

05.04.01.13

## Распространение спиновых волн в каналах, полученных декорированием поверхности пленок железо-иттриевого граната тонкими металлическими областями

© В.К. Сахаров<sup>1,2</sup>, Ю.В. Хивинцев<sup>1,2</sup>, А.С. Джумалиев<sup>1</sup>, Ю.В. Никулин<sup>1,2</sup>,  
М.Е. Селезнёв<sup>1</sup>, Ю.А. Филимонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия

<sup>2</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

E-mail: valentin@sakharov.info

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Экспериментально исследовано прохождение поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в микроканалах, образованных декорированием поверхности пленки железо-иттриевого граната областями из немагнитного (хрома) и ферромагнитного (пермаллоя) металлов толщиной 30 нм. Потери, вносимые данными металлами, и дисперсионные кривые ПМСВ сопоставлены с теоретическими зависимостями, рассчитанными с учетом конечной проводимости и намагниченности металлических слоев. Показано, что с помощью декорирования элементами из пермаллоя можно достичь эффекта „просветления“ в амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ) коэффициента прохождения ПМСВ.

**Ключевые слова:** спиновые волны, железо-иттриевый гранат, микроантенны, декорированные структуры.

DOI: 10.21883/FIT.2023.07.55843.20H

### 1. Введение

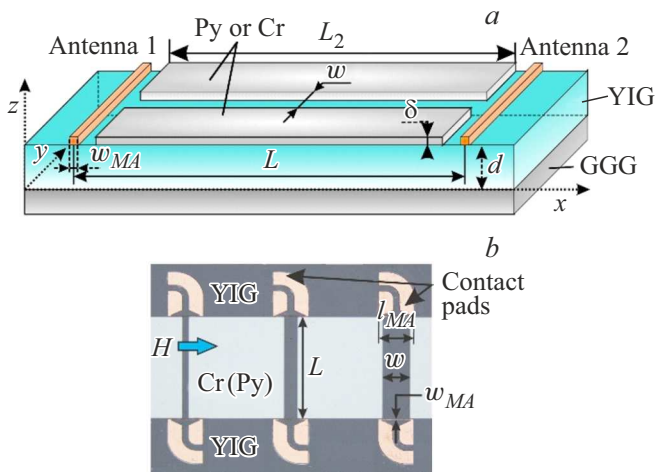
Создание энергоэффективных устройств хранения, обработки и передачи информации может быть основано на использовании спиновых волн (СВ) в качестве носителей информации [1–4]. Принципы работы таких устройств подразумевают формирование пучков СВ и управление ими, что может быть реализовано различными способами: прямым вытравливанием пленочных волноводов [4–6], использованием рельефа подложек [7,8], фокусирующими антеннами и преобразователями сложной формы [9–12], неоднородными внешними полями [13–15] и декорациями из ферромагнитных металлов на поверхности пленок-ферритов [16,17]. Последний метод имеет ряд преимуществ, связанных с относительной простотой технологического исполнения, и основан на использовании, во-первых, металлизации, как поглотителя СВ за счет роста вносимых потерь [18] и, во-вторых, изменения магнитного поля в феррите вследствие влияния магнитной составляющей декораций. Цель данной работы — исследовать механизмы управления дисперсией и затуханием поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в каналах, сформированных в пленках железо-иттриевого граната (YIG) диссипативными магнитными и немагнитными нагрузками, в качестве которых рассматриваются пленки пермаллоя (Pμ) и хрома (Cr).

Отметим, что металлизация YIG слоем Pμ означает формирование двуслойной магнитной структуры, спек-

тры ПМСВ в которых достаточно подробно изучались в пренебрежении проводимостью слоев [19–22]. При этом основное внимание уделялось особенностям формирования дисперсии так называемых внутренних ПМСВ, которые в коротковолновом пределе имеют максимум амплитуды на интерфейсе.

### 2. Исследуемые структуры, методики эксперимента и расчета

Исследуемые в работе микроструктуры изготавливались на основе пленки YIG толщиной  $d = 6.5 \mu\text{m}$  и намагниченностью  $4\pi M = 1830 \text{ G}$ , выращенной жидкофазной эпитаксией на подложке гадолиний-галлиевого граната (GGG). На поверхности данной пленки были сформированы медные микроантенны (MA) с контактными площадками и области (декорации) из Cr и Pμ — см. рис. 1. Для каждого материала последовательно применялись четыре технологических этапа: нанесение пленки методом магнетронного распыления на постоянном токе; фотолитография — формирование рисунка из полимера (фоторезиста) на поверхности этой пленки; ионное травление незащищенных фоторезистом участков металлической пленки; и очистка образца от остатков фоторезиста. Все структуры изготавливались на одной пластине YIG/GGG в ходе одного технологического цикла, обеспечивая одинаковость толщин декораций и антенн для всех структур. В то же время, описанная



**Рис. 1.** Схематическое изображение (а) и микрофотография (б) некоторых рассматриваемых структур с обозначением геометрических параметров.

технология приводит к стравливанию на небольшую толщину  $d_{et}$  пленки YIG вместе с участками металла, незащищенными фоторезистом. В особенности, это касается этапа изготовления медных антенн, поскольку толщина слоя меди для них составляла  $\approx 850$  nm, и при стравливании требуемых участков меди по всей площади образца выдерживалось избыточное время, за счет чего подтрав пленки YIG составлял  $d_{et} \approx 15\text{--}20$  nm. Толщина декораций из Cr и Py составляла  $\delta = 30$  nm, и для них подтрав пленки YIG оказывался незначительным ( $d_{et} \approx 1\text{--}5$  nm).

На образце также были изготовлены структуры для измерения удельного сопротивления  $\rho$  используемых металлов, которое было определено с помощью четырехзондового метода и составило:  $\rho(\text{Cr}) = 0.61$  и  $\rho(\text{Py}) = 0.73 \mu\Omega \cdot \text{m}$ . Таким образом, отличие в сопротивлении материалов декораций составляло 16%. Глубина скин-слоя  $l_{sk}$  для типичных частот  $f$  возбуждения ПМСВ в YIG ( $f = 2\text{--}7$  GHz) в этом случае составляет  $l_{sk}(\text{Cr}) \approx 6.8 \mu\text{m}$ ;  $l_{sk}(\text{Py}) \approx 0.3 \mu\text{m}$ .

Отметим, что хром является антиферромагнетиком. Антиферромагнитный порядок и близость к температуре Нееля ( $38^\circ\text{C}$ ) приводит к практическому отсутствию внешних полей, вследствие чего его магнитными свойствами можно пренебречь.

Длина используемых МА составляла  $l_{MA} = 250 \mu\text{m}$ , ширина —  $w_{MA} = 4 \mu\text{m}$ , что обеспечивало возбуждение ПМСВ с волновыми числами  $k \leq \pi/w_{MA} \approx 8 \cdot 10^3$  rad/cm. Рассматривалось два набора структур — для одного расстояние между возбуждающей и приемной МА составляло  $L = 820 \mu\text{m}$ , для второго —  $L = 220 \mu\text{m}$ . Изучались структуры с шириной канала  $w$  из следующего набора 12, 24, 50, 100 и  $200 \mu\text{m}$ , а также структура без декораций („свободная“ пленка YIG) и полностью металлизированная поверхность YIG между входной и выходной МА ( $w = 0$ ). Внешнее магнитное

поле  $H$  было приложено вдоль МА, что соответствует случаю ПМСВ Деймона–Эшбаха [23].

Методика измерений была аналогична методике, описанной в [17] за исключением того, что перед подачей сигнала на анализатор цепей не использовался предусилитель. Мощность подаваемого на входную антенну сигнала составляла  $-40$  dBm (при полях  $H = 120\text{--}810$  Oe) и  $-25$  dBm (при полях  $H > 810$  Oe), что оказывалось меньше порога параметрической неустойчивости.

Для трактовки результатов измерений структур с Py проводился расчет равновесного распределения поля и намагниченности в пленке YIG с помощью программы OOMMF 1.2b0 [24]. Параметры материалов выбирались соответствующими экспериментальным образцам: обменная жесткость —  $A_{ex}(\text{Py}) = 11.5 \cdot 10^{-7}$  erg/cm,  $A_{ex}(\text{YIG}) = 3.13 \cdot 10^{-7}$  erg/cm; эффективная намагниченность —  $4\pi M(\text{Py}) = 9.2$  kG,  $4\pi M(\text{YIG}) = 1.83$  kG.

Дисперсионные кривые  $k'(f)$  ПМСВ и потери (которые выразим в мнимой части волнового числа  $k = k' - ik''$ ) для структур YIG/Cr и YIG/Py с учетом проводимости и намагниченности металлических слоев, но без учета обменного взаимодействия рассчитаем, исходя из уравнений Ландау–Лифшица и Максвелла, согласно методике, аналогичной работам [17,25,26]. Дисперсионную кривую  $k'(f)$  внутренней ПМСВ можно также рассчитать с использованием методики, разработанной для неоднородных пленок [27], задав профиль пленки из двух ферромагнитных слоев, соответствующих YIG и Py, без учета проводимости, потерь и обменного взаимодействия. В расчетах примем ширину линии ФМР  $\Delta H$  равной типичным значениям для YIG —  $\Delta H = 0.4$  Oe, а толщины металлических слоев возьмем  $\delta(\text{Py}) = 25$  nm и  $\delta(\text{Cr}) = 35$  nm, так как при них достигается наилучшее соответствие с экспериментальными данными, которые обсуждаются далее.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Ожидаемое влияние слоев хрома и пермаллоя

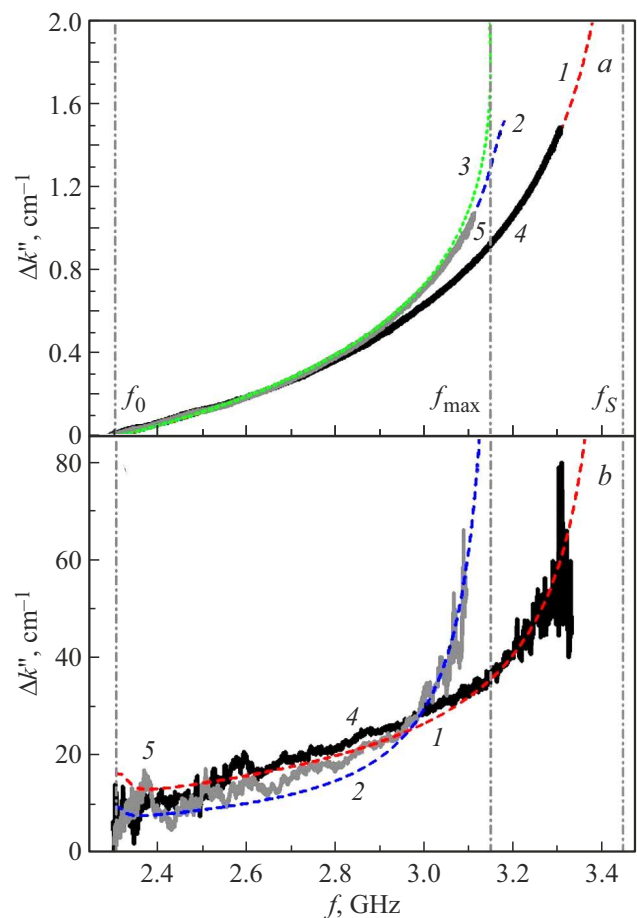
При выбранных значениях толщины металлических пленок  $\delta = 30$  nm и глубине  $l_{sk} \approx 6.8 \mu\text{m}$  значение параметра  $G = \delta/(kl_{sk}^2)$ , характеризующего влияние металла на свойства ПМСВ [18], составляет  $G \leq /(\pi l_{sk}^2) \approx 0.3$ . В этом случае, влияние проводимости металлических слоев сводится к внесению дополнительных омических потерь (потери, обусловленные спиновой накачкой, как правило не превышают магнитных потерь в ЖИГ [28] и здесь не рассматриваются) на прохождение ПМСВ [18] без перехода на вторую ветку дисперсии с большей коротковолновой границей [29]. Близкая проводимость Cr и Py позволяет определить влияние магнитной составляющей в Py на характеристики распространения ПМСВ из сравнения результатов измерений. При этом можно ожидать, что магнитная подсистема областей из

Ру будет приводить к двум основным особенностям. Во-первых, слой Ру приводит к формированию двухслойной магнитной пленки, в результате чего ПМСВ с максимум амплитуды у границы раздела с пленкой Ру должна преобразовываться во „внутреннюю ПМСВ“ [19–22]. Во-вторых, поля размагничивания от краев каналов в металлизации из Ру будут изменять внутреннее поле в нижележащем слое YIG. Рассмотрим оба этих воздействия подробнее.

Для случая свободной пленки диапазон существования ПМСВ [23] ограничен частотами  $f_0 = \gamma \sqrt{H(H + 4\pi M)}$  и  $f_s = \gamma(H + 4\pi M/2)$ , где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение, показанными штрихпунктирными вертикальными линиями на рис. 2. Учет влияния конечной проводимости металлизации из Сг приводит к виду рассчитанной дисперсии ПМСВ, слабо отличающейся от кривой для свободной пленки YIG (см. кривую 1 на рис. 2, a). В то же время наличие Сг вносит дополнительные омические потери для ПМСВ  $\Delta k''(f)$  относительно потерь в свободной пленке YIG. Причем  $\Delta k''$  растет по мере укорочения ПМСВ, существенно увеличивая потери вблизи коротковолновой границы (ср. кривую 1 на рис. 2, b). В эксперименте это может проявляться в сужении зоны прохождения ПМСВ за счет сильного подавления волны в коротковолновой части спектра.

В случае YIG/Ру зависимость  $k'(f)$  (кривая 2 на рис. 2, a) существенно изменяется в сравнении со свободной пленкой YIG. Расчет по [27] (кривая 3 на рис. 2, a) показывает формирование максимума на частоте  $f_{\max} \approx 3.15$  GHz ниже коротковолновой границы ПМСВ  $f_s$ . При этом дополнительные потери в YIG/Ру  $\Delta k''(f)$  относительно потерь в свободной пленке YIG (кривая 2 на рис. 2, b) до частоты  $\approx 2.96$  GHz оказываются меньше случая YIG/Сг, поскольку  $\rho(\text{Ру}) < \rho(\text{Сг})$  и  $\delta(\text{Ру}) < \delta(\text{Сг})$ , а на больших частотах существенно их превышают за счет дополнительных магнитных потерь от Ру, как магнетика. Поэтому в эксперименте зона прохождения ПМСВ в YIG/Ру должна сужаться и по сравнению со свободной пленкой YIG, и по сравнению со структурой YIG/Сг.

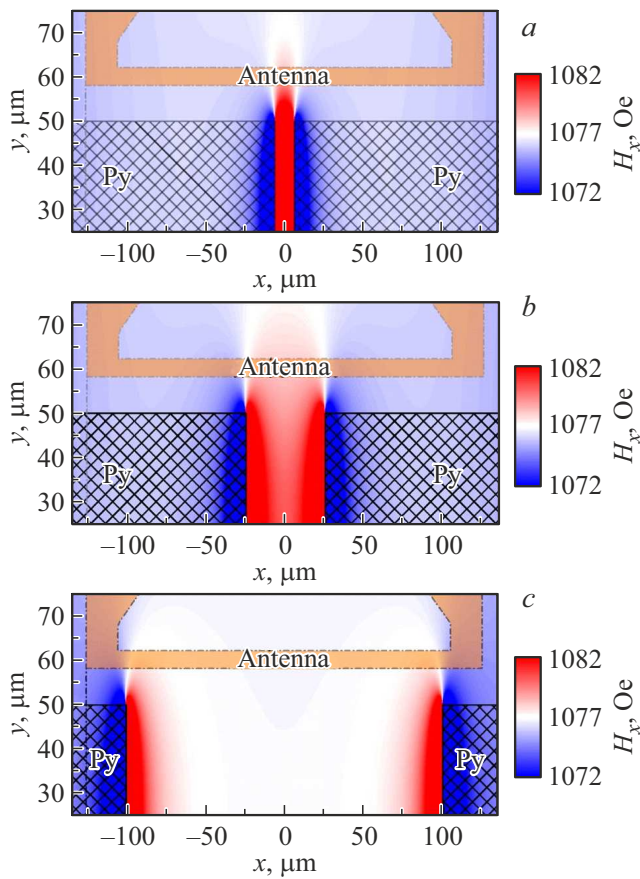
Теперь рассмотрим, как поля размагничивания от областей из Ру влияют на распределение внутреннего поля в слое YIG. Можно видеть, что в области края декорации из Ру внутреннее поле становится существенно неоднородным (рис. 3). Ширина наибольшей неоднородности вдоль оси  $x$  простирается на  $\approx 5 \mu\text{m}$  в обе стороны от края области из Ру, а вдоль оси  $y$  достигает расположения антенн (рис. 3). Распределение поля под каналом напоминает распределение между полюсами электромагнита — достигает максимальных значений у границы декораций и плавно спадает к центру канала. При этом внутреннее поле под каналами имеет большие значения, чем поле под антеннами, и подобно распределению поля типа „вала“, рассмотренному в [15]. Таким образом, зашедшая в канал волна вследствие плавного изменения поля будет трансформироваться по механизму Шлёмана [30] в более длинноволновую ПМСВ,



**Рис. 2.** Дисперсионные кривые (a) и вклад металлизации в пространственный декремент (b) для ПМСВ в YIG/Сг и YIG/Ру при  $H = 316$  Ое. Кривые 1 — рассчитанные дисперсия и потери для YIG/Сг; кривые 2 — для YIG/Ру; кривая 3 — дисперсия для YIG/Ру, рассчитанная по [27]; кривые 4 и 5 — экспериментальные дисперсии (a) и потери (b) для металлизации из Сг и Ру соответственно.

обладающую большей групповой скоростью, и, следовательно, меньшими потерями на распространение. Тем не менее, при  $w = 50\text{--}200 \mu\text{m}$  изменение поля от входной антенны к выходной вдоль оси канала составляет не более 3–4 Ое. Следовательно, в этом случае эффект трансформации составляют несущественную величину.

Гораздо значимее должен проявляться эффект каналирования, заключающийся в следующем. Область неоднородности по границам канала разделяет падающую ПМСВ на три составляющие. Две из них преобразуются во внутреннюю ПМСВ под металлизированными участками из Ру, и в частотной области  $[f_{\max}, f_s]$  (см. рис. 2) распространяться не могут, а третья часть ПМСВ попадает в область канала. При этом область неоднородности по границам канала и отсутствие разрешенных состояний для  $[f_{\max}, f_s]$  препятствует дифракционному расплыванию зашедшей в канал ПМСВ и формирует направленный волновой пучок.



**Рис. 3.** Распределение  $x$ -компоненты внутреннего поля в приповерхностном слое пленки YIG с декорациями из Py с шириной канала  $12\ \mu\text{m}$  (a),  $50\ \mu\text{m}$  (b) и  $200\ \mu\text{m}$  (c) при внешнем приложенном поле  $H = 1077\ \text{Oe}$ . Заштрихованные области соответствуют участкам, покрытым Py, область с полупрозрачной заливкой — расположению входной антенны.

Заметим, что распространение ПМСВ от входной антенны происходит в пределах углов отсечки  $\varphi_s$  (между нормалью к антенне и направлением, вдоль которого еще может распространяться ПМСВ), определяемых согласно выражению [23]:

$$\varphi_s = 90^\circ - \text{atan} \sqrt{\frac{H}{4\pi M}}$$

Для поля  $H = 316\ \text{Oe}$  угол отсечки составляет  $\varphi_s \approx 67^\circ$ , для  $H = 1077\ \text{Oe}$  —  $\varphi_s \approx 53^\circ$  и для  $H = 1573\ \text{Oe}$  —  $\varphi_s \approx 47^\circ$ . Таким образом, дифракционное распыление ПМСВ от входной антенны в отсутствие каналов является довольно существенным в рассматриваемом диапазоне полей.

### 3.2. Прохождение ПМСВ в металлизированных структурах

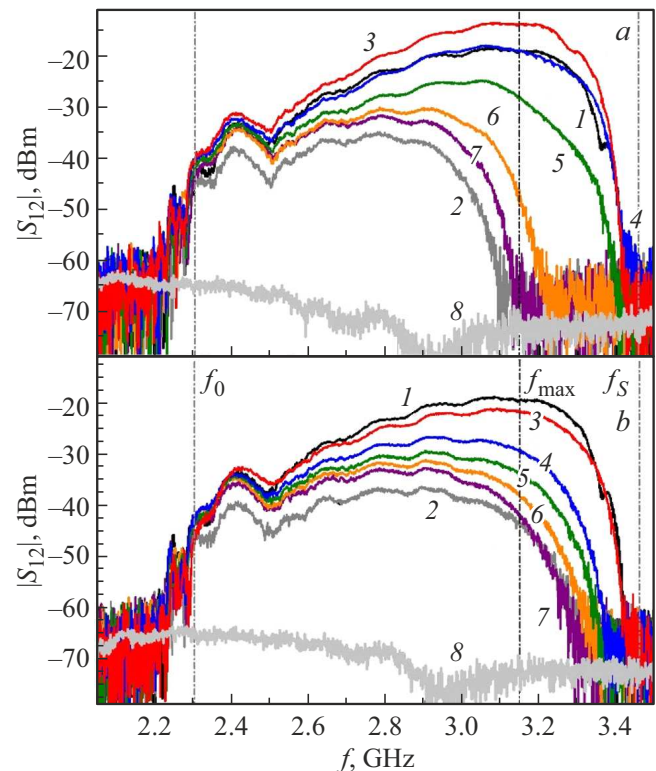
Из сравнения АЧХ коэффициента прохождения ПМСВ  $S_{12}(f)$  в свободной и металлизированной перм-

аллоем или хромом пленке YIG (рис. 4) можно выделить несколько особенностей. В первую очередь, полностью металлизированная поверхность YIG приводит к ухудшению прохождения ПМСВ по сравнению со свободной пленкой YIG вследствие потерь, вносимых проводимостью Cr и Py [17]. Из разницы кривых  $S_{12}^M(f)$  и  $S_{12}^0(f)$ , соответствующих случаю металлизированной пленки YIG и пленки YIG без металла, соответственно, можно определить вклад металлизации в декремент  $k''$ , исходя из соотношения

$$\Delta k'' = \frac{S_{12}^M(f) - S_{12}^0(f)}{8.68 \cdot L} = \frac{\Delta S_{12}[\text{dB}]}{8.68 \cdot L}$$

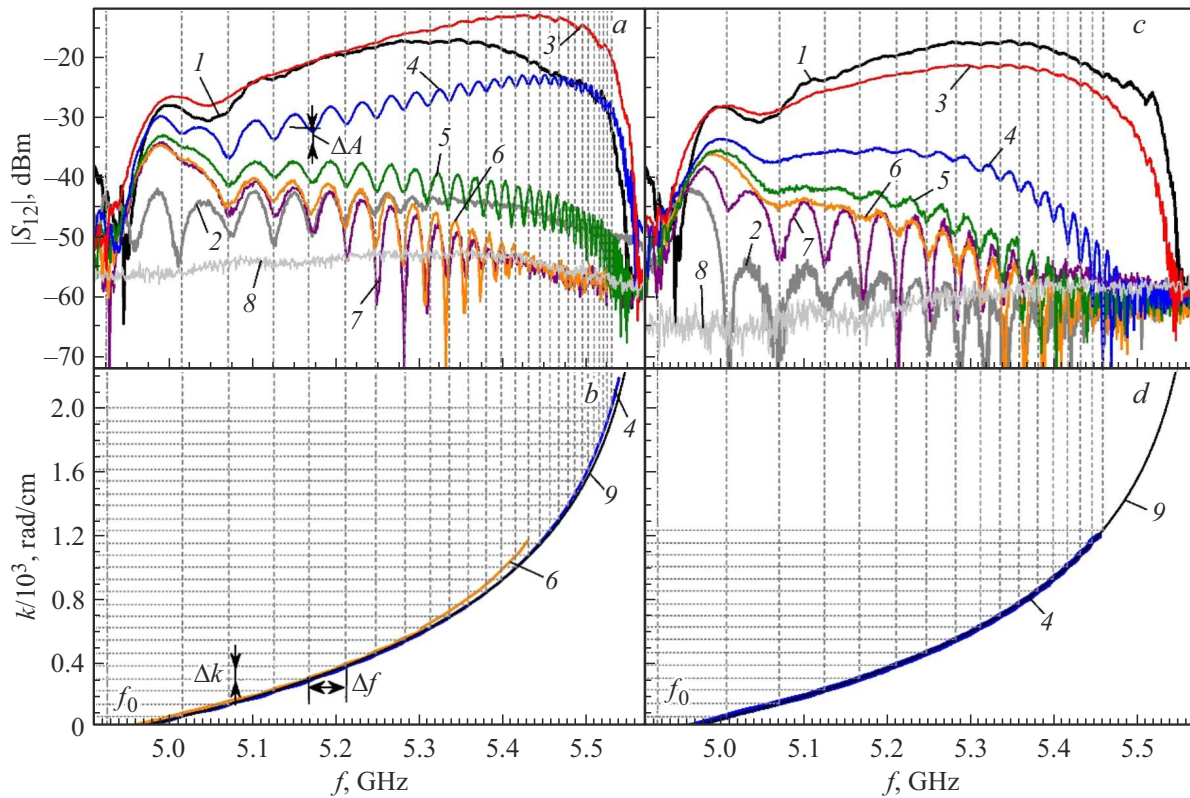
Полученные таким образом экспериментальные кривые  $\Delta k''(f)$  для поля  $316\ \text{Oe}$  (рис. 2, b) хорошо соответствуют теоретическим для  $\delta(\text{Py}) = 25\ \text{nm}$  и  $\delta(\text{Cr}) = 35\ \text{nm}$ . При этом для тех же толщин Py и Cr определенные по набегу фаз экспериментальные дисперсионные кривые  $k'(f)$  также демонстрируют хорошее соответствие теоретическим кривым (рис. 2, a).

Отметим, что область прохождения шириной в  $\approx 20\text{--}80\ \text{MHz}$  ниже частоты  $f_0$  обусловлена обратными объемными магнитостатическими волнами (ОМСВ).



**Рис. 4.** АЧХ коэффициента прохождения в пленке YIG без металлизации (кривая 1), полностью металлизированной YIG (кривая 2); структур с шириной канала  $w = 200\ \mu\text{m}$  (кривая 3),  $100\ \mu\text{m}$  (кривая 4),  $50\ \mu\text{m}$  (кривая 5),  $24\ \mu\text{m}$  (кривая 6),  $12\ \mu\text{m}$  (кривая 7) в декорациях из Py (a) и Cr (b) при поле  $H = 316\ \text{Oe}$ . Длина канала  $L_2 = 800\ \mu\text{m}$ . Частоты  $f_0$ ,  $f_{\text{max}}$ ,  $f_s$  соответствуют рис. 2. Уровень наводки обозначен кривой 8.





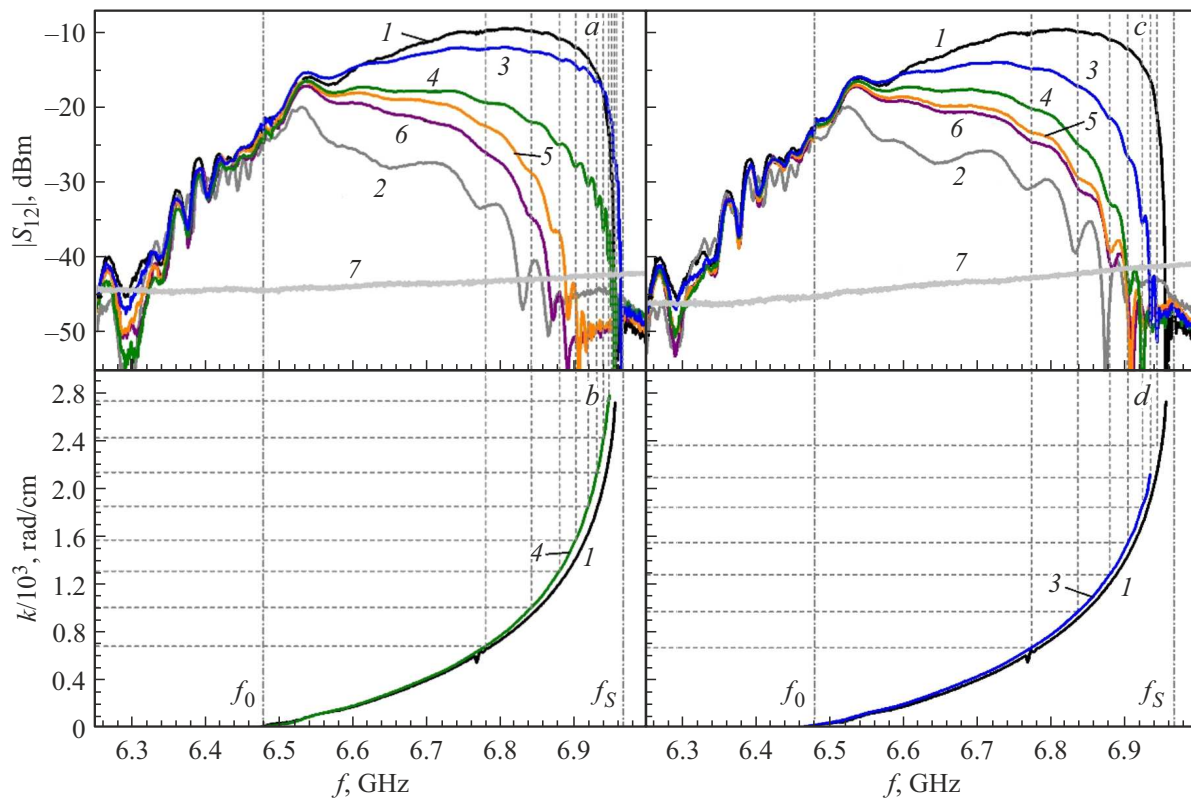
**Рис. 5.** АЧХ (*a, c*) и дисперсионные кривые (*b, d*) для свободной пленки (кривые 1) и структур на основе декораций из Ru (*a, b*) и Cr (*c, d*) с длиной канала  $L_2 = 800 \mu\text{m}$  и шириной  $w = 0 \mu\text{m}$  (кривые 2),  $w = 200 \mu\text{m}$  (кривые 3),  $w = 100 \mu\text{m}$  (кривые 4),  $w = 50 \mu\text{m}$  (кривые 5),  $w = 24 \mu\text{m}$  (кривые 6),  $w = 12 \mu\text{m}$  (кривые 7). Кривая 8 показывает уровень наводки для  $w = 50 \mu\text{m}$ . Внешнее поле  $H = 1077 \text{ Э}$ . Пунктирные линии показывают положения резонансов для  $w = 50 \mu\text{m}$  (*a, b*) и  $w = 100 \mu\text{m}$  (*c, d*).

Из рис. 4 также можно выделить отличие кривых  $S_{12}(f)$  для YIG/Cr и YIG/Ru в коротковолновой области  $[f_{\text{max}}, f_S]$ . Как было отмечено в разделе 3.1, для структуры YIG/Ru дисперсия ПМСВ в слое YIG ограничена диапазоном частот  $[f_0, f_{\text{max}}]$ , где  $f_{\text{max}} < f_S$ . Вследствие этого ширина зоны прохождения ПМСВ в YIG/Ru оказывается меньше соответствующей зоны и в свободной пленке YIG, и в структуре YIG/Cr. Однако разница в ширине зоны прохождения для YIG/Ru и YIG/Cr уменьшалась с ростом приложенного поля от  $\approx 560 \text{ MHz}$  при  $H \approx 120 \text{ Oe}$  практически до нуля для  $H \approx 550 \text{ Oe}$  (при  $L = 820 \mu\text{m}$ ) или  $H \approx 1570 \text{ Oe}$  (при  $L = 220 \mu\text{m}$ ). С дальнейшим ростом поля зона прохождения для металлизации из Ru и Cr оставалась примерно одинаковой ширины. Это связано тем, что с увеличением приложенного поля происходит рост потерь, обусловленных уменьшением групповой скорости ПМСВ, которое, в свою очередь, вызвано уменьшением диапазона  $[f_0, f_S]$  и соответствующим „выполживанием“ дисперсии. При этом регистрируемый в эксперименте диапазон волновых чисел уменьшается, и когда он достигает области, где дисперсионные характеристики для YIG/Ru и YIG/Cr слабо отличаются друг от друга, ширина зон прохождения выравнивается.

### 3.3. Прохождение ПМСВ в структурах с каналами

Перейдем к анализу полученных результатов для структур с каналами и начнем рассмотрение для длины канала в  $L_2 = 800 \mu\text{m}$ . На рис. 4 показаны зависимости  $S_{12}(f)$  для структур с различной шириной канала в декорациях из Ru и Cr при приложенном поле  $H = 316 \text{ Oe}$ , а на рис. 5 — при поле  $H = 1077 \text{ Oe}$ , соответственно.

При наличии канала в металлизации часть волнового пучка от возбуждающей МА попадает в канал, в результате чего кривые  $S_{12}(f)$  оказывались расположенными между кривыми, соответствующими крайним случаям полностью металлизированной и свободной поверхности. Исключение составляет случай канала в Ru шириной  $w = 200 \mu\text{m}$ , для которого кривые  $S_{12}(f)$  демонстрируют меньшие или равные потери на прохождение ПМСВ по сравнению со свободной пленкой YIG. То, что данный эффект происходит только для металлизации из Ru, указывает на влияние магнитной подсистемы декораций. Как было рассмотрено в разделе 3.1, это оказывается возможным в результате эффекта каналирования, обусловленного особенностями дисперсионной характеристики ПМСВ в YIG/Ru и неоднородностью поля на границе канала и декораций. В меньшей сте-



**Рис. 6.** АЧХ (*a, c*) и дисперсионные кривые (*b, d*) для свободной пленки YIG (кривые 1) и структур на основе декораций из Ru (*a, b*) и Cr (*c, d*) с длиной канала  $L_2 = 200 \mu\text{m}$  и шириной  $w = 0 \mu\text{m}$  (кривые 2),  $w = 100 \mu\text{m}$  (кривые 3),  $w = 50 \mu\text{m}$  (кривые 4),  $w = 24 \mu\text{m}$  (кривые 5),  $w = 12 \mu\text{m}$  (кривые 6). Кривая 7 показывает уровень наводки для металлизированного YIG. Внешнее поле  $H = 1573 \text{ Oe}$ . Пунктирные линии показывают положения резонансов для  $w = 100 \mu\text{m}$ , штрихпунктирные линии — положение граничных частот ПМСВ.

пени улучшение прохождения обусловлено эффектом трансформации длины волны, связанным с изменением внутреннего поля по оси канала от входной к выходной антенне. В зависимости от ширины канала между составляющими падающего сигнала (две — это внутренние ПМСВ в декорированных участках YIG/Ru по обеим сторонам от канала, а третья — это ПМСВ в области канала) оказывается разное соотношение, поскольку длина антенн фиксирована  $l_{MA} = 250 \mu\text{m}$ . При  $w = 200 \mu\text{m}$  в канал попадает большая часть входного сигнала, и за счет рассмотренных эффектов трансформации и каналирования прохождения оказывается лучше, чем прохождение ПМСВ в свободной пленке. С уменьшением ширины канала доля сигнала, проходящего через канал, падает, поскольку в эксперименте апертура антенн была фиксированной для всех структур с разной шириной каналов, что и отражается в АЧХ.

Экспериментальные дисперсионные характеристики (рис. 5, *b, d* и рис. 6, *b, d*), полученные из измерений для  $w = 12\text{--}200 \mu\text{m}$ , соответствуют дисперсионным кривым для свободной пленки YIG, что подтверждает прохождение сигнала ПМСВ преимущественно по каналу.

Сравнение кривых  $S_{12}(f)$  для каналов из Cr и Ru (рис. 4, *a* и *b*; рис. 5, *a* и *c*) показывает, что ко-

ротковолновая область АЧХ в структурах из Ru при  $w > 50 \mu\text{m}$  демонстрирует лучшее прохождение за счет описанных эффектов трансформации и каналирования. В то же время при  $w = 12$  и  $24 \mu\text{m}$  прохождение в структурах из Ru оказывается хуже соответствующих структур из Cr, что происходит под воздействием двух причин. Во-первых, сказывается отсутствие разрешенных состояний в  $[f_{\text{max}}, f_S]$  (см. рис. 2) для внутренней ПМСВ в структуре YIG/Ru, что приводит к различному затуханию под металлизированными участками именно в высокочастотной части зоны прохождения. Во-вторых, области сильной неоднородности полей вблизи участков пленки YIG, покрытых Ru, занимают существенную часть каналов при  $w = 12$  и  $24 \mu\text{m}$ .

С ростом поля (при  $H \geq 550 \text{ Oe}$ ) наблюдалось формирование осцилляций в кривых  $S_{12}(f)$  в структурах как из Ru, так и из Cr, включая полностью металлизированную поверхность YIG ( $w = 0$ ) — см. рис. 5. При этом „глубина“ данных осцилляций  $\Delta A$  растет с уменьшением  $w$ . Частоты осцилляций в АЧХ, как следует из экспериментальных дисперсионных характеристик (рис. 5, *b, d*), соответствуют равномерному изменению волновых чисел на  $\Delta k_1 \approx 76.9 \pm 0.5 \text{ rad/cm}$  между соседними провалами, что отвечает пространственному раз-

меру  $2\pi/\Delta k_1 \approx 817.4 \pm 4.8 \mu\text{m}$  близкому к расстоянию между возбуждающей и приемной антеннами. Отслеживание уровня прямой электромагнитной наводки  $S_{12}^{CrT}$  между входной и выходной антеннами показывает немотонный рост  $S_{12}^{CrT}$  с увеличением частоты (ср. кривые 8 на рис. 4 и 5). В то же время с ростом поля падают максимальные значения коэффициента прохождения ПМСВ. В результате уменьшения соотношения сигнал-наводка увеличивается эффект их интерференции, что и проявляется в виде осцилляций в АЧХ коэффициента передачи. Таким образом, указанные осцилляции кардинальным образом отличаются от резонансных особенностей, наблюдавшихся в [17]. Возможно, что отсутствие в данном эксперименте особенностей, описанных в [17], связано с гораздо более тонкими слоями декорирующего металла.

Перейдем к рассмотрению характеристик прохождения в структурах с длиной канала  $L_2 = 200 \mu\text{m}$ . Пример АЧХ и дисперсионных характеристик для рассматриваемых структур из Ру, так и из Сг при поле  $H = 1573 \text{ Oe}$  показан на рис. 6. Вследствие меньшей длины канала зависимости  $S_{12}(f)$  демонстрируют лучшее прохождение как в области ПМСВ, так и в частотном диапазоне  $f < f_0$ , соответствующем ООМСВ. Осцилляции АЧХ в области  $f < f_0$  обусловлены многомодовостью ООМСВ.

Как и для случая  $L_2 = 800 \mu\text{m}$ , при  $L_2 = 200 \mu\text{m}$  в АЧХ ПМСВ формируются осцилляции за счет интерференции с наводкой. Однако за счет меньшего затухания на таких расстояниях интерференция становится возможной при полях  $H \geq 1077 \text{ Oe}$  (для полностью металлизированных пленок YIG), а сами осцилляции менее выражены по „амплитуде“. Интервал по волновым числам между соседними провалами составляет  $\Delta k_2 \approx 287.5 \pm 6.4 \text{ rad/cm}$ , что отвечает пространственному размеру  $2\pi/\Delta k_2 \approx 218.6 \pm 4.9 \mu\text{m}$  в соответствии с уменьшившимся расстоянием между антеннами.

#### 4. Заключение

В настоящей работе изучено распространение ПМСВ в пленках YIG, декорированных пленками пермаллоя и хрома. Показано, что магнитная составляющая металлизации существенно влияет на АЧХ коэффициента прохождения и дисперсии ПМСВ за счет преобразования ПМСВ в YIG во внутреннюю ПМСВ под слоем Ру и формирования неоднородного магнитного поля в области канала в декорациях. Обнаружено, что в декорациях из магнитного металла возможно улучшение прохождения по сравнению со случаем свободной пленки YIG и структур, декорированных немагнитным металлом, за счет эффекта каналирования, обусловленного изменением дисперсии ПМСВ и формированием неоднородного магнитного поля внутри YIG за счет магнитных свойств металла.

#### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 22-22-00563.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] V.V. Kruglyak, S.O. Demokritov, D. Grundler. *J. Phys. D* **43**, 264001 (2010).
- [2] A.A. Serga, A.V. Chumak, B. Hillebrands. *J. Phys. D* **43**, 264002 (2010).
- [3] С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин, Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов. *УФН* **185**, 1099 (2015).
- [4] A. Kozhevnikov, F. Gertz, G. Dudko, Y. Filimonov, A. Khitun. *Appl. Phys. Lett.* **106**, 142409 (2015).
- [5] Y.V. Khivintsev, V.K. Sakharov, A.V. Kozhevnikov, G.M. Dudko, Y.A. Filimonov, A. Khitun. *JMMM* **545**, 168754 (2022).
- [6] C.S. Davies, A.V. Sadovnikov, S.V. Grishin, Y.P. Sharaevsky, S.A. Nikitov, V.V. Kruglyak. *IEEE Trans. Magn.* **51**, 3401904 (2015).
- [7] E.N. Beginin, A.V. Sadovnikov, A.Y. Sharaevskaya, A.I. Stognij, S.A. Nikitov. *Appl. Phys. Lett.* **112**, 122404 (2018).
- [8] V.K. Sakharov, E.N. Beginin, Y.V. Khivintsev, A.V. Sadovnikov, A.I. Stognij, Y.A. Filimonov, S.A. Nikitov. *Appl. Phys. Lett.* **117**, 022403 (2020).
- [9] A. Papp, W. Porod, A.I. Csurgay, G. Csaba. *Sci. Rep.* **7**, 9245 (2017).
- [10] А.В. Вашковский, К.В. Гречушкин, А.В. Стальмахов, В.А. Тюлюкин. *РЭ* **31**, 838 (1986).
- [11] R. Gieniusz, P. Gruszecki, M. Krawczyk, U. Guzowska, A. Stognij, A. Maziewski. *Sci. Rep.* **7**, 8771 (2017).
- [12] Г.М. Дудко, А.В. Кожевников, В.К. Сахаров, А.В. Стальмахов, Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев. *Изв. Саратовского гос. ун-та. Сер.: физика* **18**, 92 (2018).
- [13] А.Ю. Анненков, С.В. Герус, С.И. Ковалев. *ЖТФ* **74**, 98 (2004).
- [14] D.D. Stancil, F.R. Morgenthaler. *J. Appl. Phys.* **54**, 1613 (1983).
- [15] В.И. Зубков, В.И. Щеглов. *РЭ* **46**, 9, 1121 (2001).
- [16] G.A. Vugalter, A.G. Korovin. *J. Phys. D* **31**, 1309 (1998).
- [17] Ю.В. Хивинцев, Г.М. Дудко, В.К. Сахаров, Ю.В. Никулин, Ю.А. Филимонов. *ФТТ* **61**, 1664 (2019).
- [18] А.Г. Веселов, С.Л. Высоцкий, Г.Т. Казаков, А.Г. Сухаревы, Ю.А. Филимонов. *РЭ* **39**, 2067 (1994).
- [19] R.E. Camley, A.A. Maradudin. *Solid State Commun.* **41**, 8, 585 (1982).
- [20] В.И. Зубков, В.А. Епанечников. *Письма в ЖТФ* **11**, 23, 1419 (1985).
- [21] В.И. Зубков, Э.Г. Локк, Б.П. Нам, А.С. Хе, В.И. Щеглов. *ЖТФ* **59**, 12, 115 (1989).
- [22] Ю.А. Филимонов, И.В. Шейн. *ЖТФ* **62**, 1, 187 (1992).
- [23] R.W. Damon, J.R. Eshbach. *J. Phys.Chem. Solids* **19**, 308 (1961).

- [24] M.J. Donahue, D.G. Porter. Interagency Report **NISTIR 6376**. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (1999).
- [25] Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев. РЭ **47**, 1002 (2002).
- [26] В.И. Зубков, В.А. Епанечников, В.И. Щеглов. РЭ **52**, 192 (2007).
- [27] R.A. Gallardo, P. Alvarado-Seguel, T. Schneider, C. Gonzalez-Fuentes, A. Roldán-Molina, K. Lenz, J. Lindner, P. Landeros. *New J. Phys.* **21**, 033026 (2019).
- [28] S.M. Rezende, R.L. Rodriguez-Suarez, M.M. Soares, L.H. Vilela-Leão, D. Ley Domínguez, A. Azevedo. *Appl. Phys. Lett.* **102**, 012402 (2013).
- [29] S.R. Seshadri. *Proc. IEEE* **58**, 3, 506–507 (1970).
- [30] E. Schlomann. *J. Appl. Phys.* **35**, 159 (1964).

*Редактор Ю.Э. Китаев*