

Поступило в Редакцию  
27 февраля 1989 г.  
В окончательной редакции  
6 сентября 1989 г.

05; 06

Журнал технической физики, т. 60, в. 7, 1990

© 1990 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ

Л. В. Луцев, И. Л. Березин, Ю. М. Яковлев

### Введение

Замена однослойных ферромагнитных пленочных структур многослойными является эффективным средством изменения дисперсионной кривой магнитостатических волн (МСВ), распространяющихся в этих структурах. Свойства МСВ в многослойных пленках изучались во множестве работ [1-15]. Данная работа посвящена поиску параметров двухслойной пленочной структуры, имеющей наибольшую линейность дисперсионной кривой МСВ. В первой части приведены результаты расчета дисперсионных характеристик и групповых скоростей МСВ, распространяющихся в касательно и перпендикулярно намагниченных пленках на частотах 4.5 и 9 ГГц. Вторая часть посвящена экспериментальной проверке, которая подтверждает теоретические выводы: асимметрию дисперсионных кривых поверхностной МСВ (ПМСВ) в касательно намагниченных двухслойных пленках, максимум групповой скорости и увеличение линейности дисперсионной кривой поверхностной и прямой объемной МСВ (ПОМСВ).

### Расчет дисперсионных зависимостей и групповых скоростей МСВ

Расчет дисперсионных зависимостей осуществлялся на ЕС-1035 путем решения системы линейных уравнений, получающихся из уравнения Уокера и граничных условий [16]. Групповые скорости МСВ находились путем численного дифференцирования дисперсионной кривой. Одновременно осуществлялся поиск участка дисперсионной кривой с максимальной линейностью.

При расчете дисперсионных зависимостей МСВ двухслойных пленок введены понятия рабочего и управляющего слоев для поверхностной и прямой объемной МСВ. Рабочим будем

Т а б л и ц а 1

$f_0$ , ГГц	$4\pi M_{раб}$ , Э	Тип волны	$4\pi M_{упр}$ , Э ( $\pm 5$ Э)	$t = d_{упр}/d_{раб}$ , ( $\pm 0.05$ )	$D$ , МГц	$D_0$ , МГц
9.0	1750	ПОМСВ	2200	1.20	478.9	156.1
		ПМСВ	1520	1.60	93.7	32.8
	1050	ПОМСВ	1340	1.10	310.4	101.9
		ПМСВ	960	1.70	34.9	12.2
	600	ПОМСВ	800	1.20	185.1	60.1
		ПМСВ	575	1.40	11.7	3.9
4.5	1750	ПОМСВ	2110	1.20	415.7	135.2
		ПМСВ	1410	1.30	165.2	59.7
	1050	ПОМСВ	1280	1.10	279.1	91.1
		ПМСВ	900	1.40	65.8	23.4
	600	ПОМСВ	770	1.20	172.0	56.1
		ПМСВ	555	1.60	22.7	7.8

называть слой с максимальной частотой ФМР  $F_{\max}$ . Управляющими слоями будем называть все остальные слои. Дисперсионные зависимости будут рассчитываться для частот  $f > F_{\max}$ .

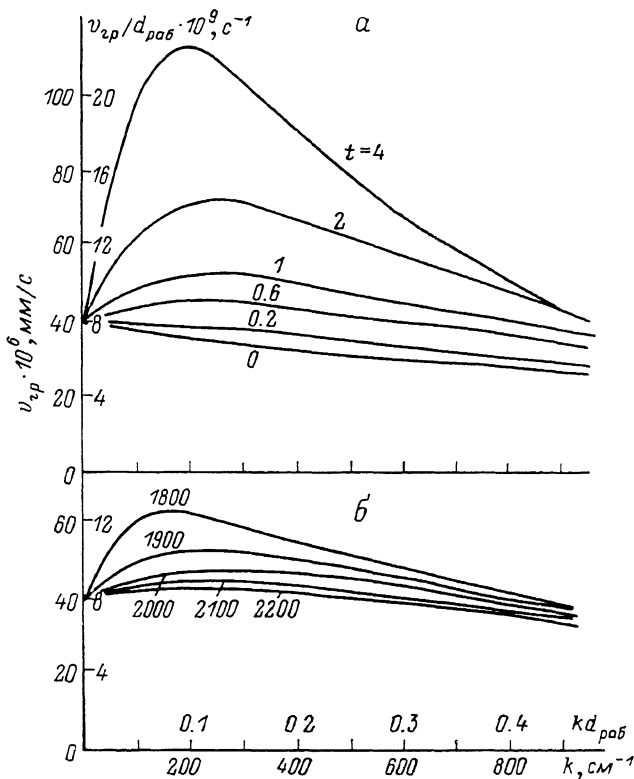


Рис. 1. Зависимости групповой скорости ПОМСВ от волнового вектора  $k$  для случая двух-слойной пленки с  $4\pi M_{раб}=1750$  Э в инвариантных относительно масштабных преобразований переменных и в масштабе с  $d_{раб}=5$  мкм при  $H=4930.2$  Э и в начале спектра ПОМСВ  $f_0=9$  ГГц.

а — для разных отношений толщин  $t/4\pi M_{упр}=1900$  Э, б — для разных намагниченностей управляющего слоя ( $t=1$ ).

Очевидно, что наибольшая величина переменного магнитного поля будет наблюдаться в рабочем слое. Для ПОМСВ рабочим слоем будет слой с наименьшей намагниченностью (при отсутствии одноосной анизотропии), для ПМСВ — слой с наибольшей намагниченностью.

Рис. 1, а показывает влияние толщины управляющего слоя на групповые скорости первой моды ПОМСВ. Величина магнитного поля выбрана такой, чтобы дисперсионные кривые начинались

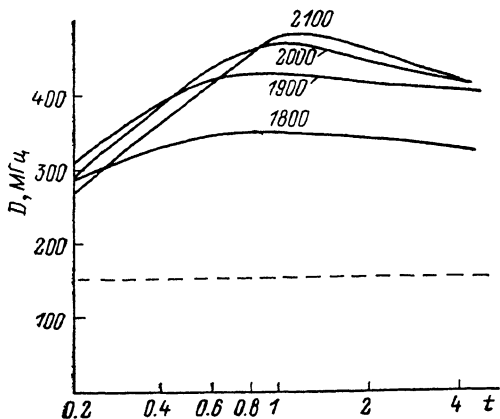


Рис. 2. Влияние отношения толщин слоев  $t$  на диапазон линейности  $D$  дисперсионной кривой ПОМСВ при разных намагниченностях управляющего слоя.

$4\pi M_{раб}=1750$  Э,  $H=4930.2$  Э,  $f_0=9$  ГГц; штриховая линия — диапазон линейности  $D_0$  однородной пленки.

с 9 ГГц. Рабочий слой имеет намагниченность 1750 Э, управляющий — 1900 Э. С ростом отношения толщин  $t=d_{упр}/d_{раб}$  увеличивается наклон дисперсионной кривой и на зависимости групповой скорости  $v_{гр}$  от волнового вектора  $k$  появляется максимум.

Влияние намагниченности управляющего слоя на групповые скорости при  $t=1$  показано на рис. 1, 6. Рост намагниченности приводит к уменьшению наклона дисперсионной кривой и к сглаживанию максимума  $v_{гр}$ .

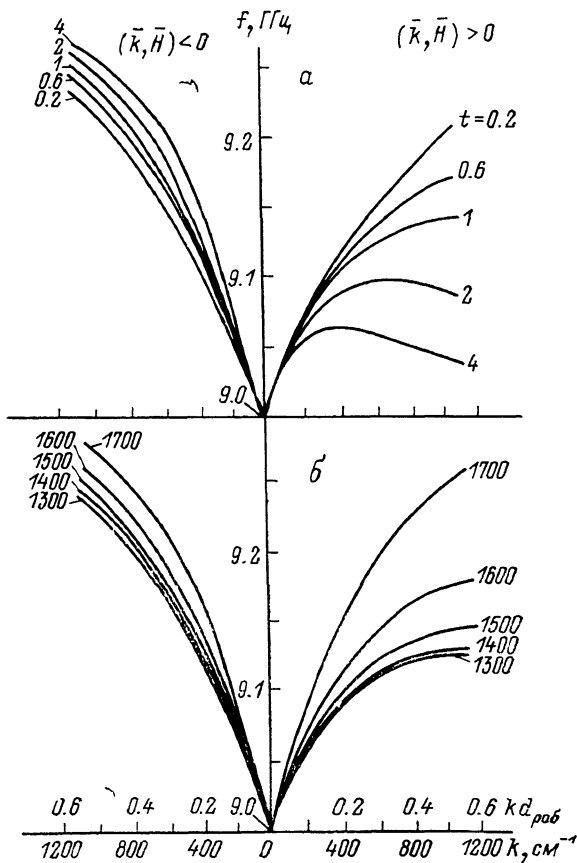


Рис. 3. Дисперсионные кривые ПМСВ для случая двухслойной пленки с  $4\pi M_{раб}=1750$  Э в инвариантных относительно масштабных преобразований переменных и в масштабе с  $d_{раб}=5$  мкм для двух противоположных направлений распространения волны при  $H=2423.4$  Э и в начале спектра ПМСВ  $f_0=9$  ГГц.

а — для разных отношений толщин  $t$  ( $4\pi M_{упр}=1500$  Э), б — для разных намагниченностей управляющего слоя ( $t=1$ ).

Наибольшая линейность дисперсионной кривой будет наблюдаться около максимумов групповой скорости. Диапазон линейности  $D$  определялся как частотный диапазон, на краях которого групповая скорость уменьшалась до  $0.9 \max v_{гр}$ . Зависимости  $D$  от отношения толщин  $t$  при разных намагниченностях управляющего слоя представлены на рис. 2. Из характера зависимости

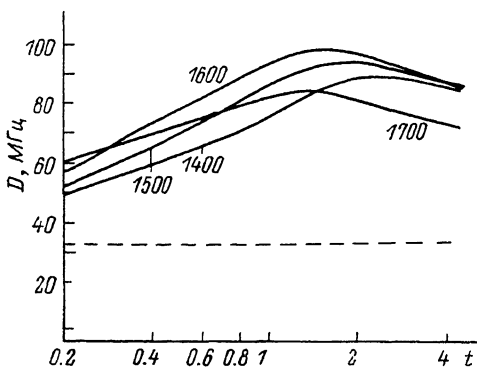


Рис. 4. Влияние отношения толщин слоев  $t$  на диапазон линейности  $D$  дисперсионной кривой ПМСВ ( $k < 0$ ) при разных намагниченностях  $H$  управляющего слоя.

$4\pi M_{раб}=1750$  Э,  $H=2423.4$  Э,  $f_0=9$  ГГц; штриховая линия — диапазон линейности  $D_0$  однородной пленки.

стей видно, что существуют оптимальное соотношение толщин и намагниченностей двух слоев, при которых  $D$  увеличивается почти до 500 МГц. Максимальные величины  $D$

и соответствующие параметры управляющего слоя при разных намагниченностях рабочего слоя на частотах 4.5 и 9 ГГц представлены в табл. 1. Здесь же даны диапазоны линейности однородных пленок  $D_0$  с намагниченностями  $4\pi M_{раб}$ . Применение двухслойных пленок позволяет увеличить диапазон линейности в 3 раза.

Зависимости, представленные на рис. 3, 4, показывают влияние управляющего слоя на дисперсионные кривые поверхностной МСВ (ПМСВ). Величина магнитного поля выбрана такой, чтобы дисперсионные кривые начинались с 9 ГГц. Намагниченность рабочего слоя равна 1750 Э. На рис. 3, а показано влияние толщины управляющего слоя с  $4\pi M_{упр} = 1500$  Э на дисперсионные кривые ПМСВ, распространяющихся в противоположных направлениях. Увеличение соотношения толщин  $t$  приводит к увеличению асимметрии дисперсионных кривых. При больших  $t$  на дисперсионной кривой ПМСВ, распространяющейся в положительном направлении  $k > 0$ , появляется максимум, групповая скорость меняет знак. Выше точки максимума волна распространяется только в одном направлении. Это дает возможность построения невзаимных МСВ устройств.

На рис. 3, б представлены дисперсионные зависимости при разных намагниченностях управляющего слоя для случая  $t=1$ . Асимметрия дисперсионных кривых растет с увеличением разности намагниченностей рабочего и управляющего слоев.

Влияние управляющего слоя на диапазон линейности  $D$  определялось для ПМСВ, распространяющейся в отрицательном направлении  $k < 0$  (рис. 4). Так же как и для ПОМСВ, влияние управляющего слоя приводит к увеличению  $D$  почти в 3 раза для оптимальных соотношений толщин и намагниченностей. Но по абсолютной величине диапазон линейности ПМСВ значительно меньше ( $< 100$  МГц) диапазона линейности ПОМСВ. В табл. 1 приведены значения  $D$  при 9 и 4.5 ГГц для ПМСВ, распространяющейся в двухслойной пленке с разными намагниченностями рабочего слоя. Здесь же даны диапазоны линейности  $D_0$  однородных пленок с намагниченностями  $4\pi M_{раб}$ .

#### Экспериментальное исследование дисперсионных характеристик и групповых скоростей МСВ в двухслойных пленках

Экспериментальная проверка полученных теоретических результатов проводилась на ячейке, представляющей собой линию задержки с петлей связи. Ширина приемной и передаю-

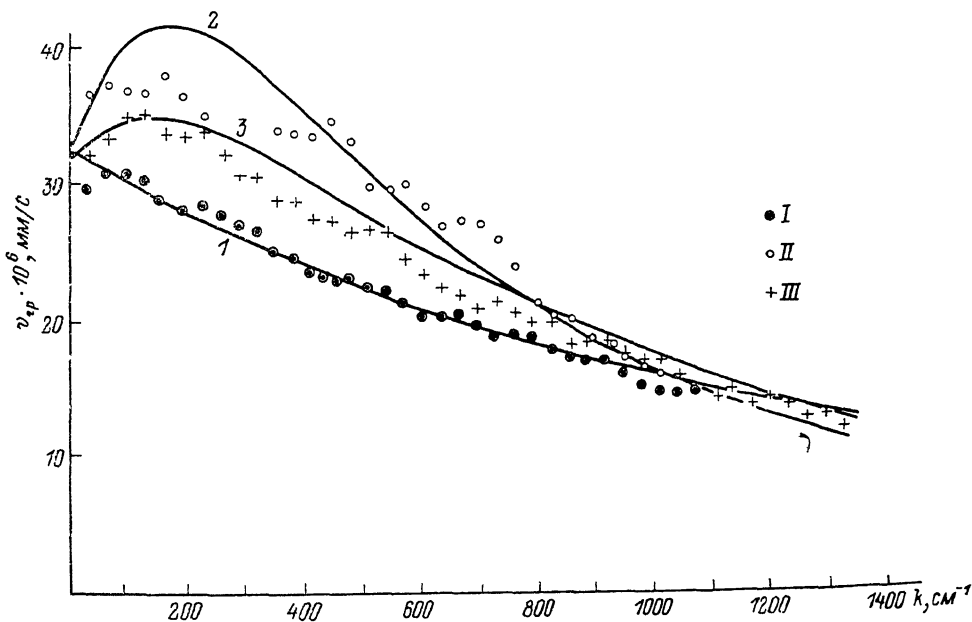


Рис. 5. Экспериментально полученные значения и теоретические зависимости групповых скоростей ПОМСВ от  $k$  для пленок 1 (I), 2 (II), 3 (III).

щей антенн составляла 20 мкм, длина 3 мм, расстояния между антеннами  $L$  2 и 5 мм. Электромагнитные колебания возбуждались на петле связи и на передающей антенне. От электромагнитных колебаний на передающей антенне возбуждались МСВ. На приемной антенне наво-

дился ток от МСВ и от электромагнитного поля петли связи. В зависимости от фазы поступивших сигналов происходило сложение или вычитание токов. После детектирования на экране осциллографа получалась интерференционная картина, в которой интерференционный максимум  $N$  связан с величиной волнового вектора МСВ  $k$  соотношением  $k=2\pi N/L$ . Чтобы

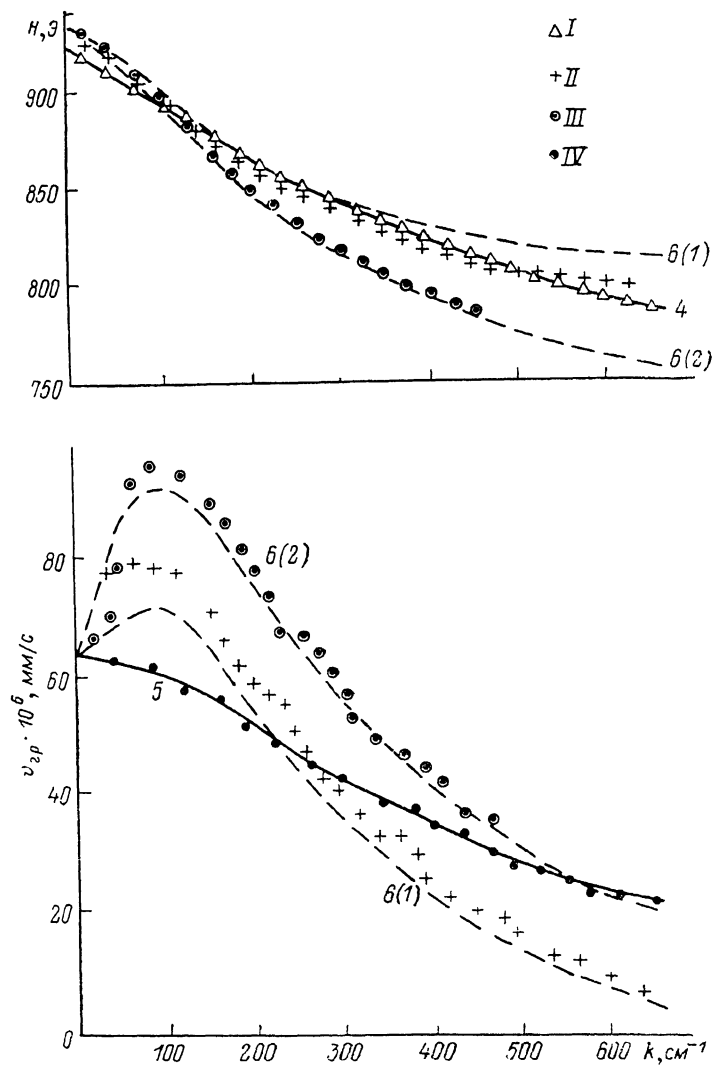


Рис. 6. Экспериментально и теоретически полученные дисперсионные кривые ПМСВ для пленок 4 (I, сплошная линия), 6 (I) (II, штриховая линия,  $k > 0$ ), 6 (2) (III, штриховая линия,  $k < 0$ ) (a) и зависимости групповых скоростей ПМСВ от  $k$  для пленок 5 (IV, сплошная линия), 6 (I) (II, штриховая линия,  $k > 0$ ), 6 (2) (III, штриховая линия,  $k < 0$ ) (б).

исключить набег фазы в микрополосковых структурах при изменении частоты, измерения проводились при постоянной частоте  $f=4.520$  ГГц. Изменялась величина магнитного поля. Дисперсионные зависимости строились в переменных  $H, k$ .

В табл. 2 приведены параметры пленок  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Y}_3\text{Fe}_6\text{O}_{12}$ : Ga, La, на которых проводились измерения. Намагниченности слоев зависели от концентраций Ga. Разность намагниченностей и одноосных анизотропий  $4\pi M - H_A$  находилась по данным ФМР. Определялось также затухание МСВ  $\alpha$  на единицу длины для каждого слоя.

На рис. 5 представлены теоретически рассчитанные зависимости групповых скоростей ПОМСВ от  $k$  и экспериментально полученные значения для пленок 1—3. Пленки 2, 3 получены наращиванием двух разных управляющих слоев на одинаковый первый слой (пленка 1 второго слоя не имеет). Из табл. 2 можно заметить, что второй слой влияет на  $4\pi M - H_A$  первого слоя. По-видимому, это связано с возникновением деформаций в первом слое и изменением вели-

Таблица 2

Номер пленки	1-й слой			2-й слой		
	$d_1$ , мкм	$4\pi M - H_A$ , Э	$\alpha$ , * дБ/мм	$d_2$ , мкм	$4\pi M - H_A$ , Э	$\alpha$ , * дБ/мм
1	9.8	737	11.3		Нет	
2	9.8	716	13.7	17.2	876	13.9
3	9.8	706	12.5	10.4	888	16.0
4	7.3	1730	4.55		Нет	
5	7.3	1752	4.45	2.1	1571	10.7
6	7.3	1740	4.3	11.7	1525	6.2

\* В  $\alpha$  наряду с затуханием МСВ входят потери в антеннах и потери, связанные с возбуждением высших мод для случая ПОМСВ (пленки 1—3).

чины одноосной анизотропии  $H_A$ . Этот эффект требует дальнейшего изучения. При увеличении толщины управляющего слоя растет наклон дисперсионной кривой при  $k \sim 200 \text{ см}^{-1}$ , что приводит к образованию максимума групповой скорости. Это подтверждается и данными эксперимента. Незначительное несоответствие экспериментальных и теоретических данных, по-видимому, объясняется тем, что при расчете не учитываются одноосная и кубическая анизотропия пленок.

Для пленок 1—3 определялся диапазон линейности. Для пленки 2 он составил 202 МГц, для пленки 3 — 151 МГц. Теоретические значения равны соответственно 185 и 192 МГц. Значение  $D_0$  для однородной пленки 1 равно 69 МГц.

Влияние управляющего слоя на ПМСВ изучалось на пленках 4—6. Намагниченность второго, управляющего слоя выбиралась меньшей, чем намагниченность первого слоя. Пленка 4 второго слоя не имеет. Пленки 4—6 имеют одинаковый первый слой. Различие значений  $4\pi M - H_A$  первого слоя, по-видимому, можно объяснить влиянием второго слоя. На рис. 6, а представлены дисперсионные кривые, рассчитанные численно (по данным табл. 2) и полученные экспериментально. Дисперсионные кривые 4, 6 (1) относятся к волне, энергия которой концентрируется на внешней стороне пленки [17]. Дисперсионная кривая 6 (2) принадлежит волне с концентрацией энергии на границе пленка—подложка. Амплитуда интерференционной картины, получаемая от этой волны, в несколько раз меньше амплитуды, получаемой от волны с концентрацией энергии на внешней стороне пленки. Эти волны распространяются в противоположных направлениях и в соответствии с теоретическим расчетом должны иметь разные дисперсионные кривые. Наибольшее различие в дисперсионных кривых наблюдается для пленки 6 (кривые 6 (1) и 6 (2)).

Для пленок 5, 6 измерены также групповые скорости (рис. 6, б). Влияние управляющего слоя, как показывает расчет, должно сводиться к подъему и к появлению максимума  $v_{гр}$  при малых  $k$  (сплошные кривые). Этот максимум обнаруживается экспериментально. Асимметрия дисперсионных кривых для противоположных направлений приводит к различию величин групповых скоростей. Наибольшее различие  $v_{гр}$  прослеживается для пленки 6 (кривые 6 (1) и 6 (2)).

### Список литературы

- [1] Grünberg P. // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. N 8. P. 4338—4341.
- [2] Grünberg P. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 11. P. 6824—6829.
- [3] Grünberg P. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. N 8. Pt IIB. P. 3673—3677.
- [4] Adkins L. R., Glass H. L. // Electron Lett. 1980. Vol. 16. N 15. P. 590—592.
- [5] Adkins L. R., Glass H. L. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 12. P. 8928—8933.
- [6] Sasaki H., Mikoshiba N. // Electron. Lett. 1979. Vol. 15. N 6. P. 172—174.
- [7] Sasaki H., Mikoshiba N. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 5. P. 3546—3552.
- [8] Ganguly A. K., Vittoria C. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. N 10. P. 4665—4667.
- [9] Daniel M. R., Emtage P. R. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 5. P. 3723—3729.
- [10] Parekh J. P., Chang K. W. // IEEE Trans. Magn. 1983. Vol. MAG-19. N 5. P. 1868—1870.
- [11] Parekh J. P., Chang K. W. // Proc. IEEE. 1983. Vol. 71. N 5. P. 685—686.
- [12] Huahui He, Jun Su et al. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 61. N 8. Pt IIB. P. 4136—4138.
- [13] Берегов А. С., Обламский В. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 11. С. 1345—1348.
- [14] Зубков В. И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 23. С. 1419—1423.
- [15] Вашковский А. В., Стальмахов А. В. // РиЭ. 1984. Т. 29. № 5. С. 901—907.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ НА ГЕНЕРАЦИЮ МАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДВИЖУЩИМИСЯ ДОМЕННЫМИ ГРАНИЦАМИ

А. С. Логгинов, Г. А. Непокойчицкий, Т. Б. Розанова

Известно, что при движении доменных границ (ДГ) в тонких монокристаллических пленках феррит-гранатов под действием импульсного магнитного поля по достижении им некоторой величины впереди ДГ могут возникать локальные образования — так называемые магнитные возмущения (МВ) [1]. С течением времени они прорастают в сквозные по толщине образца микродомены и сливаются с доменной границей, вызывая кажущееся увеличение скорости ее движения [2]. В разных образцах интенсивность генерации МВ оказывается различной. Исчерпывающего объяснения природы таких образований пока не существует.

В данной работе проведен анализ особенностей генерации магнитных возмущений в зависимости от свойств материала. В качестве образцов использовались эпитаксиальные пленки ФГ, выращенные на подложках из  $Gd_3Ga_5O_{12}$  ориентации (111) составов  $(BiTm)_3(FeGa)_5O_{12}$  (образцы 1, 4, 9),  $(YBiTm)_3(FeGa)_5O_{12}$  (3) и  $(BiLu)_3(FeGa)_5O_{12}$  (2, 5—8). Основные параметры образцов приведены в таблице.

Параметры исследованных пленок ФГ

Номер образца	Намагниченность насыщения $4\pi M_s$ , Гс	Поле коллапса $H_0$ , Э	Поле одноосной анизотропии $H_K$ , Э	Константа одноосной анизотропии $K_1$ , эрг/см <sup>3</sup>	Фактор качества $Q$	Толщина $h$ , мкм	Период полосовых доменов $\rho_0$ , мкм
1	70.1	17.8	4950	13800	70.6	7.32	37.6
2	72	14.4	4540	15800	63.1	8.22	53.2
3	218.3	99.3	3070	26700	14.1	5.0	11.5
4	144	129.8	950	5440	6.6	10	8.7
5	101.5	57	3100	12500	30.5	14.7	27.0
6	78.5	41	4500	14100	57	19	39.2
7	78.7	36	3430	10740	44.5	10.9	35.6
8	107.0	57	3150	13400	29.4	13.3	27.7
9	173	133	650	4500	3.8	7.5	8.5

Исследования динамики перемагничивания проводились методом высокоскоростной фотографии с временным разрешением  $\sim 8$  нс и пространственным  $\sim 1$  мкм.

В результате экспериментов установлено, что интенсивность генерации МВ находится в прямой зависимости от фактора качества материала. Так, в образце 1 с большим фактором качества зарегистрировать МВ при расширении полосовых или цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) вообще не удается. Однако их удалось наблюдать впереди сквозной по толщине образца доменной границы, образовавшейся в результате остановки волны опрокидывания магнитных моментов [3—5] в градиентном поле импульсной катушки, в полях, сравнимых с полем одноосной анизотропии. Серия фотографий, на которой представлен процесс формирования такой границы и появления впереди нее магнитных возмущений, приведена на рис. 1, А.

В образце 2 генерация МВ наблюдается лишь в ограниченном диапазоне импульсных магнитных полей  $2.3 \text{ кЭ} < H_{\text{имп}} < 2.7 \text{ кЭ}$ , причем в течение импульса магнитного поля интенсивность генерации практически не изменяется. Изменение доменной структуры с течением времени представлено на рис. 1, Б. Фотографии а—е этой серии выполнены с двухимпульсной