



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 14–23
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2023, vol. 23, iss. 1, pp. 14–23
<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-1-14-23>, EDN: AMPCCB

Научная статья
УДК 537.876:537.6

Влияние конечной проводимости металла на свойства обратной объемной магнитоэлектронической волны в слоистых металлизированных структурах



Ю. В. Хивинцев^{1,2✉}, С. Л. Высоцкий^{1,2}, А. С. Джумалиев¹, Ю. А. Филимонов^{1,2}

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Хивинцев Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, ¹ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ; ²доцент кафедры технологии материалов, khivintsev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6228-7428>

Высоцкий Сергей Львович, кандидат физико-математических наук, ¹ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ; ²доцент кафедры технологии материалов, vsotsl@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3151-9297>

Джумалиев Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, dzhas@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5242-3369>

Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, ¹директор; ²заведующий кафедрой технологии материалов, yuri.a.filimonov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2645-6669>

Аннотация. Обсуждается влияние толщины металла с конечной проводимостью и диэлектрического зазора между пленкой железитриового граната (ЖИГ) и металлом на дисперсию и затухание обратной объемной магнитоэлектронической волны (ООВМЭВ). Показано, что при толщинах металла $t \geq 10$ нм омические потери за счет металла существенно превышают собственные магнитные потери в ЖИГ на частотах в единицы гигагерц. Показано также, что металлизацию с диэлектрическим зазором можно использовать для подавления длинноволновой части спектра ООВМЭВ.

Ключевые слова: обратная объемная магнитоэлектроническая волна, слоистая структура феррит – металл, слоистая структура феррит – диэлектрик – металл, железитриовый гранат, дисперсия, затухание

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00563).

Для цитирования: Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Джумалиев А. С., Филимонов Ю. А. Влияние конечной проводимости металла на свойства обратной объемной магнитоэлектронической волны в слоистых металлизированных структурах // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 14–23. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-1-14-23>, EDN: AMPCCB

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Effect of the finite conductivity of a metal on properties of a magnetostatic backward volume wave in layered metallized structures

Y. V. Khivintsev^{1,2✉}, S. L. Vysotskii^{1,2}, A. S. Dzhumaliev¹, Y. A. Filimonov^{1,2}

¹Saratov Branch of the Institute of RadioEngineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia + ²Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Yuri V. Khivintsev, khivintsev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6228-7428>

Sergei L. Vysotskii, vsotsl@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3151-9297>

Aleksandr S. Dzhumaliev, dzhas@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5242-3369>

Yuri A. Filimonov, yuri.a.filimonov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2645-6669>

Abstract. Background and Objectives: Layered structures based on ferrite and metal films are actively studied in magnonics. Usually, the effects associated with the finite conductivity of the metal are not taken into account. The aim of this work was to investigate the influence of the thickness of a metal with finite conductivity on the dispersion and damping of a magnetostatic backward volume wave (MSBVW) in the ferrite-metal and ferrite-insulator-metal structures. **Materials and Methods:** The dispersion equation for MSBVW was derived using Maxwell's equations in the magnetostatic approximation, the Landau-Lifshitz equation, and standard electrodynamic boundary conditions. Calculations were performed for the structures based on yttrium iron garnet (YIG) films with metal resistivity characteristic of silver, indium, and copper. Results of the calculation we compared with results of an experiment on MSBVW propagation in a YIG film metallized by copper performed using a vector network analyzer and microstrip antennas for excitation and detection of the MSBVW. **Results and Conclusions:** It was found that, the metallization



always suppresses MSBVW propagation, and at metal thicknesses $t \geq 10$ nm, the ohmic losses due to the metal significantly exceed the intrinsic magnetic losses in the ferrite. It was also shown that the gap between the ferrite and metal can be used to suppress the long-wavelength part of the MSBVW spectrum.

Keywords: magnetostatic backward volume wave, ferrite-metal layered structure, ferrite-insulator-metal layered structure, yttrium iron garnet, dispersion, attenuation

Acknowledgments: This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-22-00563).

For citation: Khivintsev Y. V., Vysotskii S. L., Dzhumaliev A. S., Filimonov Y. A. Effect of the finite conductivity of a metal on properties of a magnetostatic backward volume wave in layered metallized structures. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2023, vol. 23, iss. 1, pp. 14–23 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-1-14-23>, EDN: AMPCCB

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

Интерес к спиновым (магнитостатическим) волнам (МСВ) в слоистых магнитных структурах обусловлен возможностью построения на их основе широкого класса устройств обработки информации [1–4]. При этом классическим материалом для реализации эффектов распространения МСВ являются пленки железоиттриевого граната (ЖИГ) – феррита, обладающего рекордно низким затуханием спиновых волн среди известных магнетиков [5, 6]. Среди прочего активно исследуются эффекты, связанные с распространением МСВ в металлизированных структурах на основе пленок ЖИГ.

Металл экранирует высокочастотные поля, что позволяет перестраивать дисперсию и затухание МСВ. Это можно использовать для построения устройств обработки СВЧ сигналов [7–9], формирования волновых каналов и, соответственно, управления потоками МСВ [10, 11], формирования магнитных кристаллов на основе пленок ЖИГ [12–16] и управления их свойствами [17–19]. Кроме того, в последние годы значительное внимание уделяется эффектам, связанным с генерацией спинового тока в тонкопленочных структурах ЖИГ – металл в условиях накачки МСВ [20–24]. Подобные структуры рассматриваются в качестве связующего звена между магнитикой и спинтроникой на пути построения энергоэффективных устройств без электрических токов.

В то же время в большинстве работ по металлизированным структурам влиянием металла на МСВ либо пренебрегается (в случае тонких металлических пленок), либо анализ строится на так называемом приближении идеального металла, когда проводимость металла считается бесконечной, и он не вносит омических потерь. Применительно к поверхностной МСВ (ПМСВ) влияние конечной проводимости металла исследовалось в работах [25, 26], где теоретически и экспериментально было показано, что металл может

приводить к значительному поглощению ПМСВ за счет омических потерь, а величиной этих дополнительных «электронных» потерь можно управлять выбором толщины металла. Возможность использования металлических экранов для управления характеристиками ПМСВ обсуждалась также в недавних работах [27–29].

Для объемных МСВ влияние металла с конечной проводимостью, по-видимому, рассматривалось лишь в работах [30, 31]. В [30] исследовалось влияние температуры на характеристики прямых объемных МСВ (ПОМСВ) в структуре феррит – сверхпроводник. В [31] теоретически исследовалось влияние толщины металла с конечной проводимостью на дисперсию и затухание ПОМСВ и обратной объемной МСВ (ООМСВ) в структуре феррит – металл. Однако в этой работе анализ ограничился результатами расчетов лишь для двух значений толщины металла.

Цель данной работы – восполнить указанный пробел относительно влияния металла конечной проводимости на характеристики ООМСВ. В отличие от [31], в данной работе приводятся более детальные данные расчетов по влиянию толщины металла, анализируется влияние диэлектрического зазора между металлом и ферритом, проводится сравнение с экспериментом.

1. Дисперсионное уравнение и параметры расчета

Рассматривалась слоистая структура феррит – диэлектрик – металл, намагниченная полем H_0 касательно, вдоль направления распространения волны, определяемого волновым вектором k'' (геометрия ООМСВ) (см. вставку к рис. 1). Все слои считались изотропными, а феррит – диэлектриком. При этом пренебрегалось наличием нескольких магнитных подрешеток у феррита, т. е. он рассматривался как ферромагнетик, и пренебрегалось влиянием обменного взаимодействия. Металл считался немагнитным, и учитывалась его конечная проводимость.



Задача о нахождении дисперсионного уравнения решалась методом плоских волн по стандартной процедуре (см., например, [26]), используя уравнения Максвелла в магнитоэлектрическом приближении и дополнительно для ферромагнетика уравнение Ландау–Лифшица, а также стандартные электродинамические граничные условия для магнитного поля и индукции. Полученное дисперсионное уравнение имеет вид (в единицах СГС):

$$D_0 \cdot [(\chi_m^2 + k^2) \cdot s(\chi_m t) + 2\chi_m k \cdot c(\chi_m t)] - (\chi_m^2 - k^2) \times s(\chi_m t) \cdot (\chi_f^2 - k^2) \cdot s(\chi_f t) \cdot \exp(-2kh) = 0, \quad (1)$$

где $D_0 = 2k\chi_f \cdot c(\chi_f d) + (\chi_f^2 + k^2) \cdot s(\chi_f d)$ ($D_0 = 0$ – дисперсионное уравнение ООМСВ в свободном ферритовом слое [32]); $c(x) = \exp(x) + \exp(-x)$ и $s(x) = \exp(x) - \exp(-x)$ для $x = \chi_f d$ и $\chi_m t$; $\chi_f = k\sqrt{\frac{(\omega^2 - \omega_H^2)}{(\omega^2 - \omega_0^2)}}$; $\chi_m = k\sqrt{1 - i \cdot \frac{4\pi\omega}{k^2 c^2 \rho}}$; $\omega_H = \gamma H_0$; $\omega_0 = \gamma\sqrt{H_0(H_0 + 4\pi M_0)}$; $4\pi M_0$ и γ – соответственно намагниченность и гиромагнитное отношение феррита; ρ – удельное сопротивление металла; c – скорость света; H_0 – величина поля подмагничивания; $\omega = 2\pi f$; f и k – соответственно частота и волновое число ООМСВ; d , t и h – соответственно толщина ферромагнетика, металла и диэлектрического зазора между ними; i – мнимая единица.

Магнитные потери в феррите учитывались стандартной заменой $H_0 \rightarrow H_0 + i \cdot \Delta H$ [26], где ΔH – полуширина линии ферромагнитного резонанса. Указанное дисперсионное уравнение решалось численно. Для определения корней задавалось действительное значение частоты f и находились комплексные $k = k' + i \cdot k''$, вещественная часть которых (k') определяет дисперсию, а мнимая (k'') – пространственный декремент волны.

Расчеты выполнялись при параметрах, отвечающих ЖИГ толщиной $d = 20$ мкм с $4\pi M_0 = 1.75$ кГс, $\gamma = 1.76 \times 10^7$ рад/с·Э и $\Delta H = 0.5$ Э (типичные параметры для пленок ЖИГ). Удельное сопротивление металла ρ принималось равным 1.6×10^{-6} Ом·см, либо 8×10^{-6} Ом·см, что близко к параметрам серебра («хорошая» проводимость) и индия («плохая» проводимость) соответственно. Поле подмагничивания H_0 считалось равным 200 Э. Варьировались толщина металла t , а также толщина диэлектрического зазора между ЖИГ и металлом h . Расчеты производились для основной (нижней) моды ООМСВ, которая обычно используется в эксперименте.

2. Результаты расчета и их обсуждение

Рис. 1 и 2 иллюстрируют, как меняется дисперсия и затухание ООМСВ при изменении толщины металла t для металлов с «хорошей» и «плохой» проводимостью соответственно в отсутствие зазора между ферритом и металлом ($h = 0$). Отметим, что глубина скин-слоя $l_{sk} = \frac{c}{\sqrt{2\pi\omega\rho}}$ на частоте 1 ГГц для выбранных металлов составляет ≈ 2 и 4.5 мкм соответственно. Для сравнения на этих рисунках приведены также данные для свободного ферритового слоя ($t = 0$) и ферритового слоя нагруженного идеальным металлом ($\rho \rightarrow 0$).

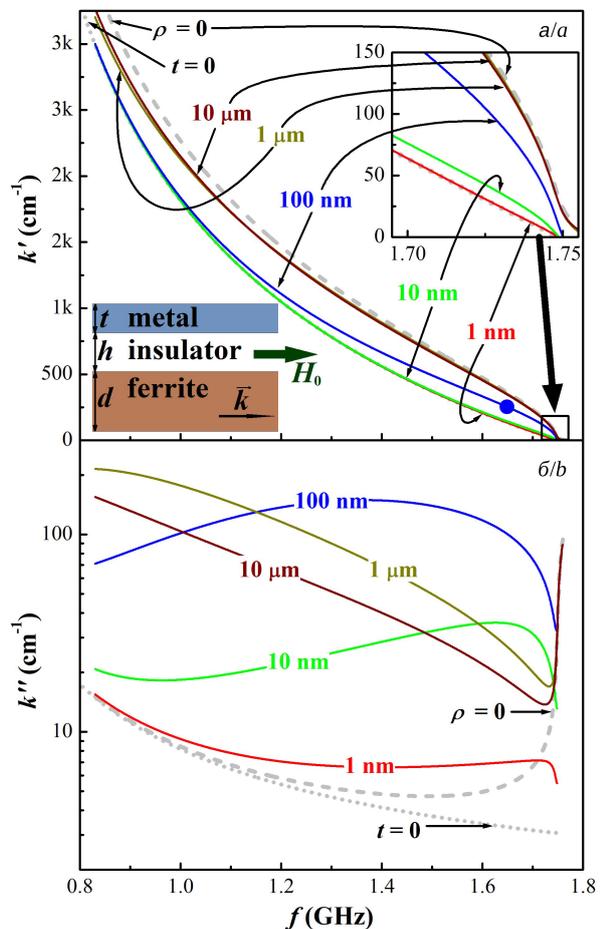


Рис. 1. Дисперсия (а) и частотная зависимость пространственного декремента (б) ООМСВ в структуре ЖИГ – металл с $\rho = 1.6 \times 10^{-6}$ Ом·см при различной t (указана на кривых). Пунктиром и штриховыми линиями показаны данные для свободного слоя ЖИГ ($t = 0$) и с идеальным металлом ($\rho = 0$). На вставке – геометрия задачи (цвет онлайн)

Fig. 1. Dispersion (a) and frequency dependence of the spatial decrement (b) for the MSBVs in the YIG-metal structure with $\rho = 1.6 \times 10^{-6}$ Ohm·cm at different t (indicated on the curves). The dotted and dashed lines show the data for the free YIG layer ($t = 0$) and with the ideal metal ($\rho = 0$). The inset shows the geometry of the problem (color online)

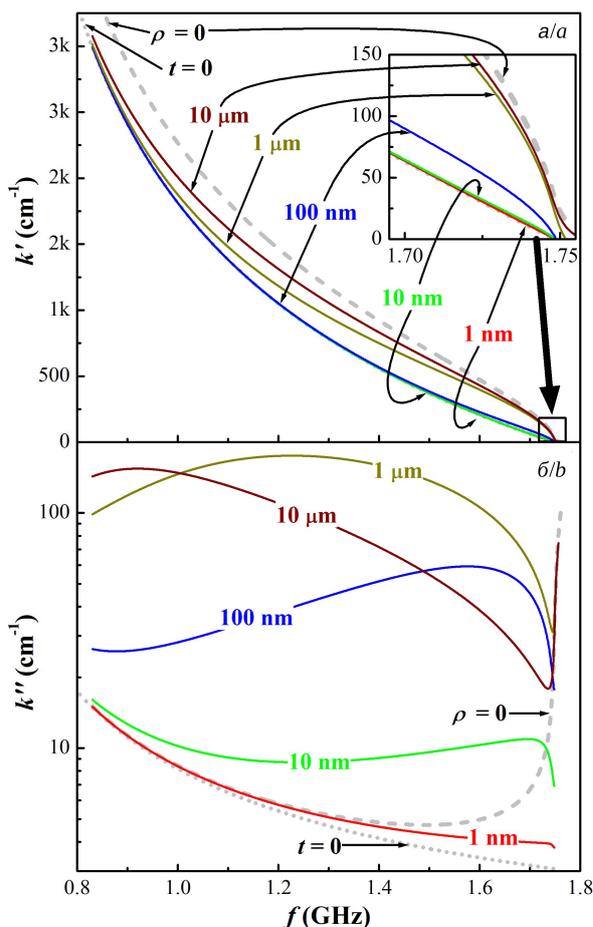


Рис. 2. Дисперсия (а) и частотная зависимость пространственного декремента (б) ООМСВ в структуре ЖИГ – металл с $\rho = 8 \times 10^{-6}$ Ом·см при различной t (указана на кривых). Пунктиром и штриховыми линиями показаны данные для свободного слоя ЖИГ ($t = 0$) и с идеальным металлом ($\rho = 0$) (цвет онлайн)

Fig. 2. Dispersion (a) and frequency dependence of the spatial decrement (b) for the MSBVW in the YIG-metal structure with $\rho = 8 \times 10^{-6}$ Ohm·cm at different t (indicated on the curves). The dotted and dashed lines show the data for the free YIG layer ($t = 0$) and with the ideal metal ($\rho = 0$) (color online)

При $t \approx 1$ нм дисперсия с большой точностью совпадает со случаем свободной пленки ЖИГ. При дальнейшем увеличении t дисперсия стремится перейти с ветви, отвечающей свободному ферриту, на ветвь, соответствующую металлизации идеальным металлом (см. рис. 1, а; 2, а). Указанные изменения начинаются с области малых k' (см. увеличенные области на рис. 1, а; 2, а), где величина проникновения высокочастотного магнитного поля в металл, а следовательно, и эффективность взаимодействия с ним электронов максимальны. При этом существует значение толщины металла ($t \sim 10$ мкм), выше которого $k'(f)$ практически перестает меняться, тем не менее заметно отличаясь от ситуации с идеальным

металлом в области больших k' . Причем указанное отличие тем выше, чем больше ρ (сравни данные рис. 1, а; 2, а).

С увеличением t также существенно меняется затухание ООМСВ (см. рис. 1, б; 2, б). При малых t это изменение опять же начинает проявляться в области малых k' , где даже при $t \sim 1$ нм декремент ООМСВ может увеличиваться в разы при высокой проводимости металла (см. рис. 1, б). При этом k'' может вести себя немонотонно от t : в области малых k' декремент сначала растет с увеличением t (причем тем сильнее, чем выше ρ – сравни данные, приведенные на рис. 1, б; 2, б), затем в зависимости $k''(f)$ формируется минимум вблизи длинноволновой границы (тем ниже, чем выше ρ). Тем не менее затухание ООМСВ, даже при больших толщинах металла (~ 10 мкм), когда k'' перестает зависеть от t , существенно превышает случай как свободной пленки ЖИГ, так и с идеальным металлом (за исключением узкой полосы частот вблизи длинноволновой границы).

Отметим, что в [31] в качестве параметра, характеризующего затухание ООМСВ, использовалось отношение $\delta = t/l_{sk}$, и был сделан вывод, что затухание снижается с увеличением δ . Действительно, такое поведение прослеживается на рис. 1, б и рис. 2, б при больших t . Например, частотная зависимость пространственного декремента $k''(f)$ для $t = 10$ мкм ($\delta = 5$ и 2.2 для рис. 1 и рис. 2 соответственно) принимает значения меньше, чем в случае $t = 1$ мкм ($\delta = 0.5$ и 0.2 для рис. 1 и рис. 2 соответственно). Однако этот вывод не согласуется с данными для малых t , где наблюдается противоположная картина.

Отметим также, что описанное поведение декремента ООМСВ качественно отличается от случая ПМСВ в металлизированной ферритовой пленке. В [25] было показано, что характеристики ПМСВ определяются параметром $G = t/(k'l_{sk}^2)$. При малых толщинах металла ($G \ll 1$) дисперсия ПМСВ слабо отличается от случая свободной пленки ЖИГ, а декремент монотонно растет с толщиной металла. При t , отвечающих $G \sim 1$, ПМСВ становится нераспространяющейся ($k'' \sim k'$). При больших t ($G \gg 1$) распространяющейся становится ПМСВ с дисперсией, близкой к случаю с идеальным металлом, а ее затухание снижается с увеличением t , также приближаясь к случаю с идеальным металлом. Для ООМСВ, как уже отмечалось выше, не наблюдается снижения декремента до уровня, сопоставимого с идеальным металлом при больших t , и, соответственно, параметр G не отражает изменений в затухании



ООМСВ, как для ПМСВ. Тем не менее этот параметр может использоваться для описания поведения дисперсии ООМСВ. Для иллюстрации этого на рис. 1, а кружочком отмечено значение k' , отвечающее $G = 1$ для случая $t = 100$ нм. Видно, что это промежуточное значение между дисперсией свободной пленки и с идеальным металлом. С увеличением k' параметр G уменьшается, и дисперсия приближается к случаю свободной пленки. При уменьшении k' параметр G увеличивается, и дисперсия переходит к случаю с идеальным металлом.

Рис. 3, 4 иллюстрируют влияние зазора между ЖИГ и металлом h на характеристики ООМСВ.

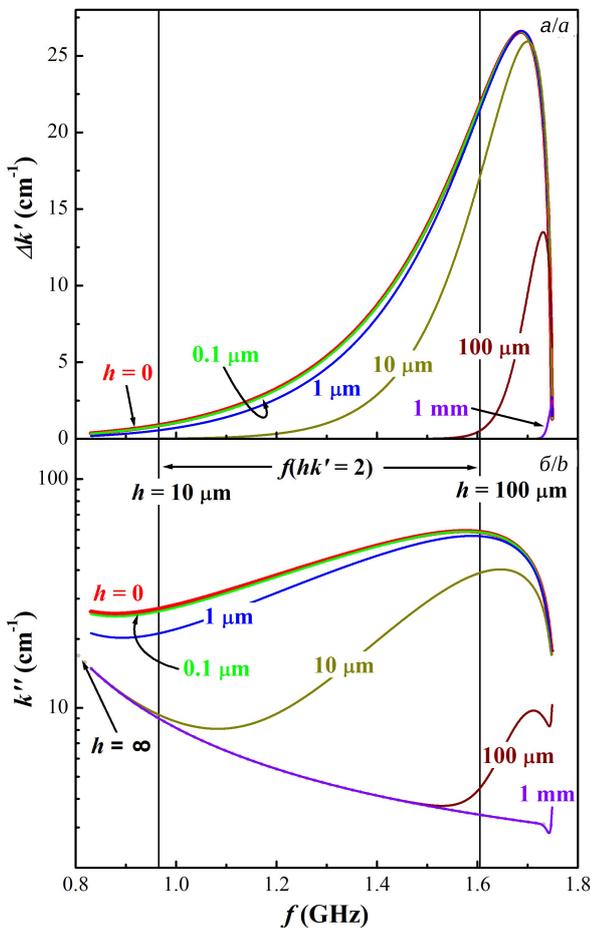


Рис. 3. Частотные зависимости отклонения волнового числа от случая свободного ферритового слоя (а) и частотная зависимость пространственного декремента (б) ООМСВ в структуре ЖИГ – диэлектрик – металл с $\rho = 8 \times 10^{-6}$ Ом·см, $t = 100$ нм при различном h (указана на кривых) (цвет онлайн)

Fig. 3. Frequency dependences of the wave number deviation from the case of the free ferrite layer (a) and frequency dependence of the spatial decrement (b) for the MSBVW in the YIG-insulator-metal structure with $\rho = 8 \times 10^{-6}$ Ohm·cm, $t = 100$ nm for different h (indicated on the curves) (color online)

Рассмотрены случаи с $t = 100$ нм (рис. 3) и 1 мкм (рис. 4) при $\rho = 8 \times 10^{-6}$ Ом·см. На рис. 3, а и рис. 4, а приведены частотные зависимости отклонения волнового числа $\Delta k' = k'(h) - k'(\infty)$, где $k'(h)$ и $k'(\infty)$ – волновые числа ООМСВ при зазоре h и для свободного ферромагнетика соответственно. На рис. 3, б и рис. 4, б представлены частотные зависимости пространственного декремента ООМСВ.

Видно, что по мере увеличения зазора дисперсия и затухание ООМСВ постепенно переходят к случаю свободной пленки ЖИГ. Влияние зазора в (1) описывается показателем в экспоненте hk' . Как показывают расчеты, указанный

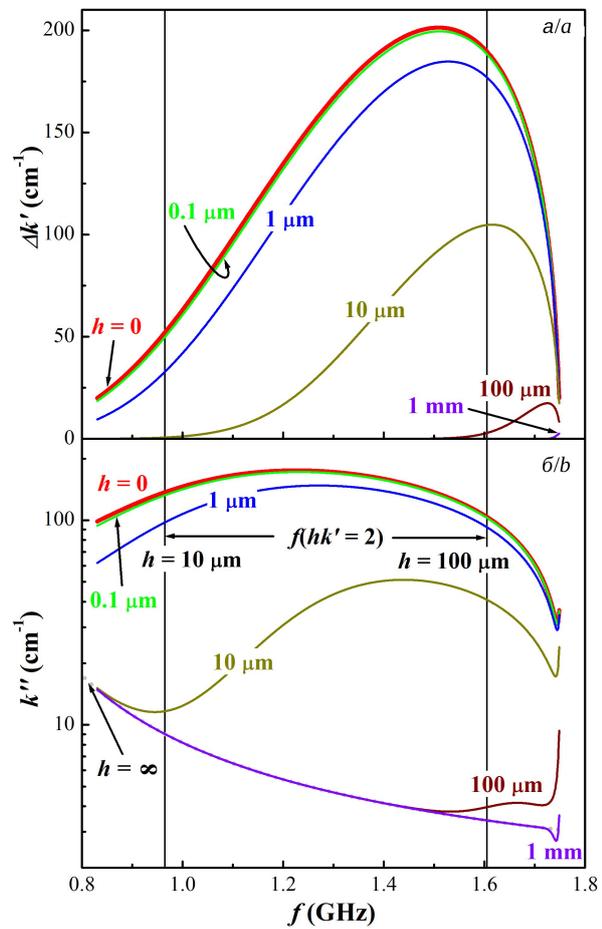


Рис. 4. Частотные зависимости отклонения волнового числа от случая свободного ферритового слоя (а) и частотная зависимость пространственного декремента (б) ООМСВ в структуре ЖИГ–диэлектрик–металл с $\rho = 8 \times 10^{-6}$ Ом·см, $t = 1$ мкм при различном h (указана на кривых) (цвет онлайн)

Fig. 4. Frequency dependences of the wave number deviation from the case of the free ferrite layer (a) and frequency dependence of the spatial decrement (b) for the MSBVW in the YIG-insulator-metal structure with $\rho = 8 \times 10^{-6}$ Ohm·cm, $t = 1 \mu\text{m}$ for different h (indicated on the curves) (color online)



переход происходит при $hk' \sim 2$ (см. вертикальные линии на рис. 3, 4). При этом независимо от толщины металла характеристики ООМСВ ведут себя качественно похожим образом. Наблюдается пик в зависимости $\Delta k'(f)$, вершина которого сдвигается вверх по частоте к длинноволновой границе спектра ООМСВ, а величина уменьшается с ростом h . В зависимости $k''(f)$ формируется полоса дополнительного затухания, начиная с длинноволновой границы, ширина которой и величина дополнительного затухания уменьшаются с ростом h . В то же время величины $\Delta k'$ и k'' зависят от толщины металла: большие t приводят к большим изменениям в дисперсии и затухании ООМСВ.

Таким образом, металлические экраны с зазором можно использовать для подавления длинноволновых ООМСВ. При этом, как показывают приведенные данные, величина подавления в основном определяется толщиной металла, а ширина полосы подавления – величиной зазора между ферромагнетиком и металлом.

3. Сравнение с экспериментом

Эксперимент по влиянию металла конечной проводимости на свойства ООМСВ проводился с пленкой ЖИГ с параметрами: $d = 5.7$ мкм с $4\pi M_0 = 1.75$ кГс и $\Delta H = 0.3$ Э. На пленку ЖИГ через маску с окном шириной, охватывающей полностью ширину пленки ЖИГ, и длиной $l_m = 3$ мм с помощью магнетронного распыления на постоянном токе напылялась пленка меди. После чего образец располагался на микрополосковых преобразователях для возбуждения и приема МСВ так, чтобы металлизированный участок ЖИГ оказался между преобразователями, и измерялись характеристики передачи сигнала с помощью векторного анализатора цепей при $H_0 = 660$ Э (см. вставку к рис. 5). Расстояние между преобразователями составляло $l_a = 4$ мм. Затем процедура напыления повторялась с тем, чтобы нарастить слой меди и выполнить измерения при большей толщине меди. Таким образом были проведены эксперименты с пленкой меди толщиной от 15 нм до 1.5 мкм. Толщина меди контролировалась по времени напыления при известной скорости напыления (15 нм/мин), определенной в тестовом напылении с использованием стилусного профилометра.

В целом эксперимент демонстрировал сильное подавление ООМСВ при наличии металла на поверхности ЖИГ для всего интервала

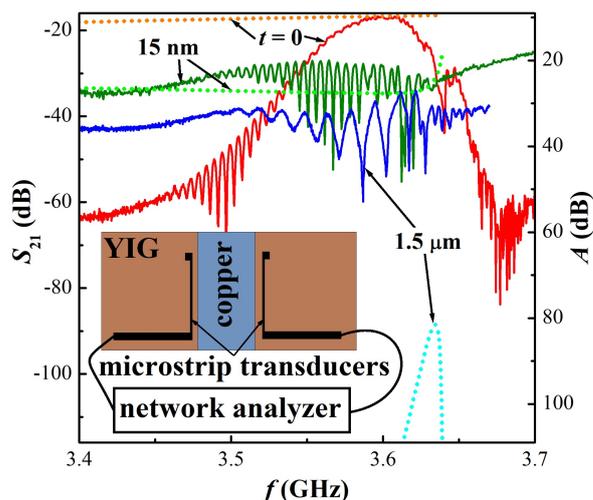


Рис. 5. Экспериментальные частотные зависимости модуля коэффициента передачи для образцов с различной толщиной меди на поверхности (указана рядом с кривыми) – левая ось, сплошные кривые, и рассчитанное затухание ООМСВ, отвечающее эксперименту – правая ось, пунктир. На вставке приведена схема измерений (цвет онлайн)

Fig. 5. Experimental frequency dependences of the transmission coefficient magnitude for the samples with different copper thicknesses on the surface (indicated next to the curves) – the left axis, solid curves, and the calculated attenuation of the MSBVW corresponding to the experiment – the right axis, dotted line. The inset shows the measurement scheme (color online)

толщин меди. На рис. 5 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициента передачи для случаев свободной пленки ЖИГ, а также при минимальной и максимальной толщине меди на ней. На этом же рисунке показаны результаты расчета затухания ООМСВ, выполненные при параметрах эксперимента и пересчитанные в логарифмический масштаб по соотношениям: $A [dB] = 8.68 \cdot k''_0 \cdot l_a$ и $A [dB] = 8.68 \times [k''_0 \cdot (l_a - l_m) + k''_m \cdot l_m]$ для свободной пленки ЖИГ и с металлом соответственно, где k''_m и k''_0 – декременты, рассчитанные с металлом и без него. Левая и правая оси на рисунке сделаны в едином масштабе для удобства сравнения результатов эксперимента и расчета. Отметим, что в расчетах поле подмагничивания было «подстроено» для лучшего соответствия с экспериментом по положению длинноволновой границы спектра ООМСВ и составляло 690 Э. Данное расхождение связано с наличием магнитной анизотропии, которой пренебрегалось в расчетах. Также отметим, что проводимость тонких пленок меди существенно отличается от табличных значений для объемных образцов. Поэтому для образца с $t = 15$ нм выбиралось значение $\rho = 3 \times 10^{-5}$ Ом·см согласно [33], тогда как для образца с $t = 1.5$ мкм



использовалось $\rho = 1.7 \times 10^{-6}$ Ом · см, отвечающее объемной меди.

В отсутствие меди в коэффициенте передачи наблюдалась полоса прохождения ООМСВ в интервале частот 3.46–3.64 ГГц. Причем сравнение с расчетом показывает, что такая узкая полоса прохождения ООМСВ связана не столько с увеличением затухания ООМСВ по мере снижения частоты (увеличения волнового числа), а с фильтрующими свойствами преобразователей, способных возбуждать лишь волны с $k \leq 400$ см⁻¹. Отметим, что при этом экспериментальная дисперсионная зависимость, определенная из фазо-частотной характеристики передачи совпадала с результатами расчета, что свидетельствует об их адекватности.

Наличие металла существенно повышало уровень прямой электромагнитной наводки между преобразователями, что затрудняет строгую количественную оценку экспериментальных потерь ООМСВ и их сравнение с расчетом. О прохождении ООМСВ в этом случае свидетельствовала лишь интерференционная картина на фоне сигнала наводки в частотном интервале, отвечающем прохождению ООМСВ в свободном слое. Тем не менее яркая картина интерференционная картина указывает на то, что уровень прохождения ООМСВ одного порядка с уровнем наводки. Для $t = 15$ нм это хорошо согласуется с результатами расчета. Для $t = 1.5$ мкм хорошего соответствия между экспериментом и расчетом добиться не удалось (в том числе и попыткой подбора ρ в расчетах). При этом обращает на себя внимание следующая особенность. Для $t = 1.5$ мкм период интерференционных осцилляций в АЧХ существенно больше, чем в случае $t = 15$ нм. Это указывает на уменьшение k' , что противоречит ожидаемой перестройке дисперсии ООМСВ под влиянием металла. То есть наблюдавшаяся интерференционная картина в этом случае, возможно, не связана с ООМСВ, прошедшей под металлом, а обусловлена чем-то иным. Причина такого поведения на данный момент непонятна. Отметим лишь, что смена периода интерференции происходила скачком в интервале толщин меди 30–90 нм.

Заключение

Таким образом, на основе проведенных расчетов показано, что металлизация пленки ЖИГ ведет к подавлению ООМСВ за счет омических потерь в металле. В отличие от ПМСВ длина ООМСВ всегда становится меньше при наличии

металла с конечной проводимостью, монотонно изменяясь от случая свободной пленки ЖИГ к случаю с идеальным металлом с увеличением толщины металла. Величина дополнительного затухания ООМСВ, вызванного омическими потерями, немонотонно ведет себя от толщины металлизации t , однако при $t \geq 10$ нм существенно превышает собственные магнитные потери в ЖИГ в частотном диапазоне в единицы гигагерц. Результаты расчета находятся в согласии с экспериментом. Показано также, что диэлектрический зазор между ферритом и металлом может быть использован для подавления длинноволновой части спектра ООМСВ. При этом величина зазора определяет ширину полосы подавления.

Список литературы

1. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D. Magnonics // J. Phys. D : Appl. Phys. 2010. Vol. 43, № 26. Article number 264001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264001>
2. Chumak A. V., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B. Magnon spintronics // Nature Physics. 2015. Vol. 11, № 6. P. 453–461. <https://doi.org/10.1038/nphys3347>
3. Geiler M., Gillette S., Shukla M., Kulik P., Geiler A. L. Microwave magnetics and considerations for systems design // IEEE Journal of Microwaves. 2021. Vol. 1, № 1. P. 438–446. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3035452>
4. Barman A., Gubbiotti G., Ladak S., Adeyeye A. O., Krawczyk M., Gräfe J., Adelman C., Cotofana S., Naeemi A., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Nikitov S. A., Yu H., Grundler D., Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Duquesne J.-Y., Marangolo M., Csaba G., Porod W., Demidov V. E., Urazhdin S., Demokritov S. O., Alibisetti E., Petti D., Bertacco R., Schultheiss H., Kruglyak V. V., Poimanov V. D., Sahoo S., Sinha J., Yang H., Münzenberg M., Moriyama T., Mizukami S., Landeros P., Gallardo R. A., Carlotti G., Kim J.-V., Stamps R. L., Camley R. E., Rana B., Otani Y., Yu W., Yu T., Bauer G. E. W., Back C., Uhrig G. S., Dobrovolskiy O. V., Budinska B., Qin H., van Dijken S., Chumak A. V., Khitun A., Nikonov D. E., Young I. A., Zingsem B. W., Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap // J. Phys : Cond. Matt. 2021. Vol. 33, № 41. Article number 413001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/abec1a>
5. Serga A. A., Chumak A. V., Hillebrands B. YIG magnonics // J. Phys. D : Appl. Phys. 2010. Vol. 43, № 26. Article number 264002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264002>
6. Никитов С. А., Сафин А. Р., Калябин Д. В., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Логунов М. В., Морозова М. А., Одинцов С. А., Осокин С. А., Шараевская А. Ю., Шараевский Ю. П., Кирилук А. И. Диэлектрическая магноники – от гигагерцев к терагерцам // УФН. 2020. Т. 190, № 10. С. 1009–1040. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.07.038609>



7. Hartemann P. Magnetostatic wave planar YIG devices // IEEE Trans. Magn. 1984. Vol. 20, № 5. P. 1272–1277. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063494>
8. Bobyl A., Suris R., Karmanenko S., Semenov A., Melkov A., Konuhov S., Olshevski A. The ferrite/superconductor layered structure for tunable microwave devices // Physica C: Superconductivity. 2002. Vol. 372. P. 508–510. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)00734-7](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)00734-7)
9. Zhang Y., Cai D., Zhao C., Zhu M., Gao Y., Chen Y., Liang X., Chen H., Wang J., Wei Y., He Y., Dong C., Sun N., Zaeimbashi M., Yang Y., Zhu H., Zhang B., Huang K., Sun N. X. Nonreciprocal isolating bandpass filter with enhanced isolation using metallized ferrite // IEEE Trans. MTT. 2020. Vol. 68, № 12. P. 5307–5316. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.3030784>
10. 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. Vol. 31. P. 1309–1319. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/11/004>
11. Хивинцев Ю. В., Дудко Г. М., Сахаров В. К., Никулин Ю. В., Филимонов Ю. А. Распространение спиновых волн в микроструктурах на основе пленок железиттриевого граната, декорированных ферромагнитным металлом // ФТТ. 2019. Т. 61, № 9. С. 1664–1671. <https://doi.org/10.21883/FTT.2019.09.48108.15N>
12. Устинов А. Б., Григорьева Н. Ю., Калиникоз Б. А. Наблюдение солитонов огибающей спиновых волн в периодических магнитных пленочных структурах // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, № 1. С. 34–39.
13. Inoue M., Baryshev A., Takagi H., Lim P. B., Hatafuku K., Noda J., Togo K. Investigating the use of magnonic crystals as extremely sensitive magnetic field sensors at room temperature // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. Article number 132511. <https://doi.org/10.1063/1.3567940>
14. Kanazawa N., Goto T., Hoong J. W., Buyandalai A., Takagi H., Inoue M. Metal thickness dependence on spin wave propagation in magnonic crystal using yttrium iron garnet // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 117, № 17. Article number 17E510. <https://doi.org/10.1063/1.4916815>
15. Высоцкий С. Л., Хивинцев Ю. В., Филимонов Ю. А., Никитов С. А., Стогний А. И., Новицкий Н. Н. Поверхностные спиновые волны в одномерных магнанных кристаллах с двумя пространственными периодами // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 22. С. 66–73.
16. Morozova M. A., Sadovnikov A. V., Matveev O. V., Sharaevskaya A. Yu., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Band structure formation in magnonic Bragg gratings superlattice // J. Phys. D : Appl. Phys. 2020. Vol. 53, № 39. Article number 395002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab95c0>
17. Beginin E. N., Filimonov Y. A., Pavlov E. S., Vysotskii S. L., Nikitov S. A. Bragg resonances of magnetostatic surface spin waves in a layered structure: Magnonic crystal-dielectric-metal // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100, № 25. Article number 252412.
18. Mruczkiewicz M., Krawczyk M., Gubbiotti G., Tacchi S., Filimonov Y. A., Kalyabin D. V., Lisenkov I. V., Nikitov S. A. Nonreciprocity of spin waves in metallized magnonic crystal // New J. Phys. 2013. Vol. 15. Article number 113023. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/11/113023>
19. Морозова М. А., Матвеев О. В. Резонансные и нелинейные явления при распространении магнитостатических волн в мультиферроидных, полупроводниковых и металлизированных структурах на основе ферромагнитных плёнок и магнанных кристаллов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 5. С. 534–553. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003003>
20. Chumak A. V., Serga A. A., Jungfleisch M. B., Neb R., Bozhko D. A., Tiberkevich V. S., Hillebrands B. Direct detection of magnon spin transport by the inverse spin Hall effect // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100, № 8. Article number 082405. <https://doi.org/10.1063/1.3689787>
21. Balinsky M., Ranjbar M., Haidar M., Dürrenfeld P., Khartsev S., Slavin A., Åkerman J., Dumas R. K. Spin pumping and the inverse spin-hall effect via magnetostatic surface spin-wave modes in yttrium-iron garnet/platinum bilayers // IEEE Magn. Lett. 2015. Vol. 6. Article number 3000604. <https://doi.org/10.1109/LMAG.2015.2471276>
22. Balinskiy M., Chiang H., Gutierrez D., Khitun A. Spin wave interference detection via inverse spin Hall effect // Appl. Phys. Lett. 2021. Vol. 118, № 24. Article number 242402. <https://doi.org/10.1063/5.0055402>
23. Nikulin Y. V., Seleznev M. E., Khivintsev Y. V., Sakharov V. K., Pavlov E. S., Vysotskii S. L., Kozhevnikov A. V., Filimonov Yu. A. EMF generation by propagating magnetostatic surface waves in integrated thin-film Pt/YIG structure // Semiconductors. 2020. Vol. 54, № 12. P. 1721–1724. <https://doi.org/10.1134/S106378262012026X>
24. Селезнёв М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Кожеевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Павлов Е. С., Филимонов Ю. А. Влияние трехмагнонных распадов на генерацию ЭДС поверхностными магнитостатическими волнами в интегральных структурах ЖИГ-Pt // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 5. С. 617–643. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003008>
25. Веселов А. Г., Высоцкий С. Л., Казаков Г. Т., Сухарев А. Г., Филимонов Ю. А. Поверхностные магнитостатические волны в металлизированных пленках ЖИГ // РЭ. 1994. Т. 39, № 12. С. 2067–2074.
26. Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В. Взаимодействие поверхностной магнитостатической и объемных упругих волн в металлизированной структуре ферромагнетик-диэлектрик // РЭ. 2002. Т. 47. С. 1002–1007.
27. Bunyaev S. A., Serha R. O., Musiienko-Shmarova H. Y., Kreil A. J., Frey P., Bozhko D. A., Vasyuchka V. I., Verba R. V., Kostylev M., Hillebrands B., Kakazei G. N., Serga A. A. Spin-wave relaxation by eddy currents in Y₃Fe₅O₁₂/Pt bilayers and a way to suppress it // Phys. Rev. Appl. 2020. Vol. 14, № 2. Article number 024094. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.024094>
28. Xu J., Liao Z., Wang Q., Liu B., Tang X., Zhong Z., Zhang L., Zhang Y., Zhang H., Jin L. Enhancement



- of low-k spin-wave transmission efficiency with a record-high group velocity in YIG/nonmagnetic metal heterojunctions // *Advanced Electronic Materials*. 2022. Article number 2201061. <https://doi.org/10.1002/aelm.202201061>
29. Serha R. O., Bozhko D. A., Agrawal M., Verba R. V., Kostylev M., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Serga A. A. Low-damping spin-wave transmission in YIG/Pt-interfaced structures // *Advanced Materials Interfaces*. 2022. Vol. 9, № 36. Article number 2201323. <https://doi.org/10.1002/admi.202201323>
30. Гуляев Ю. В., Огрин Ю. Ф., Ползикова Н. И., Раевский А. О. Наблюдение поглощения объемных спиновых волн в структуре магнетик-сверхпроводник // ФТТ. 1997. Т. 39, № 9. С. 1628–1630.
31. Chakrabarti S., Bhattacharya D. Magnetostatic volume waves in lossy YIG film backed by a metal of finite conductivity // *IEEE Trans. MTT*. 1999. Vol. 47, № 7. P. 1132–1134. <https://doi.org/10.1109/22.775448>
32. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // *J. Phys. Chem. Solids*. 1961. Vol. 19, № 3-4. P. 308–320. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(61\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(61)90041-5)
33. Быков Ю. А., Карпунин С. Д., Газукина Е. И. О некоторых особенностях структуры и свойств металлических «тонких» пленок // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 6. С. 45–47.
1. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D. Magnonics. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 2010, vol. 43, no. 26, article no. 264001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264001>
2. Chumak A. V., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nature Physics*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 453–461. <https://doi.org/10.1038/nphys3347>
3. Geiler M., Gillette S., Shukla M., Kulik P., Geiler A. L. Microwave magnetics and considerations for systems design. *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, vol. 1, no. 1, pp. 438–446. <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3035452>
4. Barman A., Gubbiotti G., Ladak S., Adeyeye A. O., Krawczyk M., Gräfe J., Adelman C., Cotofana S., Naeemi A., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Nikitov S. A., Yu H., Grundler D., Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Duquesne J.-Y., Marangolo M., Csaba G., Porod W., Demidov V. E., Urazhdin S., Demokritov S. O., Albisetti E., Petti D., Bertacco R., Schultheiss H., Kruglyak V. V., Poimanov V. D., Sahoo S., Sinha J., Yang H., Müzenberg M., Moriyama T., Mizukami S., Landeros P., Gallardo R. A., Carlotti G., Kim J.-V., Stamps R. L., Camley R. E., Rana B., Otani Y., Yu W., Yu T., Bauer G. E. W., Back C., Uhrig G. S., Dobrovolskiy O. V., Budinska B., Qin H., van Dijken S., Chumak A. V., Khitun A., Nikonov D. E., Young I. A., Zingsem B. W., Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap. *J. Phys : Cond. Matt.*, 2021, vol. 33, no. 41, article no. 413001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/abec1a>
5. Serga A. A., Chumak A. V., Hillebrands B. YIG magnonics. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 2010, vol. 43, no. 26, article no. 264002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264002>
6. Nikitov S. A., Safin A. R., Kalyabin D. V., Sadovnikov A. V., Beginin E. N., Logunov M. V., Morozova M. A., Odintsov S. A., Osokin S. A., Sharaevskaya A. Yu., Sharaevskiy Yu. P., Kirilyuk A. I. Dielectric magnonics: From gigahertz to terahertz. *Physics-Uspokhi*, 2020, vol. 63, no. 10, pp. 945–974. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.07.038609>
7. Hartemann P. Magnetostatic wave planar YIG devices. *IEEE Trans. Magn.*, 1984, vol. 20, no. 5, pp. 1272–1277. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063494>
8. Bobyl A., Suris R., Karmanenko S., Semenov A., Melkov A., Konuhov S., Olshevski A. The ferrite/superconductor layered structure for tunable microwave devices. *Physica C : Superconductivity*, 2002, vol. 372, pp. 508–510. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)00734-7](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)00734-7)
9. Zhang Y., Cai D., Zhao C., Zhu M., Gao Y., Chen Y., Liang X., Chen H., Wang J., Wei Y., He Y., Dong C., Sun N., Zaeimbashi M., Yang Y., Zhu H., Zhang B., Huang K., Sun N. X. Nonreciprocal isolating bandpass filter with enhanced isolation using metallized ferrite. *IEEE Trans. MTT*, 2020, vol. 68, no. 12, pp. 5307–5316. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.3030784>
10. 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, vol. 31, pp. 1309–1319. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/11/004>
11. Khivintsev Y. V., Dudko G. M., Sakharov V. K., Nikulin Y. V., Filimonov Y. A. Propagation of spin waves in microstructures based on yttrium-iron garnet films decorated by a ferromagnetic metal. *Physics Solid State*, 2019, vol. 61, pp. 1614–1621. <https://doi.org/10.1134/S1063783419090129>
12. Ustinov A. B., Grigor'eva N. Y., Kalinikos B. A. Observation of spin-wave envelope solitons in periodic magnetic film structures. *JETP Letters*, 2008, vol. 88, pp. 31–35. <https://doi.org/10.1134/S0021364008130079>
13. Inoue M., Baryshev A., Takagi H., Lim P. B., Hatafuku K., Noda J., Togo K. Investigating the use of magnonic crystals as extremely sensitive magnetic field sensors at room temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, article no. 132511. <https://doi.org/10.1063/1.3567940>
14. Kanazawa N., Goto T., Hoong J. W., Buyandalai A., Takagi H., Inoue M. Metal thickness dependence on spin wave propagation in magnonic crystal using yttrium iron garnet. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 117, no. 17, article no. 17E510. <https://doi.org/10.1063/1.4916815>
15. Vysotskii S. L., Khivintsev Yu. V., Filimonov Yu. A., Nikitov S. A., Stognii A. I., Novitskii N. N. Surface spin waves in one-dimensional magnonic crystals with two spatial periods. *Tech. Phys. Lett.*, 2015, vol. 41, pp. 1099–1102. <https://doi.org/10.1134/S1063785015110267>
16. Morozova M. A., Sadovnikov A. V., Matveev O. V., Sharaevskaya A. Yu., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A. Band structure formation in magnonic Bragg gratings superlattice. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 2020,



- vol. 53, no. 39, article no. 395002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab95c0>
17. Beginin E. N., Filimonov Y. A., Pavlov E. S., Vysotskii S. L., Nikitov S. A. Bragg resonances of magnetostatic surface spin waves in a layered structure: Magnonic crystal-dielectric-metal. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, no. 25, article no. 252412.
 18. Mruczkiewicz M., Krawczyk M., Gubbiotti G., Tacchi S., Filimonov Y. A., Kalyabin D. V., Lisenkov I. V., Nikitov S. A. Nonreciprocity of spin waves in metallized magnonic crystal. *New J. Phys.*, 2013, vol. 15, article no. 113023. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/11/113023>
 19. Morozova M. A., Matveev O. V. Resonant and nonlinear phenomena during the propagation of magnetostatic waves in multiferroic, semiconductor and metallized structures based on ferromagnetic films and magnonic crystals. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 30, no. 5, pp. 534–553. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003003>
 20. Chumak A. V., Serga A. A., Jungfleisch M. B., Neb R., Bozhko D. A., Tiberkevich V. S., Hillebrands B. Direct detection of magnon spin transport by the inverse spin Hall effect. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, no. 8, article no. 082405. <https://doi.org/10.1063/1.3689787>
 21. Balinsky M., Ranjbar M., Haidar M., Dürrenfeld P., Khartsev S., Slavin A., Åkerman J., Dumas R. K. Spin pumping and the inverse spin-hall effect via magnetostatic surface spin-wave modes in yttrium-iron garnet/platinum bilayers. *IEEE Magn. Lett.*, 2015, vol. 6, article no. 3000604. <https://doi.org/10.1109/LMAG.2015.2471276>
 22. Balinskiy M., Chiang H., Gutierrez D., Khitun A. Spin wave interference detection via inverse spin Hall effect. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, vol. 118, no. 24, article no. 242402. <https://doi.org/10.1063/5.0055402>
 23. Nikulin Y. V., Seleznev M. E., Khivintsev Y. V., Sakharov V. K., Pavlov E. S., Vysotskii S. L., Kozhevnikov A. V., Filimonov Y. A. EMF generation by propagating magnetostatic surface waves in integrated thin-film Pt/YIG structure. *Semiconductors*, 2020, vol. 54, no. 12, pp. 1721–1724. <https://doi.org/10.1134/S106378262012026X>
 24. Seleznev M. E., Nikulin Y. V., Khivintsev Y. V., Vysotskii S. L., Kozhevnikov A. V., Sakharov V. K., Dudko G. M., Pavlov E. S., Filimonov Y. A. Influence of three-magnon decays on electromotive force generation by magnetostatic surface waves in integral YIG-Pt structures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 30, no. 5, pp. 617–643. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003008>
 25. Veselov A. G., Vysotskii S. L., Kazakov G. T., Sukharev A. G., Filimonov Y. A. Magnetostatic surface waves in metallized YIG films. *Radiotekh. Elektron.*, 1994, vol. 39, no. 12, pp. 2067–2074 (in Russian).
 26. Filimonov Y. A., Khivintsev Y. V. Interaction between a magnetostatic surface wave and bulk elastic waves in a metallized ferromagnet-dielectric structure. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2002, vol. 47, no. 8, pp. 910–915.
 27. Bunyaev S. A., Serha R. O., Musiienko-Shmarova H. Y., Kreil A. J., Frey P., Bozhko D. A., Vasyuchka V. I., Verba R. V., Kostylev M., Hillebrands B., Kakazei G. N., Serga A. A. Spin-wave relaxation by eddy currents in $Y_3Fe_5O_{12}/Pt$ bilayers and a way to suppress it. *Phys. Rev. Appl.*, 2020, vol. 14, no. 2, article no. 024094. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.024094>
 28. Xu J., Liao Z., Wang Q., Liu B., Tang X., Zhong Z., Zhang L., Zhang Y., Zhang H., Jin L. Enhancement of low-k spin-wave transmission efficiency with a record-high group velocity in YIG/nonmagnetic metal heterojunctions. *Advanced Electronic Materials*, 2022, article no. 2201061. <https://doi.org/10.1002/aelm.202201061>
 29. Serha R. O., Bozhko D. A., Agrawal M., Verba R. V., Kostylev M., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Serga A. A. Low-damping spin-wave transmission in YIG/Pt-interfaced structures. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, vol. 9, no. 36, article no. 2201323. <https://doi.org/10.1002/admi.202201323>
 30. Gulyaev Y. V., Ogrin Yu. F., Polzikova N. I., Raevskii A. O. Absorption of volume spin waves in magnet-superconductor structures. *Physics of the Solid State*, 1997, vol. 39, pp. 1451–1453.
 31. Chakrabarti S., Bhattacharya D. Magnetostatic volume waves in lossy YIG film backed by a metal of finite conductivity. *IEEE Trans. MTT*, 1999, vol. 47, no. 7, pp. 1132–1134. <https://doi.org/10.1109/22.775448>
 32. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids*, 1961, vol. 19, no. 3–4, pp. 308–320. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(61\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(61)90041-5)
 33. Bykov Y. A., Karpukhin S. D., Gazukina E. I. About some features of the structure and properties of metallic “thin” films. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2000, no. 6, pp. 45–47 (in Russian).

Поступила в редакцию 09.12.2022; одобрена после рецензирования 12.01.2023; принята к публикации 15.01.2023
The article was submitted 09.12.2022; approved after reviewing 12.01.2023; accepted for publication 15.01.2023