2409-2411.
- [6] Зубков В.И., Епанечников В.А. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 23. С. 1419-1423.
- [7] Зубков В.И., Епанечников В.А. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 9. С. 53-60.
- [8] Barnaš J. // J. Phys. C. 1988. Vol. 21. N 5. P. 1021-1036. Ibid. N 22. P. 4097-4112.
- [9] Kalinikos V.A., Kolodin P.A. // J. Magn. & Mag. Mat. 1990. Vol. 83. N 1-3. P. 103-105.
- [10] Buris N.E. // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 68. N 12. P. 6442-6446.
- [11] Березин И.Л., Вашковский А.В., Вороненко А.В. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1233-1234.
- [12] Зубков В.И., Локк Э.Г., Нам Б.П. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 12. С. 115-117.
- [13] Луцев Л.В., Березин И.Л., Яковлев Ю.М. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 7. С. 180-185.
- [14] Калиникос Б.А. // Известия вузов. Физика. 1981. Т. 24. № 8. С. 42-56.
- [15] Луцев Л.В., Березин И.Л., Яковлев Ю.М. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. № 5 (419). С. 5-8.
- [16] Медведев А.В., Никитин И.П., Филимонова Л.М. // РЭ. 1987. Т. 22. № 7. С. 1557-1559.
- [17] Крышталь Р.Г., Медведев А.В. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 1936-1941.

Институт радиотехники и электроники  
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию  
17 марта 1992 г.