Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. А. Митлина, Ю. В. Великанова, Влияние потерь на параметры поверхностных магнитостатических волн, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2006, выпуск 42, 98–102

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu418>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.85.73.92

26 апреля 2023 г., 13:34:49

Физика твердого тела

УДК 537.635

Л.А. Митлина, Ю.В. Великанова

ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ НА ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН

Показано, что учет диссипации в дисперсионном уравнении приводит к ограничению значений волновых чисел и граничных частот области существования поверхностных магнитостатических (ПМСВ) волн в пленках феррошпинели $\text{Mg}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Сравнение данных области существования ПМСВ без учета и с учетом потерь дало основание полагать, что потери ведут к сужению этой области. На основании измерения дисперсии и затухания волн определено время задержки.

Проблемы улучшения параметров СВЧ устройств на магнитостатических спиновых волнах (МСВ), необходимость миниатюризации устройств и снижение энергозатрат требуют разработки новых пленочных магнитных материалов с высокой намагниченностью и большими полями анизотропии. К ним относятся эпитаксиальные феррошпинели [1–5].

Простейшими из этих устройств являются линии задержки – управляемые постоянным магнитным полем или дисперсионные (с задержкой, зависящей от частоты) [6]. Они необходимы для обработки сигналов в современных системах радиолокации и связи. Интерес к таким линиям задержки обусловлен тем, что скорость распространения спиновых волн значительно (на несколько порядков) меньше скорости распространения обычных электромагнитных волн в волноводах, и поэтому те же задержки могут быть достигнуты при значительно меньших размерах линии. При допустимых потерях такие линии на ЖИГ позволяют получить время задержки, регулируемое в пределах приблизительно 0,01–1 мкс [6].

В настоящее время еще не выяснены закономерности распространения МСВ в пленках ферритов – шпинелей, а также свойства пленочных структур на МСВ [7].

Объекты и методы исследования. Для исследования были выбраны пленки состава $\text{Mg}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4$, выращенные методом химических транспортных реакций на (001) плоскости оксида магния. Изучение распространения МСВ в пленках феррошпинелей проводилось методом движущегося преобразователя [8] с помощью макета линии задержки. При касательном намагничивании наблюдаются поверхностные МСВ (ПМСВ).

Результаты эксперимента и их обсуждение. Наличие блоков и других структурных дефектов является причиной неоднородности магнитной структуры эпитаксиальных феррошпинелей. Ее можно рассматривать как результат воздействия на намагниченность различного рода внутренних полей – полей наведенной и магнитокристаллической анизотропии [9]. Полную ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР) можно представить в виде суммы трех слагаемых [10]:

$$\Delta H = \Delta H^0 + \Delta H^k + \Delta H^\phi,$$

где ΔH^0 – собственная ширина линии ФМР; ΔH^k – уширение, связанное с амплитудной дисперсией анизотропии; ΔH^ϕ – уширение, обусловленное угловой дисперсией. При больших частотах $\Delta H^\phi \sim 2H_a F_0^2$, где F_0 – угол отклонения оси легкого намагничивания (ОЛН) блока от среднего направления ОЛН. Величина ΔH^k в среднем для всех блоков порядка MF_0 .

Методом радиочастотного резонанса [10,11] была оценена угловая дисперсия в рассматриваемых образцах марганцевого феррита. Для пленок толщиной 20 мкм, где размер блока $l \sim 10^{-2}$ см, угловая дисперсия в плоскости пленки $F_0 \sim 3 \div 5^\circ$; для 50 мкм, где $l \sim 10^{-1}$ см, $F_0 \sim 10 \div 12^\circ$, пространственная дисперсия $\sim 10 \div 15^\circ$. Уширение линии ФМР, связанное с амплитудной дисперсией магнитной анизотропии при указанных F_0 , – мало. А уширение, обусловленное угловой дисперсией при малых подмагничивающих полях, $\sim 13 \div 70$ Э.

Для оценки блочности в 3-х см диапазоне длин волн, когда поля резонанса ~ 2000 Э, угловая дисперсия должна быть порядка разориентации блоков. Из рентгеноструктурных исследований пленок магний-марганцевого феррита двухкристалльным спектрометром [12] следует, что $\Theta \sim 10 \div 14'$.

При намагниченности насыщения $M \sim 300$ Гс вклад блочности $\Delta H^k \sim 4$ Э.

Данные из спектров ферромагнитного резонанса позволяют рассчитать эффективный параметр затухания $\alpha = \frac{\Delta H}{H_p}$ (табл. 1), где ΔH – полуширина резонансной кривой, H_p – резонансное

поле. С увеличением частоты (8,8÷11,4) ГГц, на которой проводились исследования ФМР, коэффициент затухания растет, оставаясь в пределах одного порядка.

В связи с этим при рассмотрении распространения МСВ в пленках феррошпинели необходимо проведение дополнительного анализа спектра ПМСВ с учетом затухания.

При касательном намагничивании пленки дисперсионное уравнение имеет вид [14]. Влияние диссипации на спектр ПМСВ учтем, проводя замену [15] $\omega_H \rightarrow \omega_H + i\alpha\omega_H$, $k = k' - ik''$, где k' , k'' – реальная и мнимая части волнового числа.

Т а б л и ц а 1

Магнитные параметры пленки исходного состава $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$, рассчитанные из спектров МСВ и ФМР

Образец	Намагниченность насыщения $4\pi M_0$, кГс	Первая константа анизотропии K_1 , эрг/см ³	Поле анизотропии H_A , Э	Толщина пленки d , мкм	Полуширина резонансной кривой ΔH , Э	Эффективный параметр затухания α
1	4,30	$-3,7 \cdot 10^4$	125	22	20÷28	$2,3 \cdot 10^{-2}$
2	2,28	$-0,9 \cdot 10^4$	49	35	38÷47	$3,7 \cdot 10^{-2}$
3	4,94	$-5,0 \cdot 10^4$	159	15	5÷9	$3,2 \cdot 10^{-2}$
4	4,47	$-3,1 \cdot 10^4$	101	30	21÷29	$3,0 \cdot 10^{-2}$

Как видно из рис. 1 для образца 1 с эффективным параметром затухания (параметром диссипации) $\alpha = 2,3 \cdot 10^{-2}$, вычисленным из ФМР (табл. 1), намагниченностью насыщения 4,30 кГс и толщиной 22 мкм область существования ПМСВ значительно шире и интервал значений волнового числа больше, чем для 2 образца с эффективным параметром затухания $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-2}$, намагниченностью насыщения 2,28 кГс и толщиной 35 мкм.

Рассмотрим образцы 3 и 4 с приблизительно одинаковой намагниченностью насыщения (табл. 2). При сравнении образца 3 с эффективным параметром затухания $\alpha = 3,2 \cdot 10^{-2}$, толщиной 15 мкм и образца 4 с эффективным параметром затухания $\alpha = 3,0 \cdot 10^{-2}$, толщиной 30 мкм видно, что эти образцы имеют приблизительно одинаковые частотные диапазоны, но разные интервалы значений волновых чисел. Из этого следует, что на интервал значений волнового числа оказывает влияние толщина пленки.

Р и с. 1. Спектр прямых и обратных ПМСВ для образцов 1 и 2 в полях:
а – $H_0 = 400$ Э, б – $H_0 = 1000$ Э

Еще одним параметром, влияющим на ширину дисперсионной кривой, ее смещение и интервал значений волнового числа, является значение подмагничивающего поля.

Р и с. 2. Спектр прямых и обратных ПМСВ для образцов 3 и 4 в полях:
а – $H_0 = 700$ Э, б – $H_0 = 1120$ Э

Из рис. 1 и 2 видно, что при увеличении поля область существования ПМСВ не только смещается в область больших частот, но и уменьшается интервал частот и значений волнового числа.

Максимально возможное волновое число при данном α будет определяться по формуле [15]

$$k'_m = -\frac{1}{4d} \ln \left\{ \frac{16}{w_M^2} \left[\left(w_H + \frac{w_M}{2} \right)^2 \left(1 - \frac{1-a^2}{1+a^2} \right) \right]^2 + 4a^2 \left(w_H + \frac{w_M}{2} \right)^4 \frac{1-a^2}{(1+a^2)^2} \right\}, \quad (1)$$

которое достигается на частоте

$$\omega_m = \left(\omega_H + \frac{\omega_M}{2} \right) \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{1+\alpha^2}. \quad (2)$$

В табл. 2 представлены найденные по формулам (1) и (2) максимальные значения волнового числа k'_m и верхней граничной частоты ω_m существования ПМСВ.

Т а б л и ц а 2

Максимальные значения волнового числа и верхней граничной частоты существования ПМСВ для пленок исходного состава $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$

№ образца	1			2		3		4	
	400 Э	1000Э	1120 Э	400 Э	1000 Э	700 Э	1120 Э	700 Э	1120 Э
$k'_m, \text{см}^{-1}$	1435	1329	1310	799	707	1946	1836	1274	1219
$\omega_m, \text{ГГц}$	40,21	50,76	52,87	27,81	38,35	41,33	48,71	40,55	47,94

На область возбуждения ПМСВ влияют намагниченность насыщения, подмагничивающее поле, параметр диссипации и толщина исследуемых образцов [16]. С увеличением намагниченности значения максимального волнового числа и верхней граничной частоты растут (табл. 2), но у образца 4 значения намагниченности выше, чем у первого образца, а значения k'_m и ω_m ниже. Из этого следует, что значения k'_m и ω_m зависят не от намагниченности насыщения, а от первой кристаллографической константы анизотропии K_1 . Все значения α исследуемых образцов находятся в интервале $(2,3+3,7) \cdot 10^{-2}$, т.е. имеют один и тот же порядок величины. Следовательно, значения k'_m и ω_m (табл. 2) в основном будут определяться значениями константы кристаллографической анизотропии K_1 (табл. 1) и подмагничивающего поля, что и продемонстрировано выше.

Рассмотрим области существования прямых ПМСВ, рассчитанных без учета и с учетом потерь (табл. 3, 4). Сравнение данных таблиц 3 и 4 показывает, что учет потерь приводит к уменьшению области существования ПМСВ на десятки и сотые доли ГГц, что составляет порядка десятков и сотен МГц.

На практике этот интервал значительно меньше ввиду того, что ПМСВ имеют интервал волновых чисел не от 0, а от минимального волнового числа k'_{min} , которое зависит от поля ω_H и на нижней границе полевого интервала стремится к ∞ , а верхней – к 0. С повышением частоты растет не только значение k' , но и k'' , поэтому экспериментальные измерения k' в верхней частотной области существования ПМСВ ограничиваются высокими значениями декремента k'' , которые становятся сравнимы со значениями k' . Как видно из рис. 1 и 2 область существования обратных ПМСВ затухает быстрее, чем область прямых. Этим можно объяснить невозможность экспериментальных измерений дисперсионных зависимостей обратных ПМСВ.

Т а б л и ц а 3

Частотная область существования ПМСВ для пленок исходного состава $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$ без учета потерь

№ образца	1		2		3		4	
	400 Э	1000Э	400 Э	1000 Э	700 Э	1120 Э	700 Э	1120 Э
f_{min} , ГГц	2,29	5,44	3,08	5,22	3,60	5,46	1,59	4,39
f_{max} , ГГц	6,41	8,09	4,44	6,12	6,59	7,77	6,46	7,64
Δf , ГГц	4,12	2,65	1,36	0,9	2,99	2,31	4,87	3,25

Т а б л и ц а 4

Частотная область существования ПМСВ для пленок исходного состава $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$ с учетом потерь

№ образца	1		2		3		4	
	400 Э	1000Э	400 Э	1000 Э	700 Э	1120 Э	700 Э	1120 Э
f_{min} , ГГц	2,29	6,45	3,08	5,23	3,60	5,48	1,59	4,38
f_{max} , ГГц	6,40	8,08	4,43	6,11	6,58	7,76	6,46	7,63
Δf , ГГц	4,11	1,63	1,35	0,88	2,98	2,28	4,87	3,25

Полуширина резонансной кривой для пленок исходного состава $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$, рассчитанная из спектров ПМСВ с помощью метода подвижного преобразователя (табл. 1), составил $\sim 20 \div 58$ Э, что не противоречит данным ФМР.

По вычисленным параметрам групповых скоростей было оценено время задержки сигнала МСВ с учетом потерь (рис. 3). Из рис. 3 видно, что в области частот $f = 3 \div 7$ ГГц время задержки имеет значения, достигающие 25 нс.

Р и с. 3. Время задержки сигнала ПМСВ для образцов:
а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4

Таким образом, установлено, что затухание не только ограничивает спектр возможных значений максимального волнового числа k'_m и верхней граничной частоты ω_m , но и время задержки сигнала, которое в области $f = 3\div 12$ ГГц составляет величину порядка $1\div 25$ нс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анфиногенов В.Б., Зильберман П.Е., Митлина Л.А., Сидоров А.А., Тихонов В.В. Наблюдение и распространение магнитостатических волн в пленках феррошпинели // Письма в ЖТФ. 1986. Т.12. № 6. С. 996-999.
2. Анфиногенов В.Б., Зильберман П.Е., Митлина Л.А., Сидоров А.А., Тихонов В.В. Магнитостатические волны в пленках феррошпинели // Спиновые явления техники СВЧ. Тез. докл. региональной конференции Краснодар. 1987. С.37-38.
3. Анфиногенов В.Б., Митлина Л.А., Попков А.Ф., Сидоров А.А., Сорокин В.Г., Тихонов В.В. Магнитостатические волны в пленках феррошпинели // ФТТ. 1988. Т.30. № 7. С. 2032-2039.
4. Анфиногенов В.Б., Зильберман П.Е., Митлина Л.А., Сидоров А.А., Тихонов В.В. Магнитостатические волны в пленках феррошпинели // Proceedings of 9th Int. conf. on microwave ferrites. JCMF' 88. Estergom, Hungari. 1988. P. 1-2.
5. Сорокин В.Г., Лавренов А.А. Магнитостатические волны в монокристаллических пленках марганцевого феррита // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. 1989. № 3. С. 85-95.
6. Анфиногенов В.Б., Высоцкий С.Л., Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Казаков Г.Т., Луговской А.В., Маряхин А.В., Медников А.М., Нам Б.П., Никитов Ю.Ф., Огрин Ю.Ф., Ползиков Н.И., Раевский А.О., Сухарев А.Г., Темиряев А.Г., Тихомирова М.П., Тихонов В.В., Филимонов Ю.А., Хе А.С. Устройства на основе спиновых волн для обработки радиосигналов в диапазоне частот 50 МГц...20 ГГц // Радиотехника. 2000. № 8. С.6-14.
7. Митлина Л.А. Физико-химические основы получения, дефектность структуры и свойства монокристаллических пленок феррошпинелей (обзор) // Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Серия: Физ.-мат. науки. 2004. Вып.30. С. 114-149.
8. Зильберман П.Е., Казаков Г.Т., Тихонов В.В. Раздельное измерение параметров полезного сигнала и наводки в линиях передачи магнитостатических волн // РЭ. 1985. 30. № 6. С. 1164-1169.
9. Саланский Н.М., Ерухимов М.Ш. Физические свойства и применение магнитных пленок. Новосибирск: Наука, 1975, 219 с.
10. Корнев Ю.В., Салендов Д.И., Сидоренков В.В. Влияние дисперсии магнитной анизотропии на частоту ферромагнитного резонанса // Доклады АН СССР. 1987. Т.294. № 5. С. 1114-1117.
11. Митлина Л.А., Сидоров А.А., Великанова Ю.В., Виноградова М.Р., Ляшенко С.В. Магнитные потери в эпитаксиальных феррошпинелях // Москва: 11-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Радиотехника, электротехника и энергетика. Москва. 2005. С. 45-46.
12. Анавердова О.Г., Коваль Я.П., Михайлов И.Ф., Фукс Я.М., Митлина Л.А., Молчанов В.В. Неоднородность деформации и субструктура эпитаксиальных слоев $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4/MgO$ // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1982. Т. 18. С. 1020-1024.
13. Ахизер А.И., Бойко В.С., Смольник А.И. К теории уширения линии ферромагнитного резонанса дислокациями. // ФТТ. 1974. т.16. в.4. с.3411-3416.
14. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnetic slab // J. Phys. Chem. Sol., 1961. V.19. № 314. P.308-320.
15. Вызулин С.А., Розенсон В.Н., Шех С.А. //О спектре поверхностных магнитостатических волн в ферритовой пленке с потерями // РЭ. 1991. В. 1.С. 164-168.
16. Митлина Л.А., Сидоров А.А., Великанова Ю.В., Виноградова М. Р., Бадртдинов Г.С. Затухание спиновых колебаний и волн в пленках феррошпинелей // Вестник Самарского госуд. техн. ун-та. Серия: Физ.-мат. науки. 2005. Вып.34. С.82-90.

Поступила 20.12.2005 г.