Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. А. Митлина, Ю. В. Великанова, Ю. П. Ерендеев, С. В. Ляшенко, А. А. Сидоров, Е. В. Кривошеева, Анализ характеристик МСВ, распространяющихся в ферритовых пленках, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004, выпуск 27, 25–32

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu262>

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: 52.6.47.48

26 апреля 2023 г., 02:57:45

Физика твердого тела

УДК 537.635

Л.А. Митлина, Ю.В. Великанова, Ю.П. Ерендеев, С.В. Ляшенко,
А.А. Сидоров, Е.В. Кривошеева

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МСВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ФЕРРИТОВЫХ ПЛЕНКАХ

Методом подвижного преобразователя проведены измерения закона дисперсии магнитостатических волн в пленках феррошпинели $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$. Раздельно определены амплитуды, декременты затухания и волновое число полезного сигнала МСВ, а также величина сигнала наводки. На основании измерения дисперсии и затухания волн определены основные магнитные параметры образцов.

Перспективы применения спин-волновых колебаний в более высокочастотной области СВЧ диапазона, включая миллиметровый, связаны с разработкой материалов с большой величиной намагниченности насыщения ($4\pi M_s$) и высокими внутренними полями анизотропии (H_A). К числу таких материалов относятся монокристаллические пленки феррошпинелей.

Монокристаллические пленки феррошпинелей могут составить конкуренцию пленкам железо-иттриевого граната (ЖИГ). Из анализа имеющихся к настоящему времени результатов по распространению МСВ [1-5], следует, что из-за повышенных значений намагниченности пленок феррошпинелей границы частотной области существования поверхностных МСВ по сравнению с теми же границами при распространении их в ЖИГ смещались в сторону больших частот, причем сама эта область расширялась. Такое поведение МСВ свидетельствует о перспективности применения монокристаллических пленок феррошпинелей при:

- а) разработке частотно-селективных функциональных устройств на МСВ, работающих на более высоких частотах, чем подобные устройства на ЖИГ;
- б) создании широкополосных фильтров на МСВ с полосами пропускания (заграждения) порядка сотен мегагерц;
- в) построении функциональных устройств на МСВ с меньшими габаритными размерами магнитных систем, так как те же рабочие частоты, что в аналогичных устройствах с применением пленок ЖИГ, достигаются при меньших значениях поля намагничивания.

Объекты и методы исследования. Для исследования были выбраны пленки состава $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$, выращенные методом химических транспортных реакций на (001) плоскости оксида магния. Изучение распространения МСВ в пленках феррошпинелей проводилось методом движущегося преобразователя [6] с помощью макета линии задержки, блок – схема которого изображена на рис. 1.

Прямоугольный образец, представляющий собой магний-марганцевую пленку, со сторонами (2-6) на (10-15) мм, приклеенный к кварцевому держателю, прижимался к полоскам и помещался в постоянное магнитное поле, параллельно полоскам, что соответствовало возбуждению в пленках поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ). Однородное магнитное поле $H_0 \parallel \langle 100 \rangle$ создавалось электромагнитом ФЛ 1. Развертка по полю осуществлялась с помощью источника питания “Выпрямитель ВСА-5” 12. Сигнал от СВЧ генератора 1 в режиме качания частоты поступал на вход экспериментального макета линии задержки 2. В качестве генератора СВЧ сигнала в измерителе используется генератор качающейся частоты (ГЧК 54). Волноводный тракт состоял из коаксиальной линии, двух ответвителей и согласованной нагрузки. Экспериментальный макет состоял из двух параллельно расположенных микрополосковых преобразователей на поликорковых подложках толщиной 0,5 мм. Микрополосковые преобразователи 9, закороченные на концах, длиной 12 мм и шириной 50 мкм изготавливались методом фотолитографии.

Р и с. 1. Блок - схема установки: 1 – генератор СВЧ, 2 – измеряемый объект, 3 – детектор, 4 – усилитель постоянного тока, 5 – индикатор КСВН и ослабления, 6 – датчик Холла, 7 – электромагнит, 8 – поликоровые подложки, 9 – микрополосковые антенны, 10 – подводящие линии, 11 – образец, 12 - источник питания.

принимается второй (такой же) антенной вместе с электромагнитной наводкой, возникающей вследствие сильной емкостной и индуктивной связи близко расположенных антенн. Вследствие этого в режиме качания частоты генератора на АЧХ суммарного сигнала будет наблюдаться интерференция $A(f)$ МСВ и наводки с некоторым периодом.

На рис. 2 представлены АЧХ выходного сигнала для исследованных образцов в полях $H_0 > 2H_A$ ($H_0 = 400$ Э, 1000 Э, 2000 Э). При увеличении поля до $H_0 = 2000$ Э спектр возбуждения МСВ смещался в область больших частот до ~ 12 ГГц. Видно, что АЧХ выходного сигнала не монотонны и имеют дополнительные минимумы, количество и амплитуда которых изменяется при росте магнитного поля. Уровень затухания ПМСВ для образца с мелкодисперсной структурой блоков (образец 1, рис.3) несколько ниже $\leq 12 \div 20$ дБ и зависит от поля, а у образца с крупными блоками (образец 2) ~ 25 дБ и практически не зависит от величины поля.

Полоса пропускания для обоих образцов зависит от величины поля (табл. 1). Полоса пропускания на уровне ~ 25 дБ для образца 1 уменьшается с увеличением поля. Для образца 2 полоса пропускания на уровне ~ 30 дБ, наоборот, имеет тенденцию к увеличению. Для случаев, когда полоса пропускания на данном уровне имела 2 интервала из-за провалов в АЧХ, выбирались наибольшие значения интервалов.

Т а б л и ц а 1

Потери, соответствующие полосе пропускания (3,5÷5,5) ГГц в поле $H_0 = 400$ Э и (9÷10,5) ГГц в полях $H_0 = 1000$ Э, 2000 Э для исследованных образцов

№ образца	A, дБ	H_0 , Э	Δf , МГц
1	15	400	300
	25	400	1700
		1000	700
		2000	400
2	30	400	400
		1000	600
		2000	1000

Величины провалов на АЧХ составляют в среднем $\sim 5 \div 15$ дБ. Возможно, из-за того, что поверхностные МСВ, обусловленные поверхностной анизотропией, могут резонансно взаимодействовать с ООМСВ и приводить к появлению провалов в области АЧХ [7]. А также, по аналогии с работой [7], эти провалы связаны с резонансным возбуждением структуры высокочастотным магнитным полем полоскового преобразователя и установлением в пленке колебаний намагниченности.

Дисперсионные характеристики. Для исследования дисперсионных свойств был использован метод подвижной приемной антенны [6]. При изменении расстояния между антеннами ℓ

на фиксированной частоте разность фаз принимаемых сигналов наводки и ПМСВ также меняется. В результате интерференции обоих сигналов будут наблюдаться осцилляции интенсивности на приемной антенне. Расстояние между максимумами интенсивности непосредственно будет давать длину волны ПМСВ на данной частоте.

1а

1б

2а

2б

3а

3б

Р и с. 2. АЧХ выходного сигнала для пленок исходного состава $\text{Mg}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4$ для образцов №1 (а) и №2(б) при расстоянии между антеннами $\ell = 3$ мм и полях : 1) $H_0 \approx 400$ Э; 2) $H_0 \approx 1000$ Э; 3) $H_0 \approx 2000$ Э.

Р и с. 3. Микроструктура пленок исходного состава $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$: а - образец 1; б - образец 2, $\times 150$.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости амплитуды выходного сигнала от расстояния между преобразователями при касательном подмагничивании пленки феррошпинели (образец 1). О возбуждении МСВ свидетельствовали периодические колебания амплитуды, которые возникали на выходном преобразователе за счет интерференции сигнала МСВ с сигналом наводки и опорным СВЧ-сигналом.

Р и с. 4. Интерферограммы для образца №1 при $H_0=400$ Э (а), $H_0=1000$ Э (б)

Можно видеть, что колебания характеризуются единственным периодом. Для получения таких колебаний необходимо было выбрать минимальное расстояние между преобразователями не слишком малым, чтобы высшие моды ПМСВ успели затухнуть. Кроме того, наличие одного периода указывает на отсутствие отраженных МСВ и на практическую независимость фазы наводки от малого (≤ 6 мм) изменения расстояния между преобразователями. Суммарная амплитуда наводки и опорного сигнала в данных измерениях всегда выбиралась большей, чем амплитуда сигнала МСВ.

Обработка интерферограмм осуществлялась по методике, представленной в работе [6]. Известно, что длина волны есть расстояние между максимумами $\lambda = \frac{2\pi}{k'}$, где k' - вещественная часть волнового числа ($k = k' + ik''$). Измеряя λ (или k') при различных частотах ω , можем построить зависимость $k'(\omega)$ – закон диссипации.

Колебания в выходном СВЧ-тракте складываются из колебания, вызванного МСВ [6]:

$$u(t) = U(\ell) \cos(\omega t - k'\ell), \quad (1)$$

и колебания, вызванного наводкой и опорным сигналом:

$$v(t) = V(\ell) \cos \omega t, \quad (2)$$

где ω - частота, t - время, ℓ - расстояние между преобразователями, $U(\ell) = U_0 \exp(-k''\ell)$ и $V(\ell)$ - соответствующие амплитуды колебаний, k' и k'' - волновое число и декремент МСВ. Сигнал на выходе линейного детектора равен

$$A(\ell) = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} dt [u(t) + v(t)] \theta[u(t) + v(t)] = \frac{1}{\pi} \sqrt{V^2(\ell) + U^2(\ell) + 2V(\ell)U(\ell)\cos k'\ell}, \quad (3)$$

где функция $\theta(x) = \begin{cases} 0, x < 0 \\ 1, x > 0 \end{cases}$. Пусть амплитуды $U(\ell)$ и $V(\ell)$ относительно мало меняются на периоде функции $\cos k'\ell$, т.е.

$$\varepsilon_U = \frac{1}{k'U} \left| \frac{dU}{d\ell} \right| \ll 1 \text{ и } \varepsilon_V = \frac{1}{k'V} \left| \frac{dV}{d\ell} \right| \ll 1. \quad (4)$$

Тогда, если пренебречь величинами порядка (4), то согласно (3), $A(\ell)$ достигает максимумов при $\ell_{2n} = 2n\pi/k'$ и минимумов при $\ell_{2n+1} = 2(2n+1)\pi/k'$, где $n=0, 1, 2, \dots$. Отсюда расстояние между соседними максимумами (или минимумами) задается соотношением:

$$\lambda = (\ell_{2n+2} - \ell_{2n}) = (\ell_{2n+3} - \ell_{2n+1}) = 2\pi/k', \quad (5)$$

т.е. равно длине волны МСВ. Кроме того, из (3) можно найти величины сигналов в максимумах

$$A(\ell_{2n}) = \frac{1}{\pi} [V(\ell_{2n}) + U(\ell_{2n})] \equiv A^+(\ell_{2n}) \quad (6)$$

и в минимумах

$$A(\ell_{2n+1}) = \frac{1}{\pi} [V(\ell_{2n+1}) - U(\ell_{2n+1})] \equiv A^-(\ell_{2n+1}). \quad (7)$$

Функции $A^+(\ell)$ и $A^-(\ell)$ можно определить равенствами (6) и (7) в любой точке ℓ . Смысл введения таких функций состоит в том, что они легко могут быть найдены с помощью экспериментальных интерферограмм. Для этого нужно лишь соединить плавными кривыми все интерференционные максимумы или минимумы. Зная, таким образом, функции $A^+(\ell)$ и $A^-(\ell)$, можно отдельно найти амплитуды МСВ и наводки по формулам:

$$U(\ell) = \frac{\pi}{2} [A^+(\ell) - A^-(\ell)], \quad V(\ell) = \frac{\pi}{2} [A^+(\ell) + A^-(\ell)]. \quad (8)$$

Результаты обработки интерферограмм представлены в табл. 2, где амплитуды МСВ и наводки даны в относительных единицах, причем за единицу взята амплитуда наводки в точке ℓ при $H_0 = 0$ Э. Амплитуда МСВ зависит от частоты. Амплитуда наводки выше, чем амплитуда МСВ, что не противоречит результатам [6].

Т а б л и ц а 2

Амплитуда наводки и сигнала МСВ для исследуемых образцов при $\ell = 3$ мм

№ образца	H_0 , Э	f , ГГц	Сигнал МСВ U	Сигнал наводки V
1	400	3,32	0,42	2,35
		3,48	0,21	3,20
		3,55	0,36	2,22
		3,80	0,23	1,57
		4,00	0,11	1,37
	1000	6,78	0,50	2,69
		6,86	0,68	3,11
		7,00	0,16	3,22
2	400	3,7	0,30	2,63
		3,75	0,20	2,85
		3,85	0,28	2,06
		3,95	0,04	1,70

Декремент затухания ПМСВ определяется по формуле [8]

$$k'' = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{u(\ell_1)}{u(\ell_2)}, \quad (9)$$

т.к. расстояние между максимумами дает длину волны λ , где $\ell_2 - \ell_1 = \lambda$.

На рис. 5 приведены зависимости $f(k')$ для случая $\mathbf{H}_0 \parallel \langle 100 \rangle$ при $H_0=400$ Э, $H_0=1000$ Э. Из полученных результатов следует, что ПМСВ характеризуется положительной групповой скоростью, т.е. $\frac{\partial \omega}{\partial k'} > 0$.

Р и с. 5. Дисперсионные зависимости ПМСВ: a - образец 1 при $H_0=400$ Э, 1000 Э и b - образец 2 при $H_0=400$ Э для пленок $\text{Mg}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

На рис.6 представлены зависимости декрементов затухания ПМСВ, вычисленные по формуле (9) для исследуемых пленок. Видно, что с ростом волновых чисел декременты немонокотонно возрастают. Значение декремента k'' возрастают наиболее сильно для образца 2, где наблюдается крупноблочная структура. Этот образец имеет более высокие значения k'' .

Фазовая скорость МСВ составляет $(1,6-4,0) \cdot 10^8$ см/с и групповая скорость $(0,1-1,8) \cdot 10^8$ см/с (табл. 3). С ростом k' групповые скорости слабо убывают.

Р и с. 6. Зависимость декремента затухания ПМСВ пленок $\text{Mg}_{0,25}\text{Mn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4$ от волнового числа при $H_0=400$ Э: a - образец 1; b - образец 2.

По экспериментальным точкам кривых на рис.5, на которых выбираются три точки $(\omega_{(i)}, k'_{(i)})$ так, чтобы $k'_{(2)} - k'_{(3)} = k'_{(3)} - k'_{(1)}$, была определена эффективная толщина пленки

$$d = \frac{1}{k'_{(3)} - k'_{(1)}} \ln \frac{\omega_{(2)}^2 - \omega_{(1)}^2}{\omega_{(3)}^2 - \omega_{(2)}^2}. \quad (10)$$

Аналогично по двум точкам и рассчитанному d из (10) определялась намагниченность насыщения

$$4\pi M_0 = \frac{2}{\gamma} \sqrt{\frac{\omega_{(2)}^2 - \omega_{(2)}^2}{\exp(-2k'_{(1)}d) - \exp(-2k'_{(2)}d)}} \quad (11)$$

и по одной точке и рассчитанным d и $4\pi M_0$ определялось поле анизотропии:

$$H_A = \frac{1}{2\gamma} \left[\gamma H_0 + \frac{\omega_M}{2} - \sqrt{\omega_{(1)}^2 + \frac{\omega_M^2}{4} \exp(-2k'_{(1)}d)} \right]. \quad (12)$$

Данные расчета приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 3

Параметры ПМСВ пленок исходного состава $Mg_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$

Образец	H_0 , Э	ω , ГГц	k' , cm^{-1}	k'' , cm^{-1}	v_ϕ , см/с	v_{cp} , см/с
1	400	20,84	51,5	5,4	$4,0 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$
		21,85	57,1	5,45	$3,8 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^8$
		22,29	59,8	5,5	$3,7 \cdot 10^8$	$6,3 \cdot 10^7$
		23,86	74,8	5,9	$3,2 \cdot 10^8$	$4,2 \cdot 10^7$
		25,12	105	6,4	$2,4 \cdot 10^8$	
2	400	23,24	60,4	3,7	$3,8 \cdot 10^8$	-----
		23,55	92,4	6,1	$2,5 \cdot 10^8$	$5,1 \cdot 10^7$
		24,18	104,7	6,8	$2,3 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^7$
		24,81	125,6	12,7	$2,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^7$
		25,12	157	12,8	$1,6 \cdot 10^8$	

Т а б л и ц а 4

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

Образец	Намагниченность насыщения $4\pi M_0$, Гс	Первая константа анизотропии K_1 , эрг/см ³	Поле анизотропии H_A , Э	Толщина пленки d , мкм	Полуширина резонансной кривой ΔH_k , Э
1	3496	$-2,2 \cdot 10^4$	80	22	2,4($f=3,89$ ГГц)
2	2713	$-1,1 \cdot 10^4$	49	35	1,2($f=3,93$ ГГц)

При малых потерях, когда $k'' \ll k'$, параметр затухания [9]

$$\omega_\tau = \omega_r \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_M}{\omega_H} \right), \quad (13)$$

где $\omega_M = \gamma 4\pi M_0$, а $\omega_H = \gamma \left(H_0 - \frac{2K_1}{M_0} \right)$, γ - гиромагнитное соотношение. Параметр затухания определяется групповой скоростью и k'' :

$$\omega_\tau = v_{cp} \cdot k''. \quad (14)$$

Полуширина резонансной кривой (ΔH_k) в этом случае (при $k'' < k'$) связана с параметром диссипации ω_r соотношением

$$\omega_r = \gamma \cdot \Delta H_k. \quad (15)$$

Соотношения (13) - (15) позволяют оценить полуширину резонансной кривой, которая составляет в частотном диапазоне (3,2-4) ГГц для 1 образца величину порядка $1,6 \div 6,6$ Э и в диапазоне (3,7-4,0) ГГц для 2 образца - $1,2 \div 3,1$ Э, что удовлетворительно совпадает с данными работы [3] в близком интервале частот.

Проведенные исследования позволяют считать, что управляя микроструктурой эпитаксиальных феррошпинелей, можно получить образцы с различными дисперсионными характеристиками, декрементами затухания, фазовой и групповой скоростью, параметром затухания, шириной полосы пропускания МСВ. Расширение рабочих частот и продвижение спектра МСВ в

пленках феррошпинели в область больших частот, по сравнению с используемым материалом спин-волновой электроники ЖИГ, низкими декрементами затухания одного порядка с ЖИГ свидетельствуют о перспективности применения эпитаксиальных феррошпинелей для разработки СВЧ-устройств на магнитостатических волнах.

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. 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.
7. Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Маряхин А.В., Филимонов Ю.А. Объемные магнитостатические волны в обменно-связанных ферритовых пленках. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 7. С. 97-110.
8. Казаков Г.Т., Тихонов В.В., Зильберман П.Е. Резонансное взаимодействие магнитодипольных и упругих волн в пластинах и пленках железо-итриевого граната. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 8. С. 2307-2312.
9. Гусев Б.Н., Чевилева А.Г., Гуревич А.Г., Эмирян Л.М., Шаронович О.Б. Затухание поверхностной магнитостатической волны. // Письма в ЖТФ. 1983. Т.9. Вып.8. С. 159-163.

Поступила 30.01.2004 г.