

Распространение поверхностных магнитостатических волн в плёнках железо-иттриевого граната со скрещенными каналами в металлических декорациях

В.К. Сахаров^{1,2*}, Ю.В. Хивинцев^{1,2}, А.С. Джумалиев¹, Ю.В. Никулин^{1,2}, Г.М. Дудко¹,
М.Е. Селезнёв¹, Ю.А. Филимонов^{1,2}

¹Саратовский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской Академии наук, Саратов, Россия.

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского», Саратов, Россия.

Аннотация: В работе экспериментально изучено прохождение поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) в микроструктурах на основе плёнок железо-иттриевого граната (ЖИГ) с металлизацией поверхности, в которой были выполнены одиночные каналы и каналы с ответвлениями из свободной плёнки ЖИГ.

В работе экспериментально исследовано прохождение поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) в микроструктурах на основе плёнок железо-иттриевого граната (ЖИГ), покрытых металлом с каналами, свободными от металлизации. Изучены случаи декорирования ЖИГ немагнитным и ферромагнитным металлами толщиной ≈ 30 нм. Проведено сравнение характеристик прохождения ПМСВ в прямолинейных каналах без ответвлений и в каналах с наличием боковых ответвлений.

Ключевые слова: спиновые волны, поверхностные магнитостатические волны, плёнки железо-иттриевого граната, металлические декорации, микроволноводы.

1. Введение

Одной из основных задач при создании устройств магноники [1] является формирование направленных пучков спиновых волн (СВ) и управление ими. При этом в качестве среды для распространения СВ целесообразно использовать пленки железоиттриевого граната (ЖИГ) в связи с рекордно низким затуханием СВ в нем среди известных магнетиков. Применительно к пленкам ЖИГ задача формирования направленных пучков СВ технически может быть решена несколькими способами, в частности, избирательным покрытием (декорированием) поверхности ЖИГ пленками немагнитных и магнитных металлов, влияющих через электрическую проводимость и магнитные свойства металла на дисперсию и затухание СВ в ЖИГ [2]. Данный вариант сравнительно прост в технологическом исполнении и мог бы являться хорошей альтернативой подходу, основанному на вытравливании из пленки ЖИГ волноводов конечной ширины, которые на сегодня являются наиболее популярными в исследованиях, направленных на разработку интерференционных магنونных устройств (магنونной логики, голографической памяти и др.) [3]. Подобные устройства требуют наличия нескольких волновых каналов и их сочленений, то есть являются многопортовыми. Данная работа посвящена исследованию особенностей характеристик распространения одного из типов СВ – поверхностной

магнитостатической волны (ПМСВ) в многопортовой структуре из микроканалов на основе плёнки ЖИГ, декорированной немагнитным или ферромагнитным металлом.

2. Изготовление образцов

Исследуемые микроструктуры изготавливались на основе плёнки ЖИГ толщиной 6.5 мкм и эффективной намагниченностью насыщения $4\pi M \approx 1830$ Гс, выращенной на подложке гадолиний-галлиевого граната с помощью жидкофазной эпитаксии. На поверхности данной плёнки формировались медные микроантенны с контактными площадками для СВЧ-зондов, и декорации из хрома (Cr) – немагнитного металла и пермаллоя ($\text{Py}=\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) – ферромагнитного металла с каналами свободными от металлизации. Толщины пленок Py и Cr составляли ≈ 30 нм. Изготовление микроантенн и металлических декораций осуществлялось с помощью магнетронного распыления, фотолитографии и ионного травления. Все структуры изготавливались на одном чипе в рамках единой технологической процедуры. Удельное сопротивление декораций из Py и Cr, измеренное с помощью четырёхзондового метода, составляло $\rho(\text{Cr}) = 0.61$ и $\rho(\text{Py}) = 0.73$ мкОм \times м. Микрофотографии исследуемых структур с геометрическими размерами и нумерацией антенн показана на рисунке 1.

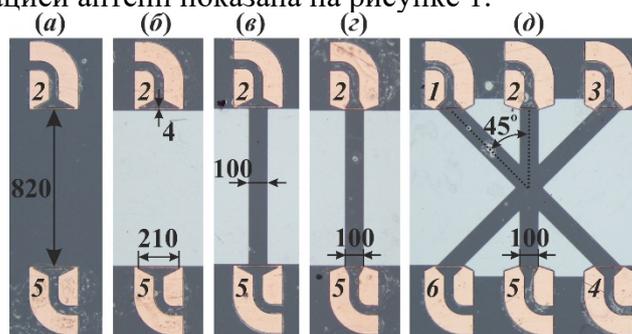


Рисунок 1. Фотография исследуемых микроструктур: (а) свободной плёнки ЖИГ, (б) металлизированной плёнки ЖИГ, (в, г) каналов в декорациях без ответвлений, (д) – многопортовой структуры. Линейные размеры приведены в мкм.

Для исследования характеристик прохождения ПМСВ в исследуемых микроструктурах использовался векторный анализатор цепей и СВЧ-зондовая станция. Внешнее магнитное поле H прикладывалось вдоль антенн, что соответствует условиям возбуждения и распространения между антеннами ПМСВ [4]. Измерялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициентов прохождения ПМСВ S_{ij} от антенны j к антенне i ($i, j = 1, 2, \dots, 6$). Измерения проводились в интервале полей $H = 120$ - 1600 Э, и частот $f = 0.5$ -8.5 ГГц.

3. Полученные результаты

Для начала рассмотрим прохождение ПМСВ в свободной плёнке ЖИГ и плёнке ЖИГ, полностью металлизированной Cr или Py (рисунок 2). В случае свободной пленки ЖИГ зона прохождения ПМСВ, как и предсказывает теория [4], была ограничена диапазоном $[f_0, f_s]$, где $f_0 = \gamma(H(H+4\pi M))^{1/2}$ и $f_s = \gamma(H+4\pi M/2)$ – длинноволновая и коротковолновая границы спектра ПМСВ, соответственно. Наличие пленки Cr между

антеннами приводило к росту потерь на прохождение по сравнению со свободной плёнкой ЖИГ из-за взаимодействия ПМСВ с электронами проводимости. Причем эти дополнительные омические потери увеличивались с ростом волнового числа (ростом частоты при фиксированной величине H), что также находится в согласии с теорией [5]. В случае металлизации Ru наблюдалось сужение зоны прохождение за счет смещения коротковолновой границы вниз по частоте, а также дополнительные потери по сравнению со случаем ЖИГ/ Cr , что связано с влиянием на дисперсию и затухание ПМСВ в ЖИГ магнитной подсистемы Ru [2].

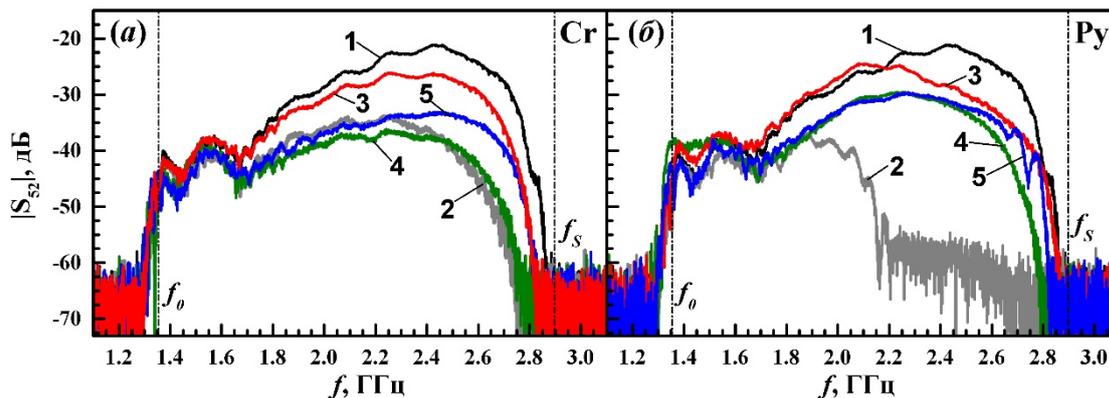


Рисунок 2. АЧХ коэффициента прохождения ПМСВ в свободной плёнке ЖИГ (кривые 1), полностью металлизированной плёнке ЖИГ (кривые 2), в прямолинейном канале без ответвлений (кривые 3 и 4), в канале с ответвлениями (кривые 5) для структур с декорациями из: Cr (а) и Ru (б). Кривые 1-3 получены для антенн длиной 210 мкм; кривые 4, 5 – 100 мкм. $H = 120$ Э.

Зависимости $S_{52}(f)$ в канале без ответвлений при использовании антенн длиной 210 мкм (такой же длины, как в предыдущем случае) располагались между кривыми $S_{52}(f)$ для свободной и металлизированной плёнки ЖИГ (см. кривые 3 на рисунке 2). Причём в случае Ru прохождение сигнала в части разрешённой зоны оказывалось не хуже, чем в свободной плёнке ЖИГ. Уменьшение длины антенны до 100 мкм заметно ослабляло прохождение сигнала (см. кривые 4 на рисунке 2). Для структур на основе ЖИГ/ Cr наличие ответвлений улучшало прохождение сигнала (из порта 2 в порт 5 по рисунку 1), по-видимому, за счет уменьшения площади покрытия ЖИГ металлом. С ростом поля эффект улучшения прохождения увеличивался. Для структур на основе ЖИГ/ Ru наблюдался аналогичный эффект улучшения прохождения для структур с ответвлениями. При этом в коротковолновой части спектра формировались 1-2 резонанса, отвечающие подавлению ПМСВ.

Рассмотрим теперь прохождение ПМСВ в многопортовой структуре от антенны 2 к антеннам 4, 5, 6 (рисунок 3). Прохождение от антенны 2 к антеннам 1 и 3 было на уровне прямой электромагнитной наводки, поэтому не будет рассматриваться. В случае декораций из Cr наблюдалось слабое отличие в кривых $S_{ij}(f)$ в малых полях (рисунок 3а): прохождение в коротковолновой части для $S_{42}(f)$ и $S_{62}(f)$ несколько хуже $S_{52}(f)$, а в длинноволновой области лучше. Лучшее прохождение в длинноволновой

области характерно также для аналогичных каналов из Ру (рисунок 3в). С ростом поля увеличивался эффект асимметрии распространения ПМСВ (разница в $S_{42}(f)$ и $S_{62}(f)$) для структур с декорациями из Cr (рисунок 3б).

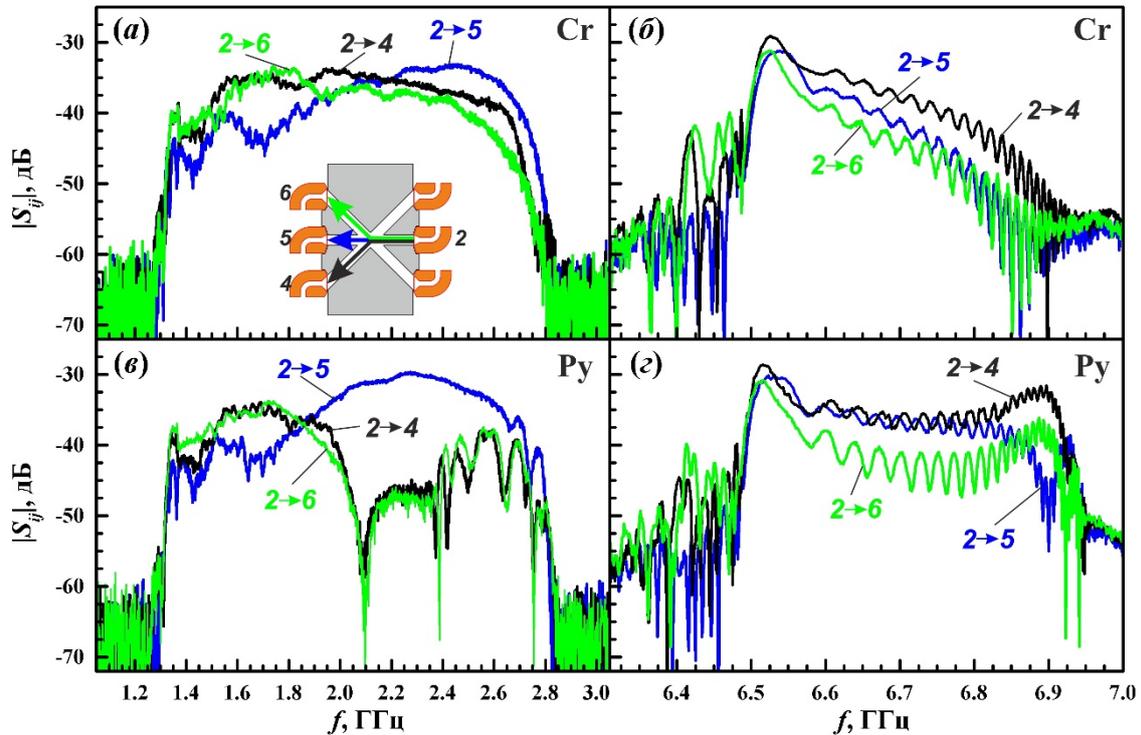


Рисунок 3. АЧХ коэффициента прохождения ПМСВ в многопортовой структуре из Cr (а, б) и Ru (в, г) от антенны 2 к антеннам 4, 5, 6 (показаны на вставке) при поле 120 Э (а, в) и 1573 Э (б, в).

Для случая Ru наблюдалось аналогичное поведение с дополнительной особенностью – подавлением ПМСВ в средней части зоны прохождения ПМСВ для $S_{42}(f)$ и $S_{62}(f)$ (рисунок 3в и г). Отметим, что при больших полях на частотах резонансного ослабления в $S_{52}(f)$ наблюдалось резонансное улучшение прохождения в $S_{42}(f)$ и $S_{62}(f)$.

Отметим также, что периодические осцилляции на рисунках 3б и г обусловлены интерференцией прошедшего сигнала ПМСВ с прямой электромагнитной наводкой. Этот эффект увеличивался с ростом поля, поскольку с ростом поля увеличивался уровень наводки и уменьшался уровень проходящего сигнала, то есть ухудшалось соотношение сигнал-наводка.

Теперь для случая декораций из Ru рассмотрим прохождение сигнала ПМСВ от антенны 1 к антеннам 4, 5, 6 (рисунок 4). В зависимости $S_{41}(f)$ при низких полях ($H < 300$ Э) длинноволновая часть зоны прохождения очень сильно (на 20 дБ и более) «просаживалась» относительно $S_{52}(f)$, тогда как коротковолновая часть проходила, как по прямому каналу, и почти П-образна. Начало П-образного участка приходится на длину волны ПМСВ, совпадающую с шириной канала. В этом П-образном участке были видны осцилляции, причём часть из них в "противофазе" к осцилляциям на $S_{52}(f)$. С ростом поля прохождение S_{41} в длинноволновой области постепенно возрастало и

становилось даже выше, чем S_{52} . Одновременно происходило уширение и сглаживание зоны прохождения для S_{41} . Отметим, что для $S_{61}(f)$ при 120 Э в центре АЧХ наблюдался широкий (≈ 200 МГц) участок, в котором прохождение спадало до уровня наводки. С ростом поля зона прохождения несколько видоизменялась, но всегда в центре оставался провал. Отметим также, что вид кривой $S_{51}(f)$ был полностью аналогичен кривой $S_{62}(f)$.

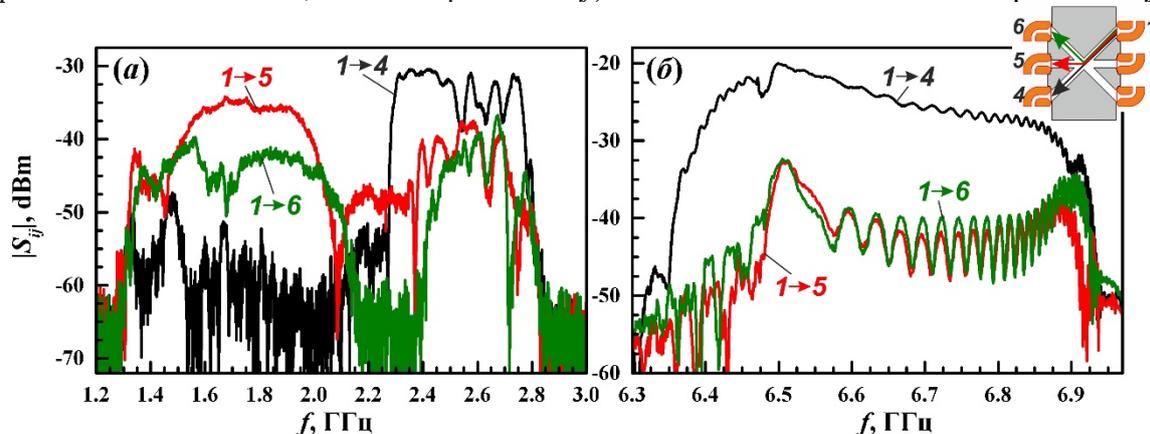


Рисунок 4. АЧХ коэффициента прохождения ПМСВ в многопортовой структуре из Ру от антенны 1 к антеннам 4, 5, 6 (показаны на вставке) при поле 120 Э (а) и 1573 Э (б)

4. Заключение

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность эффективного прохождения ПМСВ в структурах в виде скрещенных волновых каналов, сформированных за счет декорирования пленки ЖИГ металлом, что может быть использовано для реализации интерференционных эффектов на основе таких структур. Показано, что наиболее существенные отличия в прохождении ПМСВ между различными портами в подобных структурах достигаются при использовании декораций из магнитных металлов.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект РНФ № 22-22-00563).

Список литературы

1. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. Magnonics // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – Т. 43. – С. 264001.
2. Хивинцев Ю.В. и др. Распространение спиновых волн в микроструктурах на основе плёнок железиттриевого граната, декорированных ферромагнитным металлом // ФТТ. – 2019. – Т. 61, вып. 9. – С. 1664-1671.
3. Gertz F. et al. Magnonic holographic memory: from proposal to device // IEEE J. Explor. Solid-State Comput. Devices Circuit. – 2015. - Т. 1. – С. 67-75.
4. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // J. Phys.Chem. Solids. – 1961. – Т. 19. – С. 308-320.
5. Vugalter G.A., Korovin A.G. Total internal reflection of backward volume magnetostatic waves and its application for waveguides in ferrite films // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1998. – Т 31. – С. 1309.