



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 76–87

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 76–87

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-76-87>, EDN: OACSTN

Научная статья

УДК 537.876.4



Каналирование поверхностных магнитостатических волн с помощью декорирования металлами поверхности плёнок ферритов

В. К. Сахаров^{1,2}, Ю. В. Хивинцев^{1,2}✉, А. С. Джумалиев¹, Ю. В. Никулин^{1,2}, А. В. Кожевников¹, 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

Сахаров Валентин Константинович, кандидат физико-математических наук, ¹старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ; ²доцент кафедры технологии материалов, valentin@sakharov.info, <https://orcid.org/0000-0001-7168-1198>

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>

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

Никулин Юрий Васильевич, кандидат физико-математических наук, ¹старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ; ²доцент кафедры технологии материалов, ynikulin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2957-5468>

Кожевников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, kzhavl@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8904-475X>

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

Аннотация. Представлены экспериментальные результаты по особенностям прохождения поверхностной магнитостатической волны в плёнке железо-иттриевого граната, на поверхности которой сформированы каналы в металлических декорациях из хрома и пермаллоя. Обсуждается влияние толщины металлических декораций, наличия у них магнитных свойств, а также ширины образуемого канала на вид амплитудно-частотных характеристик прошедшего через микроструктуры сигнала. Показывается возможность каналирования поверхностной магнитостатической волны для случая декораций из плёнки пермаллоя толщиной 30 нм и плёнки хрома толщиной 1.5 мкм. Данные микроструктуры при ширине канала в 200 мкм демонстрируют эффект «просветления» в амплитудно-частотных характеристиках коэффициента передачи поверхностной магнитостатической волны.

Ключевые слова: магнитостатические волны, железо-иттриевый гранат, декорированные поверхности, каналирование, микроантенны

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00563).

Для цитирования: Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Джумалиев А. С., Никулин Ю. В., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А. Каналирование поверхностных магнитостатических волн с помощью декорирования металлами поверхности плёнок ферритов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 76–87. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-76-87>, EDN: OACSTN

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

Article

Channeling of magnetostatic surface waves by decoration of ferrite films with metals

V. K. Sakharov^{1,2}, Y. V. Khivintsev^{1,2}✉, A. S. Dzhumaliev^{1,2}, Y. V. Nikulin^{1,2}, A. V. Kozhevnikov¹, 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

Valentin K. Sakharov, valentin@sakharov.info, <https://orcid.org/0000-0001-7168-1198>

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

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

Yuri V. Nikulin, ynikulin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2957-5468>

Alexander V. Kozhevnikov, kzhavl@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8904-475X>

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

© Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Джумалиев А. С., Никулин Ю. В., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А., 2024



Abstract. Background and Objectives: One of the main tasks for developing magnonic devices is to form and control spin wave beams. For this purpose, the decoration of ferrite films with magnetic or non-magnetic metal areas can be used. The aim of this work is to study the peculiarities of magnetostatic surface wave (MSSW) propagation in the channels formed in yttrium-iron garnet (YIG) films by deposition of 1.5 μm thick metal decorations from chromium (Cr) and permalloy (Py). **Materials and Methods:** Studied samples were fabricated on the base of 6.5 μm -thick epitaxial YIG film by the DC magnetron sputtering, photolithography, and ion etching techniques. Frequency dependencies of magnitude and phase of the transmitted MSSW signal at different applied magnetic field were measured with the help of a vector network analyzer and a microwave probe station. Calculation of the dispersions and insertion losses for MSSW propagating in the metallized YIG film was performed on the basis of Maxwell's equations in the magnetostatic approximation, the Landau-Lifshitz equation, and standard electrodynamic boundary conditions. **Results and Conclusion:** The optimal channel width w relative to the antenna aperture providing channeling of the MSSW signal with the possibility of "antireflective effect" for the transmitted signal has been found to be $w = 200 \mu\text{m}$. It has been shown that for the formation of channeling effect, one needs to use a non-magnetic metal with the thickness leading to a transition to the "metallic" branch of the MSSW dispersion or a magnetic metal with the thickness resulting in bending of a short-wavelength part of MSSW dispersion. For the studied samples, it is $d(\text{Cr}) = 1.5 \mu\text{m}$ and $d(\text{Py}) = 30 \text{ nm}$, respectively. The obtained results demonstrate the possibility of using the channels in metallic decorations for the formation of directed spin wave beams.

Keywords: magnetostatic waves, yttrium-iron garnet, decorated surfaces, channeling, microantennas

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-22-00563).

For citation: Sakharov V. K., Khivintsev Y. V., Dzhumaliev A., Nikulin Y. V., Kozhevnikov A. V., Filimonov Y. A. Channeling of magnetostatic surface waves by decoration of ferrite films with metals. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 76–87 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-76-87>, EDN: OACSTN

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

Введение

Применение спиновых волн (СВ) в качестве переносчиков информации потенциально может увеличить энергоэффективность и рабочие частоты создаваемых на их основе устройств по сравнению с устройствами микроэлектроники за счёт отсутствия переноса заряда [1]. Активные исследования в этой области ознаменовали появление магноники [2–4]. Обеспечение требуемой функциональности устройств магноники невозможно без наличия методов эффективного формирования пучков СВ и управления их распространением. По этой причине постоянно идёт поиск и развитие таких способов. Наиболее распространённым и изученным методом остаётся непосредственное вытравливание плёночных волноводов [5–7]. Среди других способов можно выделить фокусировку СВ преобразователями сложной формы [8–10], использование рельефа подложек [11, 12], неоднородной конфигурации внешних полей [13, 14], а также декорирование поверхности плёнок ферритов магнитными и немагнитными металлами [15–17]. Последний метод обладает несколькими положительными особенностями. Во-первых, его технологически проще реализовать по сравнению с другими перечисленными методами. Во-вторых, декорирование обладает довольно широкими возможностями подстройки: в зависимости от толщины металла и его проводимости можно варьировать вносимые потери на распространение СВ [18], переход на одну или вторую «ветку» дисперсионной кривой в случае поверхностных магнитоэлектронных волн (ПМСВ) [19]. Кроме того,

наличие магнитных свойств у металлических декораций существенно видоизменяет дисперсионные кривые ПМСВ и распределения полей в нижележащем слое феррита. В этом случае на границе двух магнитных слоёв формируется так называемая внутренняя ПМСВ [20–22].

Ранее было проведено экспериментальное сравнение особенностей распространения ПМСВ в плёнке железо-иттриевого граната (ЖИГ) через каналы, сформированные за счёт декораций из «тонких» (30–50 нм) – толщиной много меньшей глубины скин-слоя – немагнитного и магнитного металлов [16, 17]. В случае отсутствия магнитных свойств «тонкий» металл не изменяет дисперсии ПМСВ в нижележащей плёнке ЖИГ, однако увеличивает потери ПМСВ под металлом. Было показано, что наличие магнитной составляющей у металлических декораций, образующих канал, может улучшать прохождение ПМСВ по сравнению со свободной плёнкой ЖИГ и каналами в немагнитных декорациях за счёт изменения дисперсии ПМСВ и формирования неоднородного магнитного поля. Особенно сильно этот эффект проявляется вблизи коротковолновой границы спектра ПМСВ для свободной плёнки ЖИГ, на частотах, на которых ПМСВ под магнитным металлом не существует.

Цель представляемой работы состоит в изучении особенностей распространения ПМСВ в каналах, сформированных в плёнках ЖИГ декорированием их поверхностей «толстыми» ($\approx 1.5 \mu\text{m}$) – толщиной порядка глубины скин-слоя – плёнками металлов, которые приводят к переходу дисперсии ПМСВ, распространяю-



щейся в нижележащем слое ЖИГ, на ветку, соответствующую покрытию «идеальным» металлом. Так же как и в [17], в данной работе использовались два металла с близкой удельной проводимостью: магнитный – пермаллой (Рy) и немагнитный – хром (Сr).

1. Методы и материалы

Исследуемые структуры, схематическое изображение и микрофотографии которых показаны на рис. 1, изготавливались на основе эпитаксиальной плёнки ЖИГ на подложке гадолиний галлиевого граната (ГГГ). Эффективная намагниченность $4\pi M$ плёнки ЖИГ составляла 1830 Гс, толщина – $d(\text{YIG}) = 6.5$ мкм. Формирование декораций из Рy и Сr, а также нанесение медных микроантенн (МА) и контактных площадок к ним осуществлялось с помощью методов магнетронного распыления на постоянном токе, фотолитографии и последующего ионного травления, аналогично работам [16, 17].

Эксперименты проводились с двумя наборами микроструктур. В первом толщина d элементов из Рy и Сr составляла ≈ 1.5 мкм, а во втором наборе – ≈ 30 нм. Измеренное четырёхзондовым методом удельное сопротивление ρ используемых металлов составляло $\rho(\text{Cr}) \approx 0.17$ и $\rho(\text{Py}) \approx 0.11$ мкОм·м для структур с $d \approx 1.5$ мкм и $\rho(\text{Cr}) \approx 0.61$ и $\rho(\text{Py}) \approx 0.73$ мкОм·м для структур с $d \approx 30$ нм. Каналы, сформированные из данных металлов на поверхности плёнки ЖИГ, имели ширину $w = 50, 100$ и 200 мкм. Помимо этого,

для целей сравнения рассматривались структуры без декораций между МА («свободная» плёнка ЖИГ) и полностью металлизированная поверхность плёнки ЖИГ между входной и выходной антеннами ($w = 0$ мкм). Каждый набор микроструктур с одной толщиной декораций изготавливался на отдельной пластине ЖИГ/ГГГ размером $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$. При этом расстояние между соседними микроструктурами на одной пластине составляло ≈ 0.8 мм. Отметим, что особенности прохождения ПМСВ в структурах с толщиной металла ≈ 30 нм ранее обсуждались [17], в данной работе приводятся дополнительные данные по этим структурам в целях сравнения со структурами на основе «толстых» металлов.

Медные МА и контактные площадки имели толщину ≈ 850 нм. Ширина используемых МА составляла $w_{ma} = 4$ мкм, а длина (апертура) – $l_{ma} = 250$ мкм. Это приводило к возможности возбуждения ПМСВ с волновыми числами $k \leq \pi/w_{ma} \approx 8000$ рад/см. Расстояние между входной и выходной антеннами было $L = 820$ мкм для всех изучаемых структур.

Изготовленные структуры помещались между полюсами электромагнита, и к контактным площадкам от МА прижимались СВЧ-зонды, соединённые с векторным анализатором цепей коаксиальным трактом. При внешнем магнитном поле H , приложенном в плоскости плёнки параллельно оси МА, что отвечало конфигурации ПМСВ [23], измерялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) – $|S_{12}(f)|$ и фазочастотные

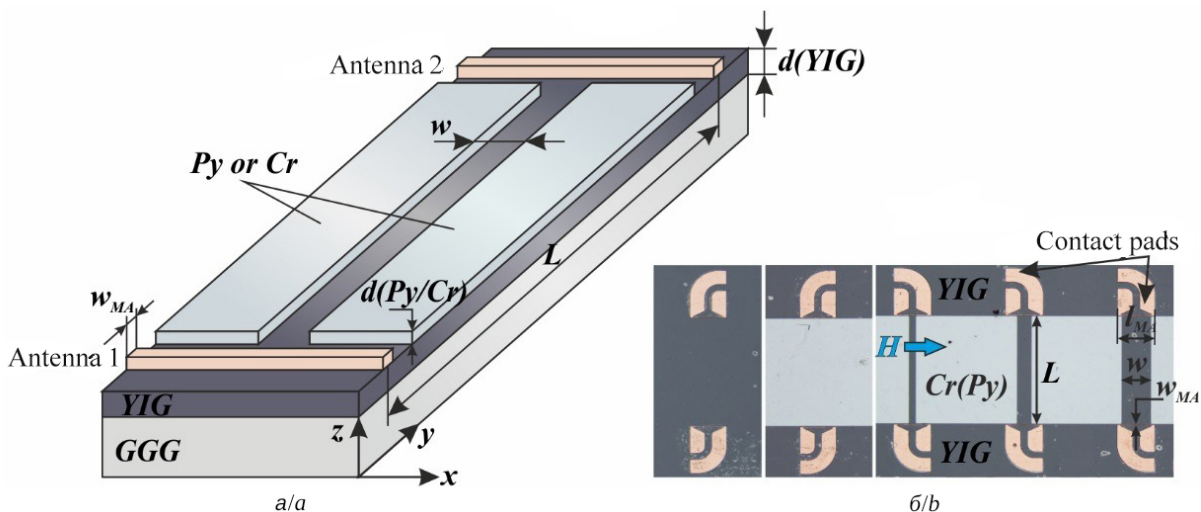


Рис. 1. Схематическое изображение (а) и микрофотографии (б) исследуемых структур (слева направо): свободный ЖИГ, металлизированный ЖИГ, канал в декорациях с шириной $w = 50, 100$ и 200 мкм (цвет онлайн)

Fig. 1. Schematic view (a) and microphotographs (b) of the studied structures (from left to right): free YIG, metallized YIG, channel in the decorations with the width $w = 50, 100$, and $200 \mu\text{m}$ (color online)



характеристики (ФЧХ) – $\phi(f)$ коэффициента передачи S_{12} , соответствующего ПМСВ, «прижатой» к поверхности с МА и металлическими декорациями. Из измеренных ФЧХ по стандартной процедуре [24] затем получались дисперсионные характеристики. Мощность сигнала P_{in} , подаваемого на входную МА, была меньше порога параметрической неустойчивости и составляла $P_{in} = -40$ дБм для диапазона $H = 0.12-0.81$ кЭ и $P_{in} = -25$ дБм для $H > 0.81$ кЭ.

Для анализа результатов измерений прохождения ПМСВ в микроструктурах с декорациями из Ру рассчитывалось равновесное распределение намагниченности и полного поля с использованием программы OOMMF 1.2b0 [25]. При этом в расчётах использовались параметры материалов, соответствующие исследуемым структурам, а именно эффективная намагниченность – $4\pi M(YIG) = 1830$ Гс, $4\pi M(Pu) = 9200$ Гс, обменная жесткость – $A_{ex}(YIG) = 3.13 \cdot 10^{-7}$ эрг/см, $A_{ex}(Pu) = 11.5 \cdot 10^{-7}$ эрг/см.

Для оценки потерь, вносимых конечной проводимостью и намагниченностью металлических слоёв и выражаемых мнимой частью волнового числа $k = k' - ik''$, был проведён их расчёт вместе с дисперсионными характеристиками $k(f)$ из уравнений Ландау – Лифшица и Максвелла аналогично работам [16, 26, 27].

2. Полученные результаты

2.1. Дисперсии и потери ПМСВ в металлизированных структурах

Измерения прохождения ПМСВ в металлизированных плёнках ЖИГ показывают, что металлизация из хрома с $d(Cr) = 30$ нм не приводит к изменению дисперсионных кривых, но вносит существенные потери – уровень прохождения значительно снижается по сравнению со свободной плёнкой ЖИГ (рис. 2). Расчёт показывает сильный рост потерь с увеличением волнового числа. По этой причине наблюдаемая в эксперименте зона прохождения ПМСВ сужается по сравнению со случаем свободной плёнки. По мере роста приложенного поля затухание сигнала в металлизированном ЖИГ увеличивается, зона прохождения сужается к длинноволновой границе ПМСВ – $f_0 - \gamma \cdot (H \cdot (H + 4\pi M))^{1/2}$, где $\gamma = 2.8$ МГц/Э.

Увеличение толщины плёнки хрома до $d(Cr) = 1.5$ мкм приводит к переходу дисперсии ПМСВ на ветку, соответствующую идеальной металлизации. Вносимые проводимостью нагрузки потери оказываются одного

порядка с потерями в свободной плёнке ЖИГ. Изменение наклона дисперсии вызывает рост групповой скорости и соответствующее уменьшение потерь на распространение, в особенности в длинноволновой области, за счёт чего прохождение вблизи f_0 превышает величину прошедшего сигнала для свободной плёнки ЖИГ. С увеличением приложенного поля затухание сигнала становится меньше, зона прохождения ПМСВ становится шире. При $H = 120$ Э в большей части зоны прохождения, за исключением длинноволновой области, сигнал для $d(Cr) = 1.5$ мкм оказывался меньше образца с $d(Cr) = 30$ нм. При $H \approx 320$ Э уровень прохождения в центральной части зоны прохождения выравнивался для обоих случаев, но при этом ширина зоны прохождения для $d(Cr) = 1.5$ мкм превышала на 150 МГц ширину зоны для $d(Cr) = 30$ нм и выравнивалась с шириной зоны для свободной плёнки. При $H > 320$ Э уровень проходящего сигнала ПМСВ для $d(Cr) = 1.5$ мкм уже оказывался больше случая $d(Cr) = 30$ нм, а ширина зоны – больше случая свободной плёнки. Последний факт связан с тем, что коротковолновая граница ПМСВ в металлизированных плёнках $f_{sm} = \gamma(H + 4\pi M)$ оказывается больше случая свободной плёнки $f_s = \gamma(H + 4\pi M/2)$. Стоит отметить, что авторам неизвестно о каких-либо работах, где описывается экспериментальное наблюдение прохождения ПМСВ в интегральных тонкоплёночных структурах на основе ЖИГ на частотах выше f_s . Для исследуемых структур МА находятся на свободном участке плёнки ЖИГ, и наблюдение прохождения ПМСВ выше f_s , по видимому, связано с близостью МА к металлизированному участку – возбуждающее поле от МА «дотягивается» до металлизированного участка и эффективно возбуждает ПМСВ непосредственно под ним.

В случае металлизации плёнки ЖИГ пермаллоем с $d(Pu) = 30$ нм дисперсионные кривые отклонялись от случая свободной плёнки ЖИГ по мере перехода в коротковолновую область (см. рис. 2) с одновременным значительным увеличением потерь. Такое поведение дисперсии обусловлено магнитными свойствами Ру и аналогично поведению внутренней ПМСВ в случае двухслойных структур [21]. Коротковолновая граница f_{int} для внутренней ПМСВ оказывается меньше f_s . Таким образом, имеется некоторый частотный диапазон $[f_{int}, f_s]$, в котором ПМСВ не распространяется под металлом.

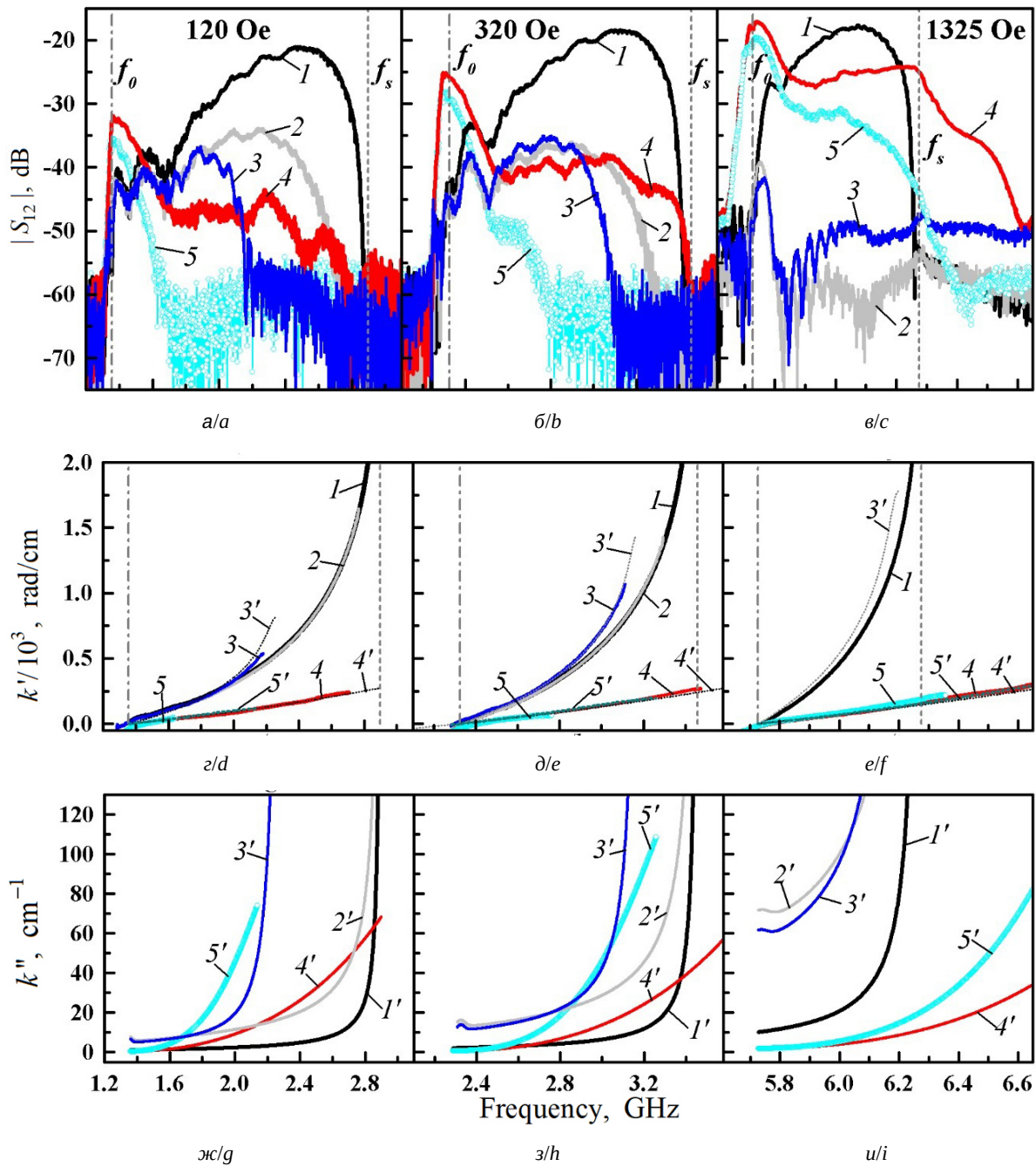


Рис. 2. АЧХ коэффициента передачи (а, б, в), дисперсионные кривые (г, д, е) и вносимые потери (ж, з, и) в свободной плёнке ЖИГ (кривые 1), плёнке ЖИГ, металлизированной хромом толщиной $d(\text{Cr})=30$ нм (кривые 2), $d(\text{Cr})=1.5$ мкм (кривые 4), либо пермаллоем толщиной $d(\text{Py})=30$ нм (кривые 3), $d(\text{Py})=1.5$ мкм (кривые 5) при приложенном поле: а, г, ж – 120 Э; б, д, з – 320 Э; в, е, и – 1325 Э. Кривые со штрихом соответствуют рассчитанным данным, без штриха – экспериментальным. Вертикальная штрихпунктирная линия показывает положение длинноволновой границы ПМСВ f_0 ; вертикальная пунктирная – положение коротковолновой границы ПМСВ для свободной пленки ЖИГ – f_s (цвет онлайн)

Fig. 2. Amplitude-frequency dependencies of the transmission coefficient (a, b, c), dispersion curves (d, e, f) and insertion losses (g, h, i) in the free YIG (curves 1), YIG film metallized by chromium with the thickness $d(\text{Cr})=30$ nm (curves 2), $d(\text{Cr})=1.5$ μm (curves 4), or by permalloy with the thickness $d(\text{Py})=30$ nm (curves 3), $d(\text{Py})=1.5$ μm (curves 5) at the applied field: a, d, g – 120 Oe; b, e, h – 320 Oe, c, f, i – 1325 Oe. The curves with the apostrophe correspond to the calculated data, ones without the apostrophe – to the experimental data. The vertical dash-dotted line shows the position of the MSSW long-wavelength boundary f_0 ; the vertical dotted line – the position of the MSSW short-wavelength boundary for the free YIG – f_s (color online)



Увеличение толщины металлизации пермаллоя до $d(\text{Py}) = 1.5 \text{ мкм}$ переводило дисперсионную кривую на «металлическую» ветку, как и для случая хрома. При этом прохождение возможно было наблюдать только в узкой полосе (около 300 МГц) вблизи границы f_0 . По мере увеличения приложенного поля АЧХ коэффициента прохождения становилась шире, как и для хрома, за счёт снижения потерь, однако ширина зоны прохождения оставалась меньше случая металлизации из хрома. При $H \approx 1325 \text{ Э}$ зона прохождения занимала область от f_0 до f_s .

2.2. АЧХ коэффициента передачи ПМСВ в каналах из декораций

Измеренные АЧХ коэффициента передачи ПМСВ в каналах из декораций показаны

на рис. 3, 4. Учитывая, что длина МА для каналов различной ширины была одинаковой ($l_{ma} = 250 \text{ мкм}$), волна, возбуждаемая входной антенной и поступающая на канал в декорациях, разделялась на три составляющие, одна из которых распространялась по каналу, а две другие – под слоем металла с обеих сторон от канала. С уменьшением ширины канала при постоянной длине антенн доля волны, распространяющейся под металлом, увеличивалась. Для случая хрома с $d(\text{Cr}) = 30 \text{ нм}$, который, как было показано выше, не изменяет дисперсию ПМСВ, влияние металла сводилось к подавлению ПМСВ под металлическими областями по обе стороны от канала. Поэтому кривые $|S_{12}(f)|$ с уменьшением ширины канала демонстрировали постепенное уменьшение прохождения (см. рис. 3, а),

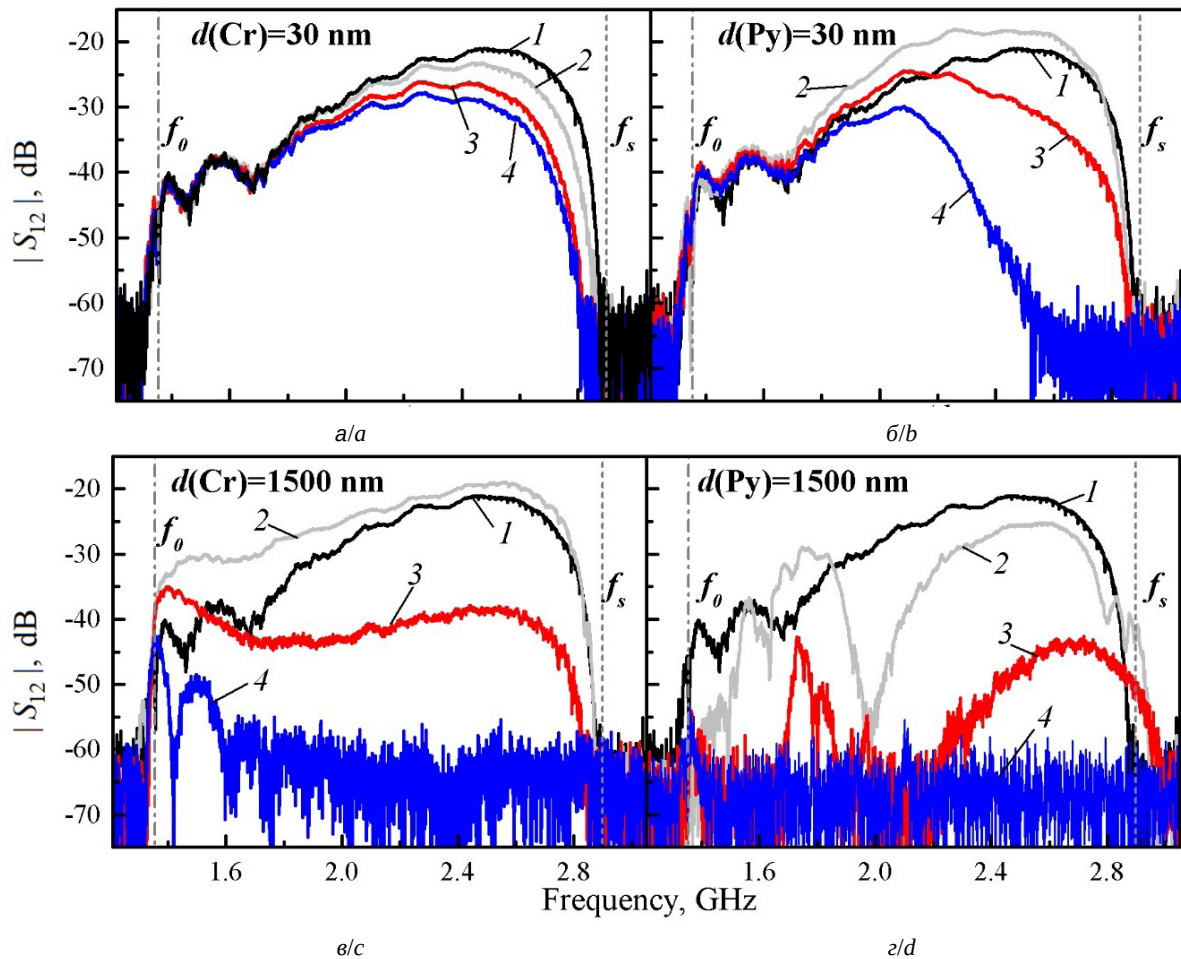


Рис. 3. АЧХ коэффициента передачи $|S_{12}(f)|$ ПМСВ в каналах из декораций: а, в – хрома, б, г – пермаллоя с толщинами: а, б – 30 нм, в, г – 1.5 мкм и шириной: кривая 2 – 200 мкм, кривая 3 – 100 мкм, кривая 4 – 50 мкм. Кривая 1 показывает АЧХ в свободной плёнке ЖИГ. Приложенное поле $H = 120 \text{ Э}$ (цвет онлайн)

Fig. 3. Amplitude-frequency dependencies of the transmission coefficient for MSSW in the decoration channels from: а, с – chromium, б, д – permalloy with the thickness: а, б – 30 nm, с, д – 1.5 μm and the width: curve 2 – 200 μm , curve 3 – 100 μm , curve 4 – 50 μm . Curve 1 shows $|S_{12}(f)|$ in the free YIG. Applied field $H = 120 \text{ Oe}$ (color online)

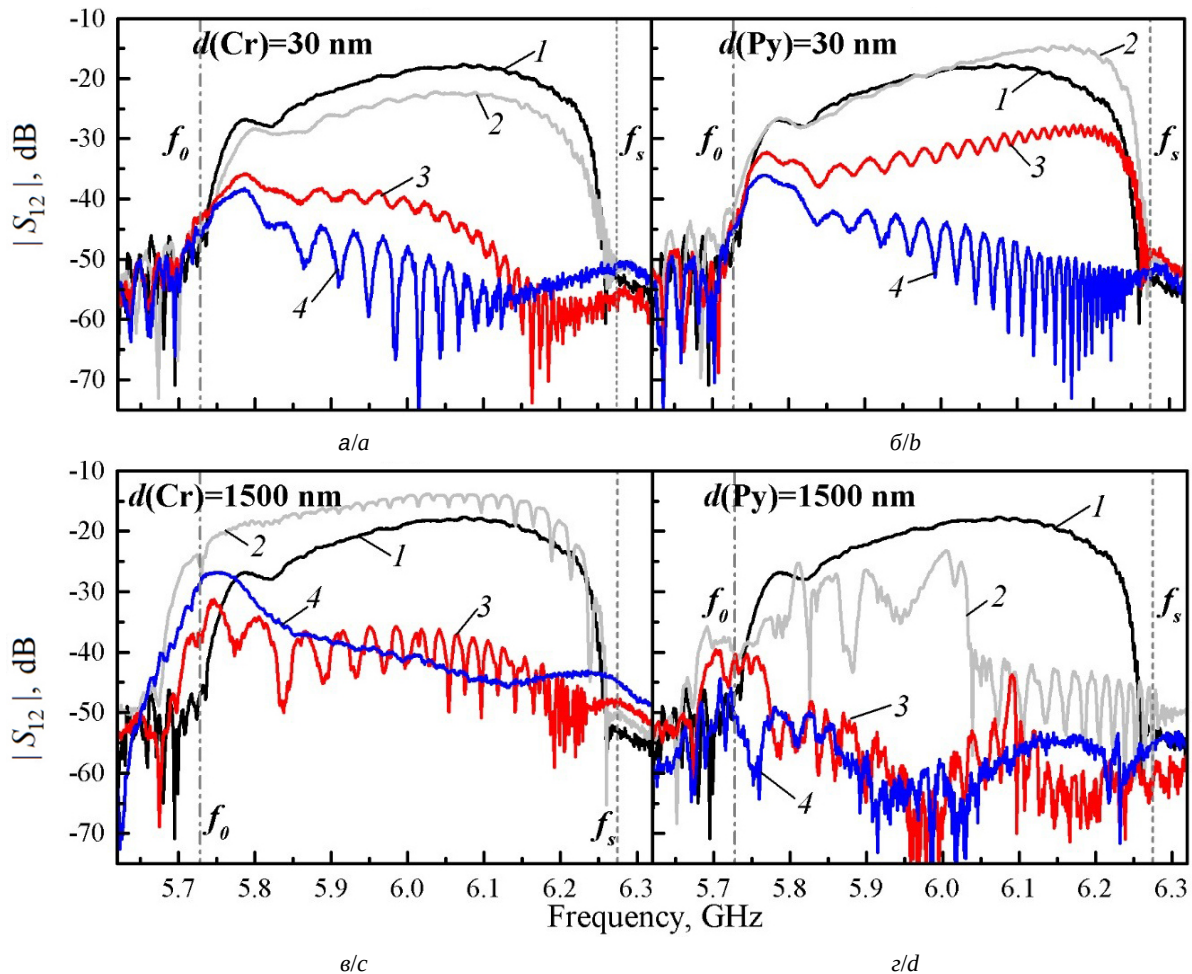


Рис. 4. АЧХ коэффициента передачи $|S_{12}(f)|$ ПМСВ в каналах из декораций: а, в – хрома, б, г – пермаллоя с толщинами: а, б – 30 нм, в, г – 1.5 мкм и шириной: кривая 2 – 200 мкм, кривая 3 – 100 мкм, кривая 4 – 50 мкм. Кривая 1 показывает АЧХ в свободной плёнке ЖИГ. Приложенное поле $H = 1325$ Э (цвет онлайн)

Fig. 4. Amplitude-frequency dependencies of the transmission coefficient for MSSW in the decoration channels from: а, с – chromium, б, д – permalloy with the thickness: а, б – 30 nm, с, д – 1.5 μm and the width: curve 2 – 200 μm , curve 3 – 100 μm , curve 4 – 50 μm . Curve 1 shows $|S_{12}(f)|$ in the free YIG. Applied field $H = 1325$ Oe (color online)

в особенности в коротковолновой области, для которой влияние вносимых потерь больше (см. рис. 2, ж). С ростом поля ухудшалось прохождение через структуры с каналами по сравнению со свободной плёнкой, а также увеличивалась разница в АЧХ для разных ширины канала (ср. рис. 3, а и рис. 4, а) – например, если для $H = 120$ Э различие в уровнях сигнала для $w = 200$ мкм и $w = 100$ мкм на максимумах прохождения составляло около 5 дБ, то при $H = 1325$ Э эта разница уже превышала 20 дБ. Это свойство следует отнести к росту потерь под металлом с ростом поля (см. кривую 2' на рис. 2, ж и рис. 2, и)

Уровень электромагнитной наводки увеличивался с ростом частоты, вследствие чего заметно сказывалась интерференция с ней прошедше-

го сигнала, приводящая к появлению осцилляций на АЧХ, измеренных при высоких полях (рис. 4).

Переход на «металлическую» ветку дисперсии ПМСВ для $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм приводил к эффективному отражению волны на границе каналов, препятствующему дифракционному расплыванию волнового пучка и способствующему, тем самым, его «канализованию» к выходной антенне. О проявлении канализования или пространственного ограничения ширины пучка ПМСВ в поперечном сечении указывает то, что для канала с шириной $w = 200$ мкм АЧХ прошедшего сигнала демонстрировала меньшее затухание по сравнению со случаем свободной плёнки ЖИГ (см. рис. 3, в) – эффект «просветления». Данный эффект сохранялся с ростом поля (см. рис. 4, в). Можно видеть также, что



увеличивалась интенсивность осцилляций, соответствующих дипольно-обменным резонансам, на АЧХ сигнала, прошедшего через канал $w = 200$ мкм по сравнению со свободной плёнкой (см. рис. 4, в). Это, скорее всего, обусловлено закреплением спинов на границе покрытых и непокрытых декорациями участков плёнки ЖИГ, аналогично тому, как это делает травление поверхности [28].

В низких полях уменьшение ширины канала из $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм гораздо сильнее уменьшало амплитуду прошедшего сигнала по сравнению с каналом из $d(\text{Cr}) = 30$ нм (ср. рис. 3, а и рис. 3, в), и при $w = 50$ мкм почти по всей ширине спектра ПМСВ сигнал оказывался подавленным до уровня наводки – прохождение наблюдалось лишь в узкой полосе (≈ 300 МГц) частот вблизи f_0 .

Из этого можно заключить, что при $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм существует оптимальная ширина канала по отношению к апертуре антенны, которая способствует канализованию сигнала, и с уменьшением ширины канала от этого значения происходит подавление проходящего сигнала.

Стоит отметить, что зона прохождения ПМСВ в структурах с каналами из $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм была ограничена частотами существования ПМСВ $[f_0, f_s]$ в свободной плёнке (узкая область прохождения на частотах $f < f_0$ на рис. 4, в относится к обратным объёмным магнитостатическим волнам, возбуждаемым контактными площадками), даже в случае высоких полей, при которых в полностью металлизированных образцах наблюдалось прохождение на частотах $f > f_s$ (см. рис. 2, в). Это показывает, что наличие каналов в декорациях приводит к невозможности возбуждения под декорированными областями ПМСВ с частотами $f > f_s$ с помощью антенны, расположенной на свободном ЖИГ в 10 мкм от декораций, в то время как при отсутствии каналов такое возбуждение оказывается возможным.

Декорации из пермаллоя с $d(\text{Py}) = 30$ нм помимо вносимых потерь приводят к неоднородности магнитного поля по границам каналов, что видно из равновесного распределения поля (рис. 5), изменяют дисперсию ПМСВ в коротковолновой области по сравнению с ПМСВ в свободном ЖИГ (см. рис. 2, г, д, е) так, что формируется диапазон частот $[f_{int}, f_s]$, в котором распространение под металлом оказывается невозможным. В результате этого образуются

условия, препятствующие дифракционному расплыванию волнового пучка и, таким образом, приводящие к возникновению эффекта канализования при прохождении через канал, аналогично случаю канала из хрома с $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм. За счёт этого в канале с $w = 200$ мкм и $d(\text{Py}) = 30$ нм амплитуда прошедшего сигнала превышала уровень сигнала в свободной плёнке ЖИГ (см. рис. 3, б и рис. 4, б). Невозможность распространения ПМСВ под декорациями из пермаллоя в диапазоне частот $[f_{int}, f_s]$ и рост вносимых металлизацией потерь в длинноволновой области АЧХ с увеличением поля приводит к ещё одному проявлению эффекта канализования – формированию максимума прохождения в коротковолновой области АЧХ в высоких полях (кривые 2 и 3 на рис. 4, б). Проявление данного эффекта особенно заметно из сравнения кривых прохождения для каналов с $w = 100$ мкм из хрома и пермаллоя (кривые 3 на рис. 4, а и рис. 4, б) – на частоте максимума прохождения в структуре из Py ($f \approx 6.2$ ГГц) для структуры из Cr сигнал падает до уровня наводки (на ≈ 30 дБ). Увеличение неоднородности поля в канале из Py с уменьшением его ширины приводило к тому, что при $w = 50$ мкм данный эффект уже не проявлялся (кривая 4 на рис. 4, б).

Увеличение толщины декораций из пермаллоя до $d(\text{Py}) = 1.5$ мкм кардинально меняет вид АЧХ прошедшего через каналы сигнала по сравнению с $d(\text{Py}) = 30$ нм (см. рис. 3, г и рис. 4, г). В низких полях для $w = 100$ и 200 мкм в центре зоны прохождения и на частотах вблизи f_0 образуются широкие провалы (см. рис. 3, г), разделяя зону прохождения на две части. Амплитуда прошедшего сигнала с уменьшением ширины канала ослабевает в обеих этих частях зоны прохождения. Это указывает на то, что две части АЧХ обусловлены прохождением ПМСВ по области канала, поскольку потери под металлом настолько велики, что отклик от ПМСВ под $d(\text{Py}) = 1.5$ мкм должен наблюдаться в узкой полосе вблизи f_0 (см. рис. 2, а).

При ширине канала $w = 50$ мкм для $d(\text{Py}) = 1.5$ мкм при низких полях прохождение по всей зоне прохождения падало до уровня наводки, за исключением узкой длинноволновой области (см. рис. 3, г), что отражает высокие потери под металлом (см. рис. 2, ж).

Микромагнитное моделирование (см. рис. 5) показывает, что статическое внутреннее поле под декорациями как с $d(\text{Py}) = 30$ нм, так и $d(\text{Py}) = 1500$ нм понижается относительно приложен-

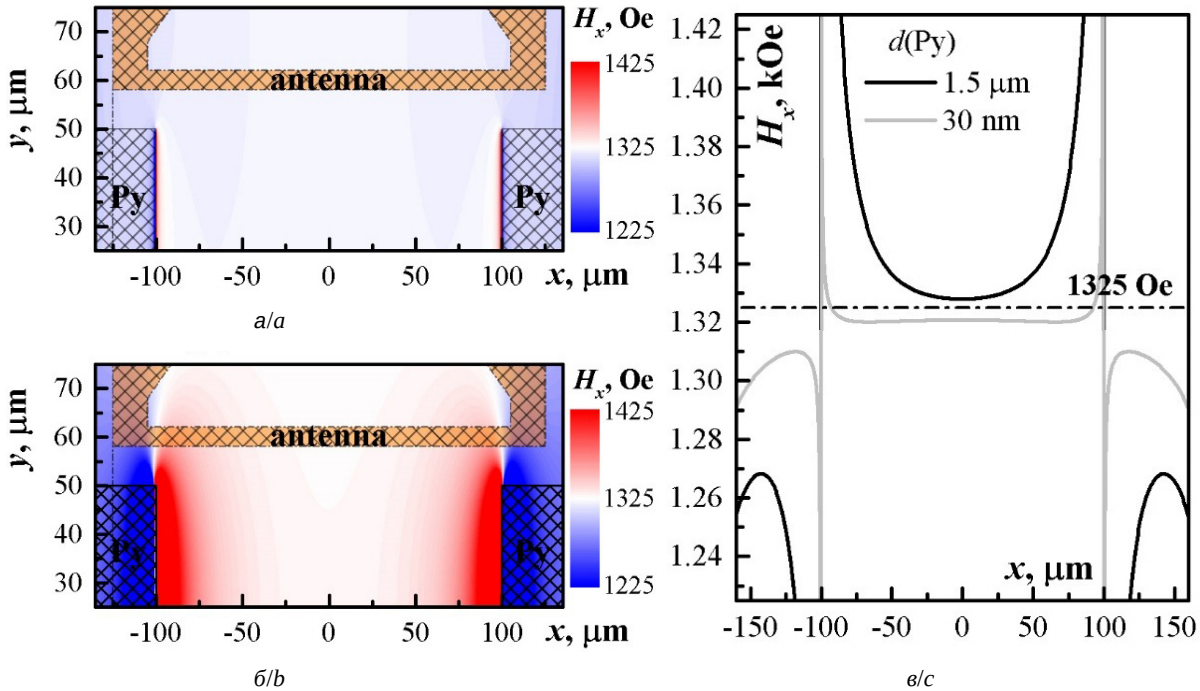


Рис. 5. Распределение внутреннего поля в приповерхностном слое ЖИГ, на котором расположен канал из пермаллоя толщиной: а – 30 нм; б – 1.5 мкм; в – сечение распределений при фиксированном $y = 25 \mu\text{м}$ и $z = 6.5 \mu\text{м}$. Штриховкой показаны области, на которых располагаются участки пермаллоя и антенна. Внешнее поле, приложенное вдоль оси x , составляет 1325 Э (цвет онлайн)

Fig. 5. Distribution of the internal field in the surface layer of YIG covered with the channel from permalloy with the thickness: $a - 30 \text{ nm}$; $b - 1.5 \mu\text{m}$; $c -$ cross-section of the distributions at the fixed $y = 25 \mu\text{m}$ and $z = 6.5 \mu\text{m}$. Hatching shows regions where areas from permalloy and antenna are located. The external field applied along axis x is 1325 Oe (color online)

ного поля, и вблизи перехода между покрытым и непокрытым пермаллоем участками ЖИГ формируется область неоднородности поля. Если для $d(\text{Py}) = 30 \text{ нм}$ область неоднородности простирается на толщину до $d(\text{YIG}) = 4 \text{ мкм}$, а по координате x – на расстояние около 5 мкм, то для случая $d(\text{Py}) = 1500 \text{ нм}$ область резко неоднородного поля простирается на всю толщину плёнки ЖИГ, а по координате x – на расстояния около 25–30 мкм. Кроме того, область неоднородного поля от декораций из пермаллоя с $d(\text{Py}) = 1500 \text{ нм}$ простирается до расположения антенн. Следовательно, возбуждение сигнала может происходить по данным неоднородным областям с повышенным полем в канале и пониженным полем под декорациями. На повышенные значения поля в области канала относительно приложенного поля указывает то, что коротковолновая часть зоны прохождения простирается на частоты $f > f_s$ (см. рис. 3, з).

С ростом поля прохождения ПМСВ в каналах из $d(\text{Py}) = 1.5 \text{ мкм}$ значительно отличалось от наводки лишь для канала $w = 200 \text{ мкм}$ (см. рис. 4, з). При этом АЧХ становилась сильно изрезанной за счёт интерференции с наводкой,

прохождение в коротковолновой части сильно ухудшалось.

Заключение

Таким образом, в работе было исследовано прохождение ПМСВ, дисперсионные характеристики и вносимые потери в плёнках ЖИГ, покрытых магнитными и немагнитными металлами, экспериментально изучено прохождение ПМСВ в плёнке ЖИГ с каналами из нанесённых на её поверхность металлизированных областей. Проведено сравнение случаев «тонкой» и «толстой» металлизации, когда толщина металла, соответственно, много меньше и сравнима с глубиной скин-слоя. Показано наличие оптимальной ширины канала в $w = 200 \text{ мкм}$ по отношению к апертуре антенн, которая способствует каналированию сигнала с возможностью проявления эффекта «просветления» в АЧХ прошедшего сигнала. Для этого в случае немагнитных декораций необходимо использовать толщину плёнок металлов, при которой происходит переход на «металлическую» ветку дисперсии ПМСВ (для исследуемых структур – $d(\text{Cr}) = 1.5 \text{ мкм}$), в то время как для декораций из ферромагнитных



металлов оказывается достаточным толщины декораций в $d(\text{Py}) = 30$ нм. Полученные результаты показывают возможность использования каналов из металлических декораций для формирования направленных пучков спиновых волн.

Список литературы

- Хитун А. Г., Кожанов А. Е. Приборы магнотонной логики // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2017. Т. 17, вып. 4. С. 216–241. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241>
- 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>
- 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>
- Barman A., Gubbiotti G., Ladak S., Adeyeye A. O., Krawczyk M., Gräfe J., Adelman C., Cotozana 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., 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>
- Gertz F., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A. Magnonic holographic memory // IEEE Trans. Magn. 2015. Vol. 51, iss. 4. Article number 4002905. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2362723>
- Khivintsev Y. V., Sakharov V. K., Kozhevnikov A. V., Dudko G. M., Filimonov Y. A., Khitun A. Spin waves in YIG based magnonic networks: Design and technological aspects // J. Magn. Magn. Mater. 2022. Vol. 545. Article number 168754. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168754>
- Davies C. S., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Sharaevsky Y. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V. Field-Controlled Phase-Rectified Magnonic Multiplexer // IEEE Trans. Magn. IEEE. 2015. Vol. 51, iss. 11. Article number 3401904. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2447010>
- Papp B., Porod W., Csurgay B. I., Csaba G. Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. Article number 9245. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09485-7>
- Gieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M., Guzowska U., Stognij A., Maziewski A. The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. Article number 8771. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06531-2>
- Дудко Г. М., Кожневников А. В., Сахаров В. К., Стальмахов А. В., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В. Расчет фокусирующих преобразователей спиновых волн методом микромагнитного моделирования // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 92–102. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102>
- Beginin E. N., Sadovnikov A. V., Sharaevskaya A. Y., Stognij A. I., Nikitov S. A. Spin wave steering in three-dimensional magnonic networks // Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 112, iss. 12. Article number 122404. <https://doi.org/10.1063/1.5023138>
- Sakharov V. K., Beginin E. N., Khivintsev Y. V., Sadovnikov A. V., Stognij A. I., Filimonov Y. A., Nikitov S. A. Spin waves in meander shaped YIG film: Toward 3D magnonics // Appl. Phys. Lett. 2020. Vol. 117, iss. 2. Article number 022403. <https://doi.org/10.1063/5.0013150>
- Stancil D. D., Morgenthaler F. R. Guiding magnetostatic surface waves with nonuniform in-plane fields // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54, iss. 3. P. 1613–1618. <https://doi.org/10.1063/1.332146>
- Анненков А. Ю., Герус С. В., Ковалев С. И. Объемные и поверхностно-объемные магнитостатические волны в волноводах, создаваемых ступенчатым полем подмагничивания // ЖТФ. 2004. Т. 49, вып. 2. С. 98–104.
- 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, № 11. P. 1309–1319. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/11/004>
- Хивинцев Ю. В., Дудко Г. М., Сахаров В. К., Никулин Ю. В., Филимонов Ю. А. Распространение спиновых волн в микроструктурах на основе пленок железоиттриевого граната, декорированных ферромагнитным металлом // ФТТ. 2019. Т. 61, вып. 9. С. 1664–1671. <https://doi.org/10.21883/FIT.2019.09.48108.15N>
- Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Джумалиев А. С., Никулин Ю. В., Селезнев М. Е., Филимонов Ю. А. Распространение спиновых волн в каналах, полученных декорированием поверхности пленок железо-иттриевого граната тонкими металлическими областями // ФТТ. 2023. Т. 65, вып. 7. С. 1186–1193. <https://doi.org/10.21883/FIT.2023.07.55843.20H>
- 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. Article number 17E510. <https://doi.org/10.1063/1.4916815>
- Seshadri S. R. Surface Magnetostatic Modes of a Ferrite Slab // Proc. IEEE. 1970. Vol. 58, iss. 3. P. 506–507. <https://doi.org/10.1109/PROC.1970.7680>
- Camley R. E., Maradudin A. A. Magnetostatic interface waves in ferromagnets // Solid State Commun. 1982. Vol. 41, iss. 8. P. 585–588. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(82\)90946-2](https://doi.org/10.1016/0038-1098(82)90946-2)



21. Зубков В. И., Епанечников В. А., Щеглов В. И. Дисперсионные характеристики поверхностных магнитостатических волн в двуслойной ферромагнитной пленке // РЭ. 2007. Т. 52, № 2. С. 192–201.
22. Зубков В. И., Локк Э. Г., Нам Б. П., Хе А. С., Щеглов В. И. Дисперсия поверхностных магнитостатических волн в двуслойных ферритовых пленках // ЖТФ. 1989. Т. 59, вып. 12. С. 115–117.
23. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // J. Phys. Chem. Solids. 1961. Vol. 19, iss. 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)
24. Khivintsev Y. V., Filimonov Y. A., Nikitov S. A. Spin wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. Article number 052407. <https://doi.org/10.1063/1.4907626>
25. Donahue M. J., Porter D. G. OOMMF user's guide, version 1.0. Gaithersburg, MD : NIST, 1999. 83 p. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6376>
26. Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В. Взаимодействие поверхностной магнитостатической и объемных упругих волн в металлизированной структуре ферромагнетик-диэлектрик // РЭ. 2002. Т. 47, № 8. С. 1002–1007.
27. Mruczkiewicz M., Krawczyk M. Nonreciprocal dispersion of spin waves in ferromagnetic thin films covered with a finite-conductivity metal // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115. Article number 113909. <https://doi.org/10.1063/1.4868905>
28. Kolodin P. A., Gromova Y. V., Kostylev M. P. Effect of Surface Spin Pinning on the Spin-Wave Propagation in Yttrium Iron Garnet Films // IEEE Trans. Magn. 1997. Vol. 33, iss. 6. P. 4465–4468. <https://doi.org/10.1109/20.649883>
- 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. Gertz F., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A. Magnonic holographic memory. *IEEE Trans. Magn.*, 2015, vol. 51, iss. 4, article no. 4002905. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2362723>
6. Khivintsev Y. V., Sakharov V. K., Kozhevnikov A. V., Dudko G. M., Filimonov Y. A., Khitun A. Spin waves in YIG based magnonic networks: Design and technological aspects. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2022, vol. 545, article no. 168754. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168754>
7. Davies C. S., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Sharaevsky Y. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V. Field-Controlled Phase-Rectified Magnonic Multiplexer. *IEEE Trans. Magn.*, 2015, vol. 51, iss. 11, article no. 3401904. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2447010>
8. Papp B., Porod W., Csurgay B. I., Csaba G. Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, article no. 9245. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09485-7>
9. Gieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M., Guzowska U., Stognij A., Maziewski A. The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, article no. 8771. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06531-2>
10. Dudko G. M., Kozhevnikov A. V., Saharov V. K., Stalmahov A. V., Filimonov Y. A., Khivintsev Y. V. Calculation of Focusing Spin Wave Transducers Using the Method of Micromagnetic Simulation. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 92–102 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102>
11. Beginin E. N., Sadovnikov A. V., Sharaevskaya A. Y., Stognij A. I., Nikitov S. A. Spin wave steering in three-dimensional magnonic networks. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 112, iss. 12, article no. 122404. <https://doi.org/10.1063/1.5023138>
12. Sakharov V. K., Beginin E. N., Khivintsev Y. V., Sadovnikov A. V., Stognij A. I., Filimonov Y. A., Nikitov S. A. Spin waves in meander shaped YIG film: Toward 3D magnonics. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, vol. 117, iss. 2, article no. 022403. <https://doi.org/10.1063/5.0013150>
13. Stancil D. D., Morgenthaler F. R. Guiding magnetostatic surface waves with nonuniform in-plane fields. *J. Appl. Phys.*, 1983, vol. 54, iss. 3, pp. 1613–1618. <https://doi.org/10.1063/1.332146>
14. Annenkov A. Y., Gerus S. V., Kovalev S. I. Bulk and Surface-Bulk Magnetostatic Waves in Waveguides Produced by a Step Bias Field. *Tech. Phys.*, 2004, vol. 49, iss. 2, pp. 239–244. <https://doi.org/10.1134/1.1648962>
15. 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.*

References

1. Khitun A. G., Kozhanov A. E. Magnonic Logic Devices. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2017, vol. 17, iss. 4, pp. 216–241 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241>
2. 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>
3. 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>
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., 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.,



- Phys.*, 1998, vol. 31, no. 11, pp. 1309–1319. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/11/004>
16. 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. *Phys. Solid State*, 2019, vol. 61, iss. 9, pp. 1614–1621. <https://doi.org/10.1134/S1063783419090129>
 17. Sakharov V. K., Khivintsev Y. V., Dzhumaliev A. S., Nikulin Y. V., Seleznev M. E., Filimonov Y. A. Propagation of spin waves in channels formed by decoration of the surfaces of yttrium-iron garnet films by thin metal areas. *Phys. Solid State*, 2023, vol. 65, iss. 7, pp. 1134–1140. <https://doi.org/10.21883/PSS.2023.07.56404.20H>
 18. 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, article no. 17E510. <https://doi.org/10.1063/1.4916815>
 19. Seshadri S. R. Surface Magnetostatic Modes of a Ferrite Slab. *Proc. IEEE*, 1970, vol. 58, iss. 3, pp. 506–507. <https://doi.org/10.1109/PROC.1970.7680>
 20. Camley R. E., Maradudin A. A. Magnetostatic interface waves in ferromagnets. *Solid State Commun.*, 1982, vol. 41, iss. 8, pp. 585–588. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(82\)90946-2](https://doi.org/10.1016/0038-1098(82)90946-2)
 21. Zubkov V. I., Epanchnikov V. A., Shcheglov V. I. Dispersion Characteristics of Magnetostatic Surface Waves in a Two-Layer Ferromagnetic Film. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2007, vol. 52, no. 2, pp. 179–188. <https://doi.org/10.1134/S1064226907020076>
 22. Zubkov V. I., Lokk E. G., Nam B. P., Khe A. S., Scheglov V. I. Dispersion of magnetostatic surface waves in two-layer ferrite films. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiz.*, 1989, vol. 59, iss. 12, pp. 115–117 (in Russian).
 23. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids*, 1961, vol. 19, iss. 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)
 24. Khivintsev Y. V., Filimonov Y. A., Nikitov S. A. Spin wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, article no. 052407. <https://doi.org/10.1063/1.4907626>
 25. Donahue M. J., Porter D. G. *OOMMF user's guide, version 1.0*. Gaithersburg, MD, NIST. 1999. 83 p. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6376>
 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. Mruczkiewicz M., Krawczyk M. Nonreciprocal dispersion of spin waves in ferromagnetic thin films covered with a finite-conductivity metal. *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 115, article no. 113909. <https://doi.org/10.1063/1.4868905>
 28. Kolodin P. A., Gromova Y. V., Kostylev M. P. Effect of Surface Spin Pinning on the Spin-Wave Propagation in Yttrium Iron Garnet Films. *IEEE Trans. Magn.*, 1997, vol. 33, iss. 6, pp. 4465–4468. <https://doi.org/10.1109/20.649883>

Поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 09.12.2023; принята к публикации 20.12.2023
 The article was submitted 01.11.2023; approved after reviewing 09.12.2023; accepted for publication 20.12.2023