

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2024. Т. 32, № 3
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2024;32(3)

Научная статья
УДК 537.86

DOI: 10.18500/0869-6632-003104
EDN: MYWMNM

Детектирование сфокусированных пучков поверхностных магнитостатических волн в структурах YIG/Pt

М. Е. Селезнев^{1,2}✉, Г. М. Дудко¹, Ю. В. Никулин^{1,2}, Ю. В. Хивинцев^{1,2}, В. К. Сахаров^{1,2},
А. В. Кожевников¹, С. Л. Высоцкий^{1,2}, Ю. А. Филимонов^{1,2}

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия

E-mail: ✉mixanich94@mail.ru, dugal_2010@hotmail.com, yvnikulin@gmail.com, khivintsev@gmail.com,
valentin@sakharov.info, kzhavl@gmail.com, vysotsl@gmail.com, yuri.a.filimonov@gmail.com

Поступила в редакцию 13.12.2023, принята к публикации 2.02.2024,
опубликована онлайн 10.04.2024

Аннотация. Цель работы — с помощью обратного спинового эффекта Холла экспериментально исследовать детектирование сфокусированных пучков поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в интегральных тонкопленочных микроструктурах YIG(3.9 мкм)/Pt(4 нм), где фокусировка обеспечивалась за счет криволинейной формы возбуждающей антенны. Провести сравнение со случаем детектирования ПМСВ, возбуждаемых прямолинейной антенной. **Методы.** Эксперименты выполнялись с макетом типа линии задержки на основе структуры YIG/Pt. Исследовались амплитудно-частотные характеристики макета YIG/Pt и частотная зависимость ЭДС ($V(f)$), наводимая в платине. **Результаты.** Показано, что на частотах f вблизи длинноволновой границы спектра ПМСВ, величина ЭДС $V(f)$, генерируемой сфокусированной ПМСВ, может в разы превышать значения $V(f)$ в случае возбуждения ПМСВ обычной (прямой) антенной. При этом в коротковолновой части спектра, наоборот, величина ЭДС, генерируемая сфокусированным пучком ПМСВ, оказывается заметно меньше. Такое поведение связано с хроматической абберацией фокусирующих антенн ПМСВ, проявляющейся в частотной зависимости фокусного расстояния антенны, что подтверждается результатами проведенного микромагнитного моделирования. Показано, что падение сигнала ЭДС, генерируемого сфокусированным пучком ПМСВ, в коротковолновой части спектра связано с выходом фокуса на участок структуры, не покрытой пленкой Pt. При этом рост $V(f)$ в длинноволновой области спектра ПМСВ объясняется увеличением погонной плотности мощности ПМСВ и формированием каустик под пленкой Pt. **Заключение.** Полученные результаты могут быть применимы для разработки высокочувствительных детекторов спиновых волн и создания устройств спиновой логики.

Ключевые слова: структуры YIG/Pt, фокусирующие антенны, поверхностные магнитостатические волны, обратный спиновый эффект Холла, микромагнитное моделирование.

Благодарности. Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00500.

Для цитирования: Селезнев М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А. Детектирование сфокусированных пучков поверхностных магнитостатических волн в структурах YIG/Pt // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 3. С. xxx–xxx. DOI: 10.18500/0869-6632-003104. EDN: MYWMNM

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Detection of focused beams of surface magnetostatic waves in YIG / Pt structures

M. E. Seleznev^{1,2}, G. M. Dudko¹, Y. V. Nikulin^{1,2}, Y. V. Khivintsev^{1,2}, V. K. Sakharov^{1,2},
A. V. Kozhevnikov¹, S. L. Vysotskii^{1,2}, Y. A. Filimonov^{1,2}

¹Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS, Russia

²Saratov State University, Russia

E-mail: ✉mixanich94@mail.ru, dugal_2010@hotmail.com, yvnikulin@gmail.com, khivintsev@gmail.com,
valentin@sakharov.info, kzhavl@gmail.com, vysotsl@gmail.com, yuri.a.filimonov@gmail.com

Received 13.12.2023, accepted 2.02.2024, available online 10.04.2024

Abstract. The purpose of this work is to experimentally study, using the inverse spin Hall effect (ISHE), the detection of focused beams of magnetostatic surface waves (MSSW) in integrated YIG (3.9 μm)/Pt (4 nm) thin-film microstructures, where the focusing effect was ensured by the curvilinear shape of the exciting antenna. Make a comparison with the case of detecting MSSWs excited by a rectilinear antenna. **Methods.** Experiments were carried out using the delay line structures based on the YIG/Pt. The amplitude-frequency characteristics of the YIG/Pt structure and the frequency dependence of the EMF ($V(f)$) induced in platinum were studied. **Results.** It was shown that at frequencies f near the long-wavelength limit of the MSSW spectrum, the magnitude of the EMF $V(f)$ generated by a focused MSSW can be several times higher than the values of $V(f)$ in the case of MSSW excitation by a common (straight) antenna. In this case, in the short-wavelength part of the spectrum, on the contrary, the magnitude of the EMF generated by the focused MSSW beam turns out to be noticeably smaller. This behavior is associated with chromatic aberration of the focusing antenna for the MSSW, which manifests itself in the frequency dependence of the focal length of the antenna, which is confirmed by the results of micromagnetic modeling. It is shown that the drop in the EMF signal generated by a focused MSSW beam in the short-wavelength part of the spectrum is associated with the focus reaching the area of the YIG not covered with the Pt film. In this case, the increase in $V(f)$ in the long-wavelength region of the MSSW spectrum is explained by an increase in the linear power density of the MSSW and the formation of caustics under the Pt film. **Conclusion.** Obtained results can be used for the development of highly sensitive spin wave detectors and the creation of spin logic devices.

Keywords: YIG / Pt structures, focusing antennas, magnetostatic surface waves, inverse spin Hall effect, micromagnetic modeling.

Acknowledgements. The work was supported by RSF grant No. 22-19-00500.

For citation: Seleznev ME, Dudko GM, Nikulin YV, Khivintsev YV, Sakharov VK, Kozhevnikov AV, Vysotskii SL, Filimonov YA. Detection of focused beams of surface magnetostatic waves in YIG / Pt structures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2024;32(3):xxx–xxx. DOI: 10.18500/0869-6632-003104

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

Введение

Задачи генерации, переноса и детектирования спиновых токов (токов углового момента электрона) являются ключевыми для спинтроники [1–7]. При этом особый интерес, с точки зрения разработки энергоэффективной элементной базы, представляют структуры на основе пленок железиттриевого граната (YIG) и платины (Pt), где перенос спинового тока может осуществляться спиновыми волнами (СВ), без участия движения зарядов. Эффекты распространения и интерференции СВ в магнитных микроструктурах могут быть использованы для построения энергоэффективных логических устройств [8, 9], а также для специальной обработки данных, такой как распознавание образов [10, 11], простой факторизации [12], визуализация магнитных частиц [13], спектрального анализа [14]. Разрабатываются также вычислительные алгоритмы, которые используют формирование интерференционной картины между когерентными волновыми

Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К.,
Кожевников А. В., Высоккий С. Л., Филимонов Ю. А.

фронтами для реализации небулевых вычислений [10, 11, 15–18] и методы обработки магнитных изображений на принципах спин-волновой Фурье-оптики [19].

Реализация таких функциональных спин-волновых устройств обработки информации может быть основана на принципах спин-волновой оптики, что предполагает интеграцию элементов спин-волновой оптики (призм, линз, зеркал, сплиттеров) с магнитными пленками [17–22]. При этом становится актуальной задача интеграции с магнитными пленками излучателей и приемников СВ, способных эффективно генерировать и детектировать направленные пучки СВ, сформированные без геометрических ограничений на волноведущую среду. Для этой цели могут быть использованы как точечные источники СВ [17, 23–28], так и специально сконструированные фокусирующие антенны СВ [21, 29–32].

В структурах спинтроники, типа YIG/Pt, для возбуждения и детектирования СВ могут применяться методы, основанные на генерации и детектировании спинового тока [3–7]. В таких структурах может осуществляться взаимное преобразование спинового и электрического токов за счет эффектов электрон-магнонного рассеяния на границе YIG/Pt [33]. При этом постоянный электрический ток в пленке платины за счет спинового эффекта Холла может приводить к генерации СВ [33, 34], а за счет обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ) можно осуществлять обратное преобразование спинового тока в электрический [33, 35]. До сих пор детектирование СВ с помощью ОСЭХ исследовалось при возбуждении СВ прямолинейными микрополосковыми антеннами, когда эффекты фокусировки СВ отсутствовали [36–43]. Целью данной работы является исследование детектирования сфокусированных пучков поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в структурах YIG/Pt.

Отметим, что конструкция фокусирующих антенн СВ зависит от характера дисперсии СВ. Фокусирующие элементы для СВ с изотропной дисперсией, такие как прямые объемные СВ в нормально намагниченной пленке феррита, имеют вогнутую форму относительно фокуса [21] по аналогии с традиционной оптикой. Напротив, для волн с анизотропной дисперсией, таких как ПМСВ или обратные объемные магнитостатические волны (ООМСВ) в касательно намагниченных пленках, форма фокусирующих элементов выпуклая [21, 32]. В данной работе будет исследовано детектирование в структуре YIG/Pt пучков ПМСВ, сфокусированных с помощью криволинейной микрополосковой антенны. Кроме того, мы сопоставим эффективность детектирования ПМСВ при возбуждении криволинейной и прямолинейной антеннами.

1. Исследуемая структура и методика эксперимента

Эксперименты выполнялись со структурами YIG/Pt типа линии задержки ПМСВ, микрофотография которых приведена на рис. 1, а. Структуры формировались на поверхности пленки YIG толщиной $d_{YIG} \approx 3.9$ мкм, намагниченностью насыщения $4\pi M_0 \approx 1750$ Гс, эпитаксиально выращенной на подложке гадолиний-галлиевого граната с кристаллографической ориентацией (111). На поверхности пленки YIG методами магнетронного распыления, фотолитографии и ионного травления формировались пары антенн (1 и 2) с контактными площадками для подключения СВЧ микрозондов, между которыми находилась область, покрытая пленкой Pt. Одна из антенн имела форму прямой микрополоски длиной $a = 300$ мкм, апертурой $b = 250$ мкм и шириной $c = 4$ мкм (рис. 1, б). Другая антенна была фокусирующей и имела выпуклую в сторону пленки Pt криволинейную форму с радиусом закругления $R = 300$ мкм, апертурой $b = 250$ мкм и шириной $c = 4$ мкм (рис. 1, в). Форма фокусирующей антенны рассчитывалась методом, указанным в работе [44]. Пленка платины имела длину $L = 620$ мкм, ширину $w = 200$ мкм и толщину $d_{Pt} = 4$ нм. К пленке платины изготавливались медные контакты (3 и 4) для измерения электродвижущей силы (ЭДС) V , генерируемой в платине за счет ОСЭХ. Макет помещался в зазор электромагнита так,

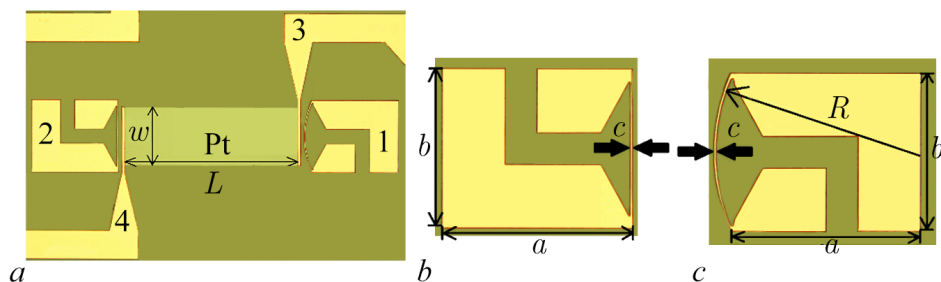


Рис. 1. *a* – Линия задержки ПМСВ на основе структуры YIG/Pt, где 1 и 2 – пара антенн для возбуждения и приема ПМСВ, 3 и 4 – контакты для измерения ЭДС в Pt пленке длиной $L = 620$ мкм и шириной $w = 200$ мкм; *b* – форма прямолинейной антенны апертурой $b = 250$ мкм и шириной $c = 4$ мкм, длина контактной площадки $a = 300$ мкм; *c* – форма криволинейной антенны апертурой $b = 250$ мкм, шириной $c = 4$ мкм и радиусом кривизны $R = 300$ мкм, длина контактной площадки $a = 300$ мкм

Fig. 1. *a* – The delay line structure for MSSW on the base of YIG/Pt sample where 1 and 2 – a pair of antennas for MSSW excitation and reception, 3 and 4 – contacts for EMF measurement in Pt film with the length $L = 620$ μm and width $w = 200$ μm ; *b* – the form of straight-line antenna with the aperture $b = 250$ μm and width $c = 4$ μm , the length of the contact pad $a = 300$ μm ; *c* – the form of curvilinear antenna with the aperture $b = 250$ μm , width $c = 4$ μm and radius of curvature $R = 300$ μm , the length of the contact pad $a = 300$ μm

что магнитное поле \vec{H} было направлено касательно к пленке YIG и параллельно прямолинейной микрополоске, что отвечало геометрии возбуждения ПМСВ [45].

Измерения проводились по методике, изложенной в работах [40–43]. Проводилось сравнение частотных зависимостей ЭДС $V(f)$, полученных при возбуждении ПМСВ фокусирующим (см. рис. 1, *c*) и прямолинейным (см. рис. 1, *b*) преобразователями. При этом учитывалось, что из-за невзаимности распространения ПМСВ было необходимо вместе со сменой входной антенны изменить направление магнитного поля \vec{H} на противоположное, чтобы в обоих случаях ПМСВ распространялась вдоль границы YIG/Pt.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2, *a* представлены частотные зависимости коэффициента передачи S_{12} , измеренные при $P_{\text{in}} = -20$ дБм и $H = 939$ Э в структурах YIG/Pt, где одна из антенн имеет криволинейную форму и фокусирует ПМСВ (кривая 1) и где обе антенны прямолинейные (кривая 2). Из рисунка можно видеть, что амплитуда сигнала ПМСВ, прошедшего через макет, на частотах $f < f^* \approx 4.9$ ГГц в случае возбуждения фокусирующей антенной оказывается выше на величину ≈ 8 дБ, чем в макете с прямолинейными антеннами. Это связано с тем, что фокусирующие антенны ПМСВ характеризуются хроматической абберацией, проявляющейся в зависимости фокусного расстояния антенны от частоты [21]. В диапазоне частот $f < f^* \approx 4.9$ ГГц фокусировка препятствует расплыванию пучка ПМСВ и большая часть ее мощности достигает выходной антенны. На частотах $f > f^*$ происходит обратная ситуация – наблюдается лучшее прохождение ПМСВ для случая прямолинейной антенны. Это связано с тем, что по мере роста частоты f положение фокуса смещается к возбуждающей антенне и каустики, которые за точкой фокуса переносят значительную часть мощности ПМСВ, огибают выходную антенну (см. также рис. 3).

На рис. 2, *b* приведены частотные зависимости ЭДС V , измеренные при $P_{\text{in}} = -10$ дБм в структуре YIG/Pt, где возбуждение ПМСВ осуществлялось фокусирующей (кривая 1) или прямолинейной (кривая 2) антеннами. Отметим осциллирующий характер кривых 1 и 2, что связано с сингулярностями ван Хофа в плотности состояний $\eta(f)$ в спектре ПМСВ на частотах

Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К.,
Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А.

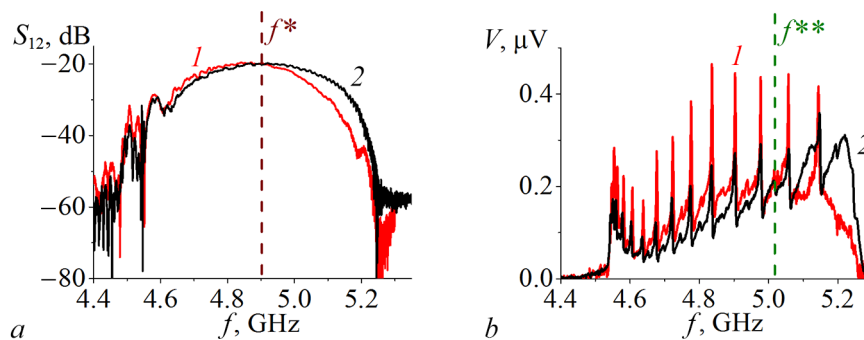


Рис. 2. Результаты измерений частотных зависимостей коэффициента передачи S_{12} (a) и ЭДС V (b) при $P_{\text{in}} = -20$ и -10 дБм соответственно, где кривые 1 и 2 отвечают случаям возбуждения ПМСВ фокусирующей и прямолинейной антеннами; положения частот f^* на рис. a и f^{**} на рис. b, на которых происходит «выравнивание» значений кривых 1 и 2, показаны пунктирными линиями

Fig. 2. Results of the measurements of frequency dependencies of the transmission coefficient S_{12} (a) and EMF V (b) at $P_{\text{in}} = -20$ and -10 dBm respectively, where curves 1 and 2 correspond to the cases of MSSW excitation by focusing and straight antennas; frequency positions f^* in fig. a and f^{**} in fig. b, at which “equalization” of curves 1 and 2 happens, are shown by dash lines

дипольно-обменных резонансов и подробнее обсуждалось в работе [42]. Из рисунка можно видеть, что на частотах $f < f^{**} \approx 5.05$ ГГц в случае фокусирующей антенны величина сигнала V была больше на 10–20 % относительно случая прямолинейной антенны. На частоте f^{**} происходило выравнивание значений V кривых 1 и 2, а на частотах $f > f^{**}$ ЭДС оказывалась больше в случае прямолинейной антенны. Для того чтобы объяснить такое поведение зависимости $V(f)$, обратимся к рис. 3.

На рис. 3 приведены результаты микромагнитного моделирования двумерных карт распределения Фурье-амплитуды волнового поля ПМСВ в плоскости XY в окрестности фокусирующей антенны (отмечена как 1) на частотах $f = 4.65 \dots 4.9$ ГГц и при $H = 960$ Э, полученные с помощью ООММФ [46]. Моделирование проводилось согласно подходу работы [32] при параметрах, отвечающих эксперименту. Из рис. 3 можно видеть, что возбуждение ПМСВ криволинейной антенной

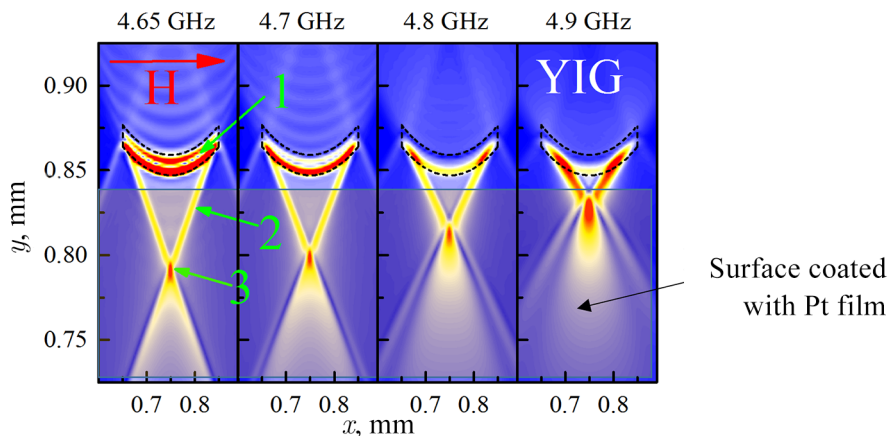


Рис. 3. Распределение Фурье-амплитуды поля ПМСВ, возбуждаемой фокусирующей (1) антенной в плоскости XY на частотах $f = 4.65 \dots 4.9$ ГГц, где 2 – формируемые каустики, 3 – положение фокуса ПМСВ (цвет онлайн)

Fig. 3. Distribution of Fourier-amplitude of MSSW field excited by focusing antenna (1) in XY plane at frequencies $f = 4.65 \dots 4.9$ GHz where 2 – formed caustics, 3 – position of MSSW focus (color online)

Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К.,
Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А.

Известия вузов. ПНД, 2024, т. 32, № 3

xxx

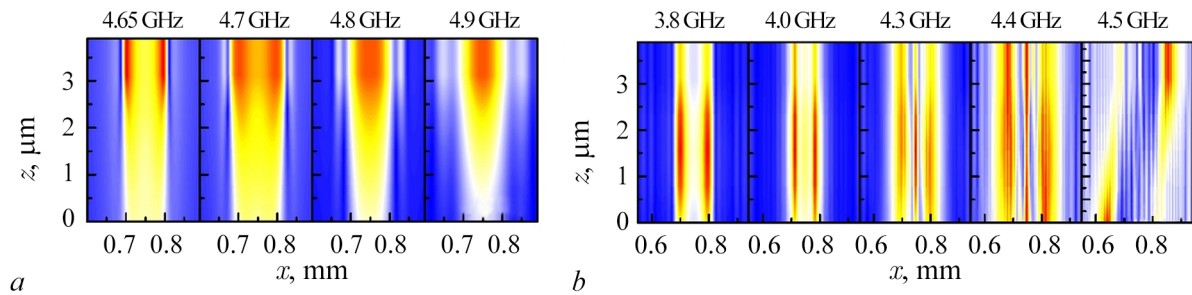


Рис. 4. Распределение Фурье-амплитуды поля ПМСВ (a) и ООМСВ (b), возбуждаемых фокусирующей антенной в плоскости XZ (цвет онлайн)

Fig. 4. Distribution of Fourier-amplitude of MSSW (a) and BVMSW (b) field excited by focusing antenna in XZ plane (color online)

приводит к фокусировке ПМСВ, при этом с ростом частоты f положение фокуса (отмечено как 3 на рис. 3) смещается ближе к фокусирующей антенне, но остается на участке пленки YIG, покрытом Pt. На частотах $f > 4.9$ ГГц положение фокуса находится между антенной и областью пленки YIG, покрытой Pt. С ростом частоты ПМСВ увеличивается угол между направлениями оси y и каустиками (отмечены как 2 на рис. 3), формируемыми при фокусировке.

Отметим, что распространение каустик ПМСВ, формируемых на краях антенны, взаимно относительно оптической оси антенны. Это следует из результатов микромагнитного моделирования распространения ПМСВ, амплитуда которой на нескольких частотах в плоскости XZ сечения пленки YIG показана на рис. 4, a. В случае обратных объемных магнитостатических волн (ООМСВ) характер распространения каустик кардинально отличается. Это можно видеть из рис. 4, b. Особенно ярко невзаимность проявляется для частоты $f = 4.5$ ГГц. Распределение амплитуд «левой» и «правой» каустик относительно оптической оси невзаимно — максимумы их амплитуд находятся вблизи разных поверхностей пленки YIG.

Таким образом, отмеченный ранее рост величины сигнала ЭДС на частотах $f < f^{**}$ может быть связан с двумя причинами: 1) с формируемыми каустиками, которые отражают рост плотности состояний $\eta(f)$ в спектре ПМСВ, что схоже со случаем дипольно-обменных резонансов; 2) фокусировка ПМСВ приводит к росту плотности погонной мощности ПМСВ, что эквивалентно случаю увеличения уровня входной мощности P_{in} .

Заключение

Таким образом, на примере структур YIG/Pt показана возможность детектирования с помощью ОСЭХ сфокусированных пучков ПМСВ, возбуждаемых фокусирующим криволинейным преобразователем. Проведено сопоставление частотных зависимостей ЭДС $V(f)$, наводимых на контактах к Pt, в условиях фокусировки ПМСВ и при возбуждении прямолинейным преобразователем. Отмечено, что на величину $V(f)$, генерируемую сфокусированными ПМСВ, существенно влияет хроматическая аберрация фокусирующей антенны. Показано, что фокусировка ПМСВ приводит к росту сигнала ЭДС относительно случая прямолинейной антенны на тех частотах $f < f^{**}$, при которых положение фокуса ПМСВ находится на участке структуры, покрытом Pt. На частотах $f > f^{**}$, при которых положение фокуса находится между антенной и областью YIG, покрытой Pt, сигнал ЭДС, наоборот, падает. Указанный рост ЭДС на частотах $f < f^{**}$ может быть связан с увеличением погонной плотности мощности ПМСВ и каустиками, формируемыми при фокусировке, которые отражают рост плотности состояний $\eta(f)$ в спектре ПМСВ, что должно приводить к усилению процессов электрон-магнонного рассеяния.

Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К.,
Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А.

Список литературы

1. Никитов С. А., Калябин Д. В., Лисенков И. В., Славин А. Н., Барабаненков Ю. Н., Осокин С. А., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Морозова М. А., Шараевский Ю. П., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Сахаров В. К., Павлов Е. С. Магноника — новое направление спинтроники и спин-волновой электроники. УФН. 2015. Т. 185, № 10. С. 1099–1128. DOI: 10.3367/UFNr.0185. 201510m.1099.
2. Никитов С. А., Сафин А. Р., Калябин Д. В., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Лозунов М. В., Морозова М. А., Одинцов С. А., Осокин С. А., Шараевская А. Ю., Шараевский Ю. П., Кирилюк А. И. Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам. УФН. 2020. Т. 190, № 10. С. 1009–1040. DOI: 10.3367/UFNr.2019.07.038609.
3. Chumak A. A., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nature Phys.* 2015. Vol. 11. P. 453–461. DOI: doi:10.1038/nphys3347.
4. Demidov V. E., Urazhdin S., Loubens G., Klein O., Cros V., Anane A., Demokritov S. O. Magnetization oscillations and waves driven by pure spin currents. *Phys. Rep.* 2017. Vol. 673. P. 1–31. DOI: 10.1016/j.physrep.2017.01.001.
5. Althammer M. Pure spin currents in magnetically ordered insulator/normal metal heterostructures // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. Vol. 51, no. 31. P. 313001. DOI: 10.1088/1361-6463/aaca89.
6. Demidov V. E., Urazhdin S., Anane A., Cros V., Demokritov S. O. Spin-orbit-torque magnonics. *Journal of Applied Physics.* 2020. V. 127, no. 17. P. 170901. DOI: 10.1063/5.0007095.
7. Brataas A., van Wees B., Klein O., de Loubens G., Viret M. Spin insulatronics // *Physics Reports.* 2020. Vol. 885. P. 1–27. DOI: 10.1016/j.physrep.
8. Mahmoud A., Ciubotaru F., Vanderveken F., Chumak A. V., Hamdioui S., Adelman C., Cotofana S. Introduction to spin wave computing. *J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 128, no. 16. 161101. DOI: 10.1063/5.0019328.
9. Chumak A. V., Kabos P., Wu M., Abert C., Adelman C., Adeyeye A. O., Akerman J., Aliev F. G., Anane A., Awad A., Back C. H., Barman A., Bauer G. E. W., Becherer M., Beginin E. N., Bittencourt V. A. S. V., Blanter Y. M., Bortolotti P., Boventer I., Bozhko D. A., Bunyaev S. A., Carmiggelt J. J., Cheenikundil R. R., Ciubotaru F., Cotofana S., Csaba G., Dobrovolskiy O. V., Dubs C., Elyasi M., Fripp K. G., Fulara H., Golovchinsky I. A., Gonzalez-Ballster C., Graczyk P., Grundler D., Gruszecki P., Gubbiotti G., Guslienko K., Haldar A., Hamdioui S., Hertel R., Hillebrands B., Hioki T., Houshang A., Hu C.-M., Huebl H., Huth M., Iacocca E., Jungfleisch M. B., Kakazei G. N., Khitun A., Khymyn R., Kikkawa T., Klaui M., Klein O., Klos J. W., Knauer S., Koraltan S., Kostylev M., Krawczyk M., Krivorotov I. N., Kruglyak V. V., Lachance-Quirion D., Ladak S., Lebrun R., Li Y., Linder M., Macedo R., Mayr S., Melkov G. A., Mieszczak S., Nakamura Y., Nembach H. T., Nikitin A. A., Nikitov S. A., Novosad V., Otalora J. A., Otani Y., Papp A., Pigeau B., Pirro P., Porod W., Porrati F., Qin H., Rana B., Reimann T., Reinte F., Romero-Isart O., Ross A., Sadovnikov A. V., Safin A. R., Saitoh E., Schmidt G., Schultheiss H., Schultheiss K., Serga A. A., Sharma S., Shaw J. M., Suess D., Surzhenko O., Szulc K., Taniguchi T., Urbanek M., Usami K., Ustinov A. B., van der Sar T., van Dijken S., Vasyuchka V. I., Verba R., Viola Kusminskiy S., Wang Q., Weides M., Weiler M., Wintz S., Wolski S. P., Zhang X. Advances in Magnetism Roadmap on Spin-Wave Computing. *IEEE Transactions on Magnetism.* 2022. Vol. 58, no. 6. P. 0800172. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664.
10. Khitun A. Magnonic holographic devices for special type data processing. *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 113, no. 16. P. 164503. DOI: 10.1063/1.4802656.
11. Gertz F., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Nikonov D. E., Khitun A. Magnonic holographic memory: From proposal to device. *IEEE J. Explor. Solid-State Comput. Devices Circuits.* 2015. Vol. 1, P. 67–75. DOI: 10.1109/JXCDC.2015.2461618.
12. Khivintsev Y., Ranjbar M., Gutierrez D., Chiang H., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A. Prime factorization using magnonic holographic devices. *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 120, no. 12. P. 123901. DOI: 10.1063/1.4962740.

Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А.

13. *Gutierrez D., Chiang H., Bhowmick T., Volodchenkov A. D., Ranjbar M., Liu G., Jiang C., Warren C., Khivintsev Y., Filimonov Y. Garay J., Lake R., Balandin A. A., Khitun A.* Magnonic holographic imaging of magnetic microstructures. *JMMM*. 2017. Vol. 428. P. 348–356. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.022.
14. *Papp A., Porod W., Csurgay A. I., Csaba G.* Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference. *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 9245. DOI: 10.1038/s41598-017-09485-7.
15. *Csaba G., Papp A., Porod W.* Holographic Algorithms for On-Chip, Non-Boolean Computing // 17th International Workshop on Computational Electronics (IWCE 2014). Paris, France, 2014. P. 33–34. DOI: 10.1109/IWCE.2014.6865814.
16. *Csaba G., Papp A., Porod W.* Perspectives of using spin waves for computing and signal processing. *Phys. Lett. A*. 2017. V. 381. P. 1471. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.02.042.
17. *Macia F., Kent A. D., Hoppensteadt F. C.* Spin-wave interference patterns created by spin-torque nano-oscillators for memory and computation. *Nanotechnology*. 2011. Vol. 22. P. 095301. DOI: 10.1088/0957-4484/22/9/095301.
18. *Csaba G., Papp A., Porod W.* Spin-wave based realization of optical computing primitives. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115, no. 17. P. 17C741. DOI: 10.1063/1.4868921.
19. *Vogel M., Hillebrands B., von Freymann G.* Spin-Wave Optical Elements: Towards Spin-wave Fourier Optics. arXiv:1906.02301v1 [physics.app-ph]
20. *Papp A., Csaba G.* Lens Design for Computing With Anisotropic Spin Waves. *IEEE Magn. Lett.* 2018. Vol. 9. P. 3706405. DOI: 10.1109/LMAG.2018.2872127.
21. *Ваишковский А. В., Стальмахов А. В., Шахназарян Д. Г.* Формирование, отражение и преломление пучков магнитостатических волн. *Известия вузов. Физика*. 1988. № 11. С. 57–75. DOI: 10.1007/BF00893543.
22. *Davies C. S., Kruglyak V. V.* Graded-index magnonics. *Low Temperature Physics*. 2015. Vol. 41. P. 760–766. DOI: 10.1063/1.4932349.
23. *Schneider T., Serga A. A., Chumak A. V., Sandweg C. W., Trudel S., Wolff S., Kostylev M. P., Tiberkevich V. S., Slavin A. N., Hillebrands B.* Nondiffractive subwavelength wave beams in a medium with externally controlled anisotropy. *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104. P. 197203. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.197203.
24. *Ulrichs H., Demidov V. E., Demokritov S. O., Urazhdin S.* Spin-torque nano-emitters for magnonic applications. *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100. P. 162406. DOI: 10.1063/1.4704563.
25. *Gieniusz R., Ulrichs H., Bessonov V. D., Guzowska U., Stognii A. I., Maziewski A.* Single antidot as a passive way to create caustic spin-wave beams in yttrium iron garnet films. *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. P. 102409. DOI: 10.1063/1.4795293
26. *Gieniusz R., Bessonov V. D., Guzowska U., Stognii A. I., Maziewski A.* An antidot array as an edge for total non-reflection of spin waves in yttrium iron garnet films. *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104, no. 8. P. 082412. DOI: 10.1063/1.4867026.
27. *Mansfeld S., Topp J., Martens K., Toedt J. N., Hansen W., Heitmann D., Mendach S.* Spin Wave Diffraction and Perfect Imaging of a Grating. *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108. P. 047204. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.047204.
28. *Choi S., Lee K. -S., Kim S. -K.* Spin-wave interference. *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89, no. 6. P. 062501. DOI: 10.1063/1.2259813.
29. *Gruszecki P., Kasprzak M., Serebryannikov A. E., Krawczyk M., Śmigaj W.* Microwave excitation of spin wave beams in thin ferromagnetic films. *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6. P. 22367. DOI: 10.1038/srep22367.
30. *Körner H. S., Stigloher J., Back C. H.* Excitation and tailoring of diffractive spin-wave beams in NiFe using nonuniform microwave antennas. *Phys. Rev. B*. 2017. Vol. 96. P. 100401(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.100401.

*Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К.,
Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А.*
Известия вузов. ПНД, 2024, т. 32, № 3

31. Loayza N., Jungfleisch M. B., Hoffmann A., Bailleul M., Vlaminck V. Fresnel diffraction of spin waves. *Phys. Rev. B*. 2018. Vol. 98. P. 144430. DOI: 10.1103/PhysRevB.98.144430.
32. Madami M., Khivintsev Y., Gubbiotti G., Dudko G., Kozhevnikov A., Sakharov V., Stal'makhov A., Khitun A., Filimonov Y. Nonreciprocity of backward volume spin wave beams excited by the curved focusing transducer. *Appl. Phys. Lett.* 2018. Vol. 113, no. 15. P. 152403. DOI: 10.1063/1.5050347.
33. Kajiwara Y., Harii K., Takahashi S., Ohe J., Uchida K., Mizuguchi M., Umezawa H., Kawai H., Ando K., Takanashi K., Maekawa S., Saitoh E. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator. *Nature*. 2010. Vol. 464. P. 262–266. DOI: 10.1038/nature08876.
34. Collet M., de Milly X., d'Allivy Kelly O., Naletov V. V., Bernard R., Bortolotti P., Ben Youssef J., Demidov V. E., Demokritov S. O., Prieto J. L., Muñoz M., Cros V., Anane A., de Loubens G., Klein O. Generation of coherent spin-wave modes in yttrium iron garnet microdiscs by spin-orbit torque. *Nat Commun*. 2016. Vol. 7. P. 10377. DOI: 10.1038/ncomms10377.
35. Uchida K. -I., Adachi H., Ota T., Nakayama H., Maekawa S., Saitoh E. Observation of longitudinal spin-Seebeck effect in magnetic insulators. *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97, no. 17. P. 172505. DOI: 10.1063/1.3507386.
36. 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. P. 082405. DOI: 10.1063/1.3689787.
37. d'Allivy Kelly O., Anane A., Bernard R., Ben Youssef J., Hahn C., Molpeceres A. H., Carrétéro C., Jacquet E., Deranlot C., Bortolotti P., Lebourgeois R., Mage J. -C., de Loubens G., Klein O., Cros V., Fert A. Inverse spin Hall effect in nanometer-thick yttrium iron garnet/Pt system. *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103, no. 8. P. 082408. DOI: 10.1063/1.4819157 .
38. Balinsky M., Ranjbar M., Haidar M., Dürrenfeld P., Dumas R. K., Khartsev S., Slavin A., Åkerman J. Spin pumping and the inverse spin Hall effect via magnetostatic surface spin-wave modes in YIG/Pt bilayers. *IEEE Magn. Lett.* 2015. Vol. 6. P. 3000604. DOI: 10.1109/LMAG.2015.2471276.
39. Balinsky M., Chiang H., Gutierrez D., Khitun A. Spin wave interference detection via inverse spin Hall effect. *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 118, no. 24. P. 242402. DOI: 10.1063/5.0055402.
40. Селезнёв М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Кожевников 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. ПНД*. 2022. Т. 30, № 5. С. 617–643. DOI: 10.18500/0869-6632-003008.
41. Селезнёв М. Е., Никулин Ю. В., Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А. Влияние резонансного взаимодействия поверхностных магнитостатических волн с обменными модами на генерацию ЭДС в структурах YIG/Pt. *ЖТФ*. 2021. Т. 91, № 10. P. 1504–1508. DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51363.136-21.
42. Селезнёв М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Филимонов Ю. А. Влияние параметрической неустойчивости на спиновую накачку дипольно-обменными поверхностными магнитостатическими волнами в структурах ЖИГ–Pt. *Известия вузов. ПНД*. 2023. Т. 31, № 2. С. 225–242. DOI: 10.18500/0869-6632-003032.
43. Никулин Ю. В., Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Хивинцев Ю. В., Филимонов Ю. А. Частотная зависимость смешанной спиновой проводимости структур YIG/Pt при спиновой накачке ПМСВ. *ФТТ*. 2023. Т. 65, № 6. С. 967–972. DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55652.10H.
44. Дудко Г. М., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Стальмахов А. В., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В. Расчет фокусирующих преобразователей спиновых волн методом микромагнитно-

го моделирования. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2018. Т. 18, № 2. С. 92–102. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102.

45. Damon R., Eshbach J. Magnetostatic modes of a ferromagnetic slab. J. Phys.Chem. Sol. 1961. Vol. 19, no. 3–4. P. 308–320. DOI: 10.1016/0022-3697(61)90041-5.
46. Donahue M.J., Porter D. G. OOMMF user's guide, version 1.0. Interagency Report NIST 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999. DOI: 10.6028/NIST.IR.6376.

References

1. Nikitov SA, Kaliabin DV, Lisenkov IV, Slavin AN, Barabanenkov YuN, Osokin SA, Sadovnikov AV, Beginin EN, Morozova MA, Sharaevskii YuP, Filimonov YA, Khivintsev YV, Vysotskii SL, Sakharov VK, Pavlov ES. Magnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics. Phys. Usp. 2015;58(10):1002–1028. DOI: 10.3367/UFNr.0185. 201510m.1099.
2. Nikitov SA, Safin AR, Kalyabin DV, Sadovnikov AV, Beginin EN, Logunov MV, Morozova MA, Odintsov SA, Osokin SA, Sharaevskaya AYU, Sharaevsky YuP, Kirilyuk AI. Dielectric magnonics: from gigahertz to terahertz. Phys. Usp. 2020;63:945–974. DOI: 10.3367/UFNe.2019.07.038609.
3. Chumak AA, Vasyuchka VI, Serga AA, Hillebrands B. Magnon spintronics. Nature Phys. 2015; 11:453. DOI: doi:10.1038/nphys3347.
4. Demidov VE, Urazhdin S, Loubens G, Klein O, Cros V, Anane A, Demokritov SO. Magnetization oscillations and waves driven by pure spin currents. Phys. Rep. 2017;673:1–31. DOI: 10.1016/j.physrep.2017.01.001.
5. Althammer M. Pure spin currents in magnetically ordered insulator/normal metal heterostructures. J. Phys. D: Appl. Phys. 2018;51:313001. DOI: 10.1088/1361-6463/aaca89.
6. Demidov VE, Urazhdin S, Anane A, Cros V, Demokritov SO. Spin–orbit-torque magnonics. Journal of Applied Physics. 2020;127(17):170901. DOI: 10.1063/5.0007095.
7. Brataas A., van Wees B., Klein O., de Loubens G., Viret M. Spin insulatronics. Physics Reports. 2020;885:1–27. DOI: 10.1016/j.physrep.
8. Mahmoud A, Ciubotaru F, Vanderveken F, Chumak AV, Hamdioui S, Adelman C, Cotofana S. Introduction to spin wave computing. J. Appl. Phys. 2020;128(16):161101. DOI: 10.1063/5.0019328.
9. Chumak AV, Kabos P, Wu M, Abert C, Adelman C, Adeyeye AO, Akerman J, Aliev FG, Anane A, Awad A, Back CH, Barman A, Bauer GEW, Becherer M, Beginin EN, Bittencourt VASV, Blanter YM, Bortolotti P., Boventer I, Bozhko DA, Bunyaev SA, Carmiggelt JJ, Cheenikundil RR, Ciubotaru F, Cotofana S, Csaba G, Dobrovolskiy OV, Dubs C, Elyasi M, Fripp KG, Fulara H, Golovchnsiy IA, Gonzalez-Ballster C, Graczyk P, Grundler D, Gruszecki P, Gubbiotti G, Gusliencko K, Haldar A, Hamdioui S, Hertel R, Hillebrands B, Hioki T, Houshang A, Hu CM, Huebl H, Huth M, Iacocca E, Jungfleisch MB, Kakazei GN, Khitun A, Khymyn R, Kikkawa T, Klau M, Klein O, Klos JW, Knauer S, Koraltan S, Kostylev M, Krawczyk M, Krivorotov IN, Kruglyak VV, Lachance-Quirion D, Ladak S, Lebrun R, Li Y, Linder M, Macedo R, Mayr S, Melkov GA, Mieszczak S, Nakamura Y, Nembach HT, Nikitin AA, Nikitov SA, Novosad V, Otalora JA, Otani Y, Papp A, Pigeau B, Pirro P, Porod W, Porrati F, Qin H, Rana B, Reimann T, Reinte F, Romero-Isart O, Ross A, Sadovnikov AV, Safin AR, Saitoh E, Schmidt G, Schultheiss H, Schultheiss K, Serga AA, Sharma S, Shaw JM, Suess D, Surzhenko O, Szulc K, Taniguchi T, Urbanek M, Usami K, Ustinov AB, van der Sar T, van Dijken S, Vasyuchka VI, Verba R, Kusminskiy SV, Wang Q, Weides M, Weiler M, Wintz S, Wolski SP, Zhang X. Advances in Magnetics Roadmap on Spin-Wave Computing. IEEE Transactions on Magnetics. 2022;58(6): 0800172. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664.
10. Khitun A. Magnonic holographic devices for special type data processing. J. Appl. Phys. 2013;113(16):164503. DOI: 10.1063/1.4802656.
11. Gertz F, Kozhevnikov A, Filimonov Y, Nikonov DE, Khitun A. Magnonic holographic memory:

*Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К.,
Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А.*

- From proposal to device. IEEE J. Explor. Solid-State Comput. Devices Circuits. 2015;1:67–75. DOI: 10.1109/JXCDC.2015.2461618.
12. Khivintsev Y, Ranjbar M, Gutierrez D, Chiang H, Kozhevnikov A, Filimonov Y, Khitun A. Prime factorization using magnonic holographic devices. J. Appl. Phys. 2016;120(12):123901. DOI: 10.1063/1.4962740.
 13. Gutierrez D, Chiang H, Bhowmick T, Volodchenkov AD, Ranjbar M, Liu G, Jiang C, Warren C, Khivintsev Y, Filimonov Y, Garay J, Lake R, Balandin AA, Khitun A. Magnonic holographic imaging of magnetic microstructures. JMMM. 2017;428:348–356. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.12.022.
 14. Papp A, Porod W, Csurgay AI, Csaba G. Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference. Sci. Rep. 2017;7:9245. DOI: 10.1038/s41598-017-09485-7.
 15. Csaba G, Papp A, Porod W. Holographic Algorithms for On-Chip, Non-Boolean Computing. In: Proceedings of the 17th International Workshop on Computational Electronics (IWCE 2014). 2014, Paris, France. P. 33–34. DOI: 10.1109/IWCE.2014.6865814.
 16. Csaba G, Papp A, Porod W. Perspectives of using spin waves for computing and signal processing. Phys. Lett. A. 2017;381:1471. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.02.042.
 17. Macia F, Kent AD, Hoppensteadt FC. Spin-wave interference patterns created by spin-torque nano-oscillators for memory and computation. Nanotechnology. 2011;22:095301. DOI: 10.1088/0957-4484/22/9/095301.
 18. Csaba G., Papp A., Porod W. Spin-wave based realization of optical computing primitives. J. Appl. Phys. 2014;115(17):17C741. DOI: 10.1063/1.4868921.
 19. Vogel M, Hillebrands B, von Freymann G. Spin-Wave Optical Elements: Towards Spin-wave Fourier Optics. arXiv:1906.02301v1 [physics.app-ph]
 20. Papp A, Csaba G. Lens Design for Computing With Anisotropic Spin Waves. IEEE Magn. Lett. 2018;9:3706405. DOI: 10.1109/LMAG.2018.2872127.
 21. Vashkovskii AV, Stalmakhov AV, Shakhnazaryan DG. Forming, reflection and refraction of magnetostatic waves beams. Soviet Physics Journal. 1988;31:908–915. DOI: 10.1007/BF00893543.
 22. Davies CS, Kruglyak VV. Graded-index magnonics. Low Temperature Physics. 2015;41:760–766. DOI: 10.1063/1.4932349.
 23. Schneider T, Serga AA, Chumak AV, Sandweg CW, Trudel S, Wolff S, Kostylev MP, Tiberkevich VS, Slavin AN, Hillebrands B. Nondiffractive subwavelength wave beams in a medium with externally controlled anisotropy. Phys. Rev. Lett. 2010;104:197203. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.197203.
 24. Ulrichs H, Demidov VE, Demokritov SO, Urazhdin S. Spin-torque nano-emitters for magnonic applications. Appl. Phys. Lett. 2012;100:162406. DOI: 10.1063/1.4704563.
 25. Gieniusz R, Ulrichs H, Bessonov VD, Guzowska U, Stognii AI, Maziewski A. Single antidot as a passive way to create caustic spin-wave beams in yttrium iron garnet films. Appl. Phys. Lett. 2013;102:102409. DOI: 10.1063/1.4795293
 26. Gieniusz R, Bessonov VD, Guzowska U, Stognii AI, Maziewski A. An antidot array as an edge for total non-reflection of spin waves in yttrium iron garnet films. Appl. Phys. Lett. 2014;104(8):082412. DOI: 10.1063/1.4867026.
 27. Mansfeld S, Topp J, Martens K, Toedt JN, Hansen W, Heitmann D, Mendach S. Spin Wave Diffraction and Perfect Imaging of a Grating. Phys. Rev. Lett. 2012;108:047204. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.047204.
 28. Choi S, Lee KS, Kim SK. Spin-wave interference. Appl. Phys. Lett. 2006;89(6):062501. DOI: 10.1063/1.2259813.
 29. Gruszecki P, Kasprzak M, Serebryannikov AE, Krawczyk M, Śmigaj W. Microwave excitation of spin wave beams in thin ferromagnetic films. Sci. Rep. 2016;6: 22367. DOI: 10.1038/srep22367.
 30. Körner HS, Stigloher J, Back CH. Excitation and tailoring of diffractive spin-wave beams in NiFe using nonuniform microwave antennas. Phys. Rev. B. 2017;96:100401(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.100401.

31. Loayza N, Jungfleisch MB, Hoffmann A, Bailleul M, Vlaminck V. Fresnel diffraction of spin waves. *Phys. Rev. B*. 2018;98:144430. DOI: 10.1103/PhysRevB.98.144430.
32. Madami M, Khivintsev Y, Gubbiotti G, Dudko G, Kozhevnikov A, Sakharov V, Stal'makhov A, Khitun A, Filimonov Y. Nonreciprocity of backward volume spin wave beams excited by the curved focusing transducer. *Appl. Phys. Lett.* 2018;113(15):152403. DOI: 10.1063/1.5050347.
33. Kajiwara Y, Harii K, Takahashi S, Ohe J, Uchida K, Mizuguchi M, Umezawa H, Kawai H, Ando K, Takanashi K, Maekawa S, Saitoh E. Transmission of electrical signals by spin-wave in-ter-conversion in a magnetic insulator. *Nature*. 2010;464:262–266. DOI: 10.1038/nature08876.
34. Collet M, de Milly X, d'Allivy Kelly O, Naletov VV, Bernard R, Bortolotti P, Ben Youssef J, Demidov VE, Demokritov SO, Prieto JL, Muñoz M, Cros V, Anane A, de Loubens G, Klein O. Generation of coherent spin-wave modes in yttrium iron garnet microdiscs by spin-orbit torque. *Nat Commun*. 2016;7:10377. DOI: 10.1038/ncomms10377.
35. Uchida KI, Adachi H, Ota T, Nakayama H, Maekawa S, Saitoh E. Observation of longitudinal spin-Seebeck effect in magnetic insulators. *Appl. Phys. Lett.* 2010;97(17):172505. DOI: 10.1063/1.3507386.
36. Chumak AV, Serga AA, Jungfleisch MB, Neb R, Bozhko DA, Tiberkevich VS, Hillebrands B. Direct detection of magnon spin transport by the inverse spin Hall effect. *Appl. Phys. Lett.* 2012;100(8):082405. DOI: 10.1063/1.3689787.
37. d'Allivy Kelly O, Anane A, Bernard R, Ben Youssef J, Hahn C, Molpeceres AH, Carrétéro C, Jacquet E, Deranlot C, Bortolotti P, Lebourgeois R, Mage JC, de Loubens G, Klein O, Cros V, Fert A. Inverse spin Hall effect in nanometer-thick yttrium iron garnet/Pt system. *Appl. Phys. Lett.* 2013;103(8):082408. DOI: 10.1063/1.4819157.
38. Balinsky M, Ranjbar M, Haidar M, Dürrenfeld P, Dumas RK, Khartsev S, Slavin A, Åkerman J. Spin pumping and the inverse spin Hall effect via magnetostatic surface spin-wave modes in YIG/Pt bilayers. *IEEE Magn. Lett.* 2015;6:3000604. DOI: 10.1109/LMAG.2015.2471276.
39. Balinsky M, Chiang H, Gutierrez D, Khitun A. Spin wave interference detection via inverse spin Hall effect. *Appl. Phys. Lett.* 2021;118(24): 242402. DOI: 10.1063/5.0055402.
40. Seleznev ME, Nikulin YV, Khivintsev YV, Vysotskii SL, Kozhevnikov AV, Sakharov VK, Dudko GM, Pavlov ES, Filimonov YA. Influence of three-magnon decays on electromotive force generation by magnetostatic surface waves in integral YIG – Pt structures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2022;30(5):617–643. DOI: 10.18500/0869-6632-003008.
41. Seleznev ME, Nikulin YV, Sakharov VK, Khivintsev YV, Kozhevnikov AV, Vysotskii SL, Filimonov YA. Influence of the resonant interaction of surface magnetostatic waves with exchange modes on the EMF generation in YIG/Pt structures. *Technical Physics*. 2022;92(13):2074–2077. DOI: 10.21883/TP.2022.13.52224.136-21.
42. Seleznev ME, Nikulin YV, Khivintsev YV, Vysotskii SL, Kozhevnikov AV, Sakharov VK, Dudko GM, Filimonov YA. Influence of parametric instability on spin pumping by dipole-exchange magnetostatic surface waves in YIG–Pt structures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2023;31(2):225–242. DOI: 10.18500/0869-6632-003032.
43. Nikulin YV, Vysotskii SL, Seleznev ME, Kozhevnikov AV, Sakharov VK, Dudko GM, Khivintsev YV, Filimonov YA. Frequency dependence of the spin mixing conductance of YIG/Pt structures upon MSSW spin pumping. *Phys. Solid State*. 2023;65(6):926–931. DOI: 10.21883/PSS.2023.06.56103.10H.
44. Dudko GM, Kozhevnikov AV, Saharov VK, Stalmahov AV, Filimonov YA, Khivintsev YV. Calculation of Focusing Spin Wave Transducers Using the Method of Micromagnetic Simulation. *Izvestiya of Saratov University. Physics*. 2018;18(2):92–102. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102.
45. Damon R, Eshbach J. Magnetostatic modes of a ferromagnetic slab. *J. Phys.Chem. Sol.* 1961; (3–4):308–320. DOI: 10.1016/0022-3697(61)90041-5.

*Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К.,
Кожевников А. В., Высоккий С. Л., Филимонов Ю. А.*

46. Donahue MJ, Porter DG. OOMMF user's guide, version 1.0. Interagency Report NIST 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999. DOI: 10.6028/NIST.IR.6376.



Селезнёв Михаил Евгеньевич — родился в г. Заречном (1994), окончил факультет нано- и био-медицинских технологий (СГУ, 2017) и аспирантуру (СГУ, 2022). Работает в Саратовском филиале ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН в должности младшего научного сотрудника. Научные интересы: магнетика и спинтроника, магнитные материалы, физика полупроводников, физика твердого тела. Имеет ряд публикаций по указанным направлениям.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: mixanich94@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7359-3201
AuthorID (eLibrary.Ru): 1031873



Дудко Галина Михайловна — родилась в Свердловске (1961). Окончила физический факультет Саратовского университета им. Н. Г. Чернышевского (1983). Кандидат физико-математических наук (2002). Область научных интересов: нелинейная динамика магнито-статических волн, микромагнитное моделирование динамики намагниченности в ферромагнитных нано- и микроструктурах. Имеет более 30 научных публикаций.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: dugal_2010@hotmail.com
ORCID: 0000-0002-7083-4399
AuthorID (eLibrary.Ru): 39883



Никулин Юрий Васильевич — родился в Саратове (1982), окончил Саратовский государственный университет (2004). После окончания СГУ работает в СФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН старшим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области физической электроники и материаловедения (СГУ, 2014). Опубликовал 28 научных статей по направлениям, указанным выше.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: yvnikulin@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2957-5468
AuthorID (eLibrary.Ru): 168029



Хивинцев Юрий Владимирович — родился в 1975 году. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского (1998). Кандидат физико-математических наук (2004). Ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН и доцент Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. Область научных интересов – магнитные колебания и волны, СВЧ-электроника.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: khivintsev@gmail.com
AuthorID (eLibrary.Ru): 39882

*Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К.,
Кожневиков А. В., Высоцкий С. Л., Филмонов Ю. А.*

Известия вузов. ПНД, 2024, т. 32, № 3



Сахаров Валентин Константинович — родился в пос. Соколовый Саратовской области (1986). Окончил Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского (2008) и аспирантуру ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (2011). В настоящее время работает научным сотрудником лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Область научных интересов: спин-волновые явления в магнитных микро- и наноструктурах, СВЧ-электроника. Имеет 17 научных публикаций.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: valentin@sakharov.info
ORCID: 0000-0001-7168-1198
AuthorID (eLibrary.Ru): 818546



Кожевников Александр Владимирович — родился в Саратове (1962), окончил Саратовский государственный университет (1984). Работает в Саратовском филиале ИРЭ РАН старшим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (2011) в области нелинейных спиновых волн. Опубликовал 23 научных статьи.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: kzhavl@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8904-475X
AuthorID (eLibrary.Ru): 27013



Высоцкий Сергей Львович — родился в Саратове (1955), окончил Саратовский политехнический институт (1977). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области радиофизики (СГУ, 1994). Ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники Саратовского филиала ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Автор более 60 научных работ.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: vysotsl@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3151-9297
AuthorID (eLibrary.Ru): 27015



Филимонов Юрий Александрович — родился в Куйбышеве (1955). Окончил факультет физической и квантовой электроники МФТИ (1979). Доктор физико-математических наук (2008), профессор по специальности «Физика магнитных явлений» (2012). Директор Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Научные интересы: магнетика и спинтроника, магнитные материалы и структуры, электронная компонентная база. Имеет более 120 публикаций.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: fil@soire.renet.ru
ORCID: 0000-0002-2645-6669
AuthorID (eLibrary.Ru): 18696

*Селезнёв М. Е., Дудко Г. М., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К.,
Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А.*
Известия вузов. ПНД, 2024, т. 32, № 3