

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 5  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(5)

Обзорная статья  
УДК 537.624; 537.632

DOI: 10.18500/0869-6632-003002  
EDN: ZYFAEY

## Экспериментальные методы исследования спиновых волн

С. В. Герус, Э. Г. Локк✉

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

E-mail: sgerus@yandex.ru, ✉edwin@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 30.05.2022, принята к публикации 2.06.2022,  
опубликована 30.09.2022

**Аннотация.** Целью данной работы является обзорное описание различных экспериментальных методов исследования характеристик спиновых волн. **Методы.** В работе представлено описание ряда экспериментальных методик, таких как метод зондирования, метод измерения фазовых сдвигов, метод измерения эквивалентных зависимостей, метод пересекающихся волновых пучков, а также использование фурье-анализа комплексного коэффициента передачи спиновых волн для определения их пространственного спектра. Подробно обсуждаются условия использования перечисленных методов и характеристики спиновых волн, которые можно измерить с помощью перечисленных методов. **Результаты.** В работе представлен ряд фундаментальных результатов, которые были получены на основе описываемых методов. Так, метод зондирования успешно использовался для визуализации распределения амплитуды и фазы спиновых волн в плоскости ферритовой пленки. В частности, с его помощью было экспериментально подтверждено предсказанное ранее возникновение сверхнаправленного распространения волновых пучков поверхностной и обратной объемной спиновых волн. Метод измерения фазовых сдвигов позволил измерить дисперсионные зависимости спиновых волн в таких ферритовых структурах, как феррит – металл и феррит – диэлектрик – металл, в которых невозможно проводить измерения с помощью метода зондирования. Метод измерения эквивалентных зависимостей спиновых волн позволил, в частности, впервые с большой точностью измерить величину внешнего магнитного поля, намагничивающего пленку железиттриевого граната до насыщения в различных кристаллографических направлениях. Метод пересекающихся волновых пучков позволил выяснить механизм возникновения параметрической неустойчивости поверхностных спиновых волн. Фурье-анализ комплексного коэффициента передачи спиновых волн позволил определить пространственный спектр этих волн; в частности, с помощью этого метода были впервые измерены дисперсионные зависимости высших мод обратной объемной спиновой волны. **Заключение.** Описанные в работе методы могут и в дальнейшем успешно использоваться для исследования характеристик спиновых волн в различных магнитных кристаллах, ферритовых структурах и мета-структурах.

**Ключевые слова:** спиновая волна, метод зондирования, измерение фазовых сдвигов, эквивалентная зависимость, пространственный фурье-анализ.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00356).

**Для цитирования:** Герус С. В., Локк Э. Г. Экспериментальные методы исследования спиновых волн // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 5. С. 520–533. DOI: 10.18500/0869-6632-003002. EDN: ZYFAEY

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

## Experimental methods for the study of spin waves

S. V. Gerus, E. H. Lock✉

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (Fryazino branch) of the RAS

E-mail: sgerus@yandex.ru, ✉edwin@ms.ire.rssi.ru

Received 30.05.2022, accepted 2.06.2022, published 30.09.2022

**Abstract.** *Purpose* of this paper is to give an overview of various experimental methods for investigation of spin waves characteristics. *Methods.* The paper presents a description of a number of experimental techniques, such as the probing method, the phase shift method, the method of measure of equiphase dependences, the method of intersecting wave beams, and the use of Fourier analysis of the complex transfer coefficient of spin waves to determine their spatial spectrum. The conditions for using the listed methods and the characteristics of spin waves that one can measure by means of these methods are discussed in detail. *Results.* The paper presents a number of fundamental results that have been obtained on the basis of described methods. For example, the probing method was successfully used to visualize the amplitude and phase distribution of spin waves in the ferrite film plane and, in particular, it was used to experimentally confirm the previously predicted appearance of super-directed propagation of surface and backward volume spin wave beams. The phase-shift measurement method made it possible to measure the dispersion dependence of spin waves in ferrite structures such as ferrite–metal and ferrite–dielectric–metal, where measurements cannot be made by the probing method. The method of measuring equiphase dependences of spin waves made it possible, in particular, to measure for the first time with great accuracy the value of an external magnetic field magnetizing an yttrium iron garnet film to saturation in various crystallographic directions. The method of intersecting wave beams has made it possible to clarify the mechanism of parametric instability of surface spin waves. Fourier analysis of the complex transfer coefficient of spin waves allowed to determine the spatial spectrum of these waves; in particular, dispersion dependences of higher modes of the backward volume spin wave were first measured using this method. *Conclusion.* The methods described in this paper may continue to be successfully used for investigations of spin waves characteristics in various magnon crystals, ferrite structures and meta-structures.

**Keywords:** spin wave, probing method, phase shift measurement, equiphase dependence, spatial Fourier analysis.

**Acknowledgements.** This work was performed as part of State Task of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences and with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-07-00356).

**For citation:** Gerus SV, Lock EH. Experimental methods for the study of spin waves. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2022;30(5):520–533. DOI: 10.18500/0869-6632-003002

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

За последние десять лет исследования характеристик спиновых волн и их применения в различных областях науки и техники приобрели новый мощный импульс для своего развития, связанный с возможностью использования этих волн не только в магноники и спинтроники, но и в создании логических схем при разработке компьютеров, а также в разработке нано-устройств [1–6]. Сейчас даже трудно представить, что исследования спиновых волн в конце 20 века были практически приостановлены как в нашей стране, так и за рубежом, а основные результаты исследований, которые были выполнены за 30 лет, прошедших после описания спиновых волн в работе [7], были представлены в монографиях [8–11], подготовленных замечательными учеными А. В. Вашковским, В. С. Стальмаховым, Ю. П. Шараевским, А. Г. Гуревичем, Г. А. Мелковым, В. В. Даниловым, И. В. Зависляком, М. Г. Балинским и Б. А. Калиникосом. Указанные монографии на долгие годы стали настольными книгами для всех исследователей спиновых волн.

Среди научных коллективов России, которые после распада СССР продолжили исследования спиновых волн и предопределили нынешний виток успешного развития магноники, была

лаборатория по исследованию СВЧ-свойств ферромагнетиков во Фрязинском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. За 30 лет, прошедших с начала 1990-х годов, в лаборатории был выполнен ряд экспериментальных и теоретических исследований характеристик спиновых волн в ферритовых пленках и различных структурах на их основе, включая магнетонные кристаллы, а также ряд исследований различных физических эффектов с использованием спиновых волн. Ниже представлен краткий обзор экспериментальных методов, разработанных в лаборатории для исследования характеристик спиновых волн уже после выхода монографий [8–11].

При экспериментальном исследовании спиновых волн основой для создания подавляющего большинства ферритовых структур служили касательно намагниченные пленки железиттриевого граната (ЖИГ, YIG) на подложках из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ, GGG). Использование пленок ЖИГ в составе ферритовых структур обеспечивало эффективное возбуждение в СВЧ-диапазоне спиновых волн с волновыми числами порядка  $10 \dots 10^4 \text{ см}^{-1}$ . Волновой вектор  $\mathbf{k}$  и вектор групповой скорости  $\mathbf{V}$  спиновых волн в общем случае не коллинеарны, причем волна может быть как прямой, когда скалярное произведение  $(\mathbf{k}\mathbf{V}) > 0$ , так и обратной, когда  $(\mathbf{k}\mathbf{V}) < 0$ . Волну с неколлинеарной ориентацией  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{V}$  кратко можно называть неколлинеарной волной.

Коллективы Института радиотехники и электроники АН СССР и Саратовского государственного университета одними из первых в мире начали проводить экспериментальные и теоретические исследования с неколлинеарными спиновыми волнами [12–15]. Для этого в лаборатории по исследованию СВЧ свойств ферромагнетиков ИРЭ АН СССР были созданы экспериментальные установки, в которых возбуждающий и приемный преобразователи могли свободно перемещаться по поверхности ферритовой пленки (структуры) и поворачиваться вокруг нормали к поверхности, что позволяло возбуждать и принимать ограниченные по ширине волновые пучки спиновых волн с любой относительной ориентацией векторов  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{V}$ . Поначалу в экспериментах использовались идентичные возбуждающие и приемный преобразователи спиновых волн. При перемещении приемного преобразователя вдоль вектора групповой скорости проводилось измерение дисперсионных зависимостей спиновых волн в различных ферритовых структурах. Однако вскоре стало ясно, что если вместо идентичного приемного преобразователя использовать подвижный зонд с маленькой апертурой порядка 0.5 мм, то, перемещая этот зонд вдоль поверхности ферритовой пленки (или структуры), можно получить картину распределения амплитуды и фазы спиновой волны в пленке. С этой целью одна из экспериментальных установок была оснащена механизмами перемещения и вращения зонда, а также датчиками положения зонда, а данный метод измерения характеристик спиновых волн получил название метода зондирования. По мере развития компьютерной техники как сам метод, так и экспериментальная установка были значительно усовершенствованы. Компьютерная обработка экспериментальных данных и последующий фурье-анализ комплексного сигнала позволили решить весьма важную проблему — визуализировать распространение спиновых волн в плоскости исследуемой структуры на фиксированной частоте (рис. 1) [16], то есть наблюдать формирование и распространение волнового пучка, распределение амплитуды и очертания его волновых фронтов.

Метод зондирования оказался весьма эффективным при исследовании дифракции спиновых волн через слабоконтрастный магнетонный кристалл (МК, МС), который образуется в ферритовой пленке из-за стационарной пространственно-периодической модуляции приложенного к пленке магнитного поля при расположении на ее поверхности высококоэрцитивной магнитной сигналограммы (рис. 2, 3) [17, 18].

Кроме того, при расположении под пленкой различных магнитных элементов, в плоскости пленки были реализованы различные конфигурации неоднородного магнитного поля, позволяющие контролировать траекторию и ширину луча спиновой волны. Например, с использованием

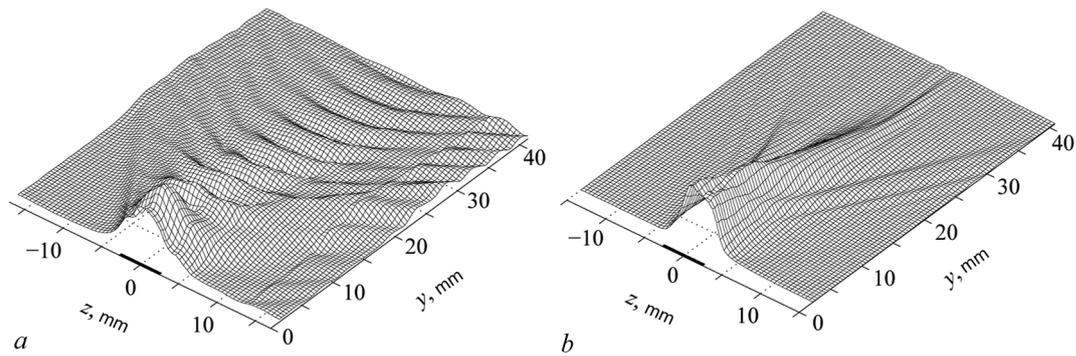


Рис. 1. Распределение амплитуды поверхностных спиновых волн в структуре ЖИГ–ГГГ–ЖИГ при  $kh < 1$  (a) и  $kh \gg 1$  (b), где  $h$  – толщина подложки ГГГ

Fig. 1. Distribution of the amplitude of surface spin waves in the YIG–GGG–YIG structure at  $kh < 1$  (a) and  $kh \gg 1$  (b), where  $h$  is the YIG substrate thickness

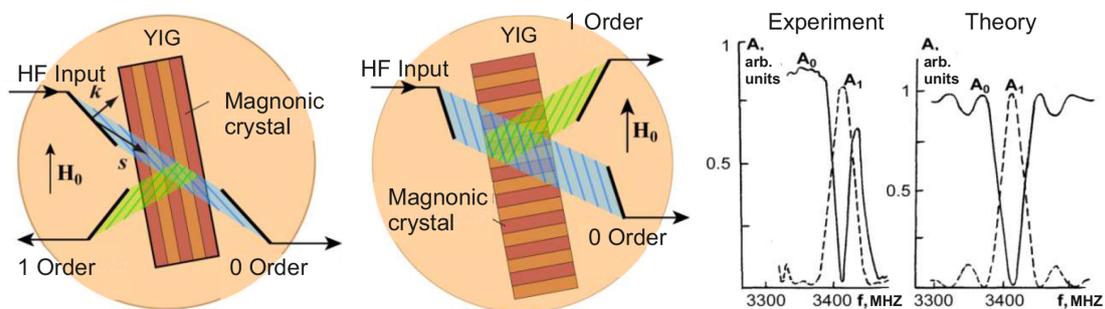


Рис. 2. Схема эксперимента при исследовании дифракции Брэгга на магнотном кристалле. В зависимости от конфигурации протидифрагировавший луч может как распространяться вперед, так и отражаться назад. Справа показан вид АЧХ выходного сигнала в окрестности зоны Бриллюэна

Fig. 2. Schematic of the experiment in the study of Bragg diffraction on a magnon crystal. Depending on the configuration, the diffracted beam can propagate both forward and backward. On the right is a view of the frequency response of the output signal in the vicinity of the Brillouin zone

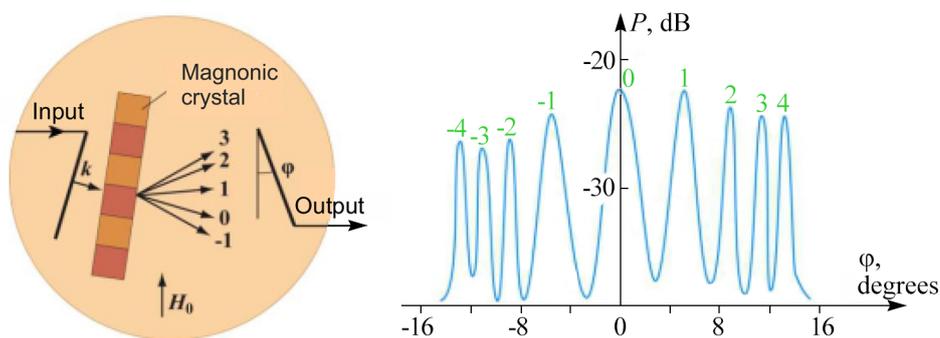


Рис. 3. Дифракция на магнотном кристалле в режиме Рамана–Ната. Наблюдается большое количество дифракционных порядков

Fig. 3. Diffraction on a magnon crystal in the Raman–Nath mode. A large number of diffraction orders are observed

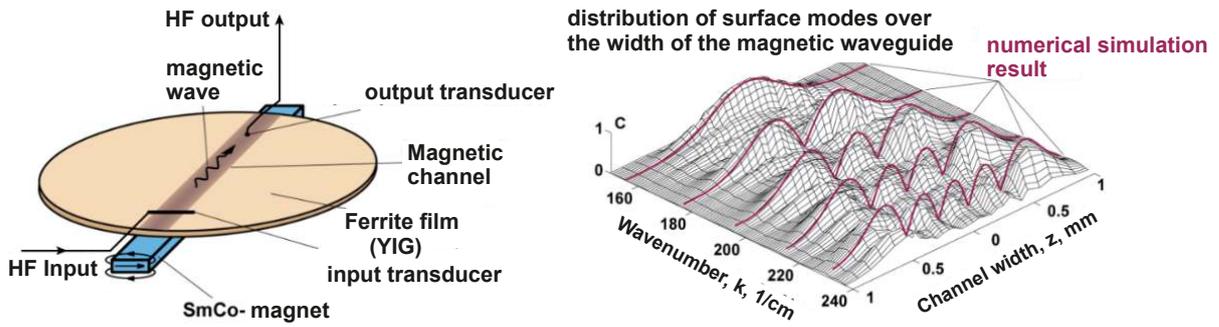


Рис. 4. Поверхностные спиновые моды в магнитном волноводе (схема эксперимента и распределение мод)

Fig. 4. Surface spin modes in a magnetic waveguide (experimental scheme and mode distribution)

протяженных миниатюрных магнитов в пленке было реализовано волноводное распространение спиновых волн, характеризующееся наличием модового состава и волноводной связью между близко расположенными волноводами (рис. 4) [19].

Кроме того, метод зондирования успешно использовался при исследовании дифракции спиновых волн на различных неоднородностях для визуализации возникающих дифракционных картин. В частности, недавно с помощью этого метода было экспериментально подтверждено предсказанное ранее [20, 21] возникновение сверхнаправленного распространения волновых пучков поверхностной и обратной объемной спиновых волн (рис. 5) [22, 23].

Оказалось, что если метод зондирования еще усовершенствовать, то можно будет за время однократного прохождения зонда вдоль поверхности структуры получать картины распределения

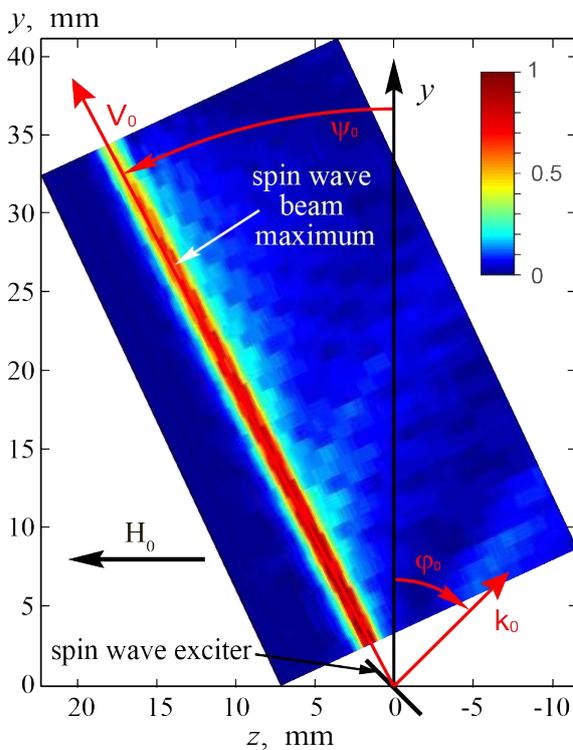


Рис. 5. Экспериментальное распределение амплитуды сверхнаправленного волнового пучка поверхностной спиновой волны в плоскости ферритовой пленки для следующих параметров пучка:  $f_0 = 2999$  МГц,  $k_0 = 56.5$  см<sup>-1</sup>,  $\lambda_0 = 1110$  мкм,  $\lambda_0/D = 0.222$ ,  $\varphi_0 = -45^\circ$ . Изменение цвета (или оттенка серого цвета) соответствует изменению амплитуды спиновой волны на 3 дБ относительно максимальной амплитуды. Абсолютная угловая ширина пучка по уровню 0.5 составила  $\Delta\psi = 0.4^\circ$  (цвет online)

Fig. 5. Experimental amplitude distribution of the superdirected surface spin wave beam in the ferrite film plane for the following beam parameters:  $f_0 = 2999$  MHz,  $k_0 = 56.5$  cm<sup>-1</sup>,  $\lambda_0 = 1110$   $\mu$ m,  $\lambda_0/D = 0.222$ ,  $\varphi_0 = -45^\circ$ . The color change (or gray shade) corresponds to a 3 dB change in the spin wave amplitude relative to the maximum amplitude. The absolute angular width of the beam at 0.5 was  $\Delta\psi = 0.4^\circ$  (color online)

волны в широком интервале частот. Для этого одновременно с медленным движением измерительного зонда по поверхности структуры вдоль оси  $z$  осуществлялось быстрое пилообразное изменение частоты векторного анализатора в некотором интервале частот  $f_{in} < f < f_{fin}$ , причем смещение зонда за период изменения пилообразного напряжения было достаточно мало. В результате данного усовершенствования оказалось возможным измерять распределение комплексного коэффициента передачи  $K(y, z, f)$  в зависимости от частоты  $f$  и координат  $y, z$  вдоль поверхности структуры. Последующее проведение фурье-анализа комплексного коэффициента передачи  $K(y, z, f)$  позволило фактически автоматизировать измерение дисперсионных зависимостей спиновых волн (рис. 6) [24].

Следует отметить, что хотя метод зондирования оказался весьма эффективным для исследования характеристик спиновых волн, все же выполнение некоторых экспериментальных задач с помощью этого метода оказалось невозможным. Например, как известно, на практике невозможно измерить дисперсионную зависимость спиновых волн в ферритовых структурах типа феррит – диэлектрик – металл с помощью метода зондирования, поскольку маленькая толщина диэлектрического зазора (менее 1–2 мм) не позволяет перемещать зонд под металлическим экраном и проводить с его помощью измерения. Зондирование же пленки через подложку, прилегающую к другой поверхности ферритовой пленки малоэффективно, так как подложка из ГГГ имеет толщину 0.5 мм и относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon = 9$ . Поэтому для таких ферритовых структур был разработан метод определения дисперсионной зависимости на основе измерения фазовых сдвигов, возникающих при плавном увеличении толщины воздушного зазора примерно до 10 мм (при таком зазоре спиновые волны в пленке ЖИГ уже не ощущают наличие металлического экрана) с последующим сравнением фазово-частотных характеристик в исходной структуре и в конечной с известной дисперсией (в данном случае – в свободной пленке).

При измерении указанных фазовых сдвигов необходимо учитывать знак разности фаз: в зависимости от этого знака дисперсионная зависимость исследуемой исходной структуры будет сдвинута относительно дисперсионной зависимости в свободной пленке либо в сторону более высоких значений волнового числа, либо в сторону меньших значений волнового числа (если использовать терминологию оптики, то можно сказать, что исходная структура может быть как более, так и менее плотной в оптическом отношении по сравнению с конечной структурой). Описание данного метода, который условно можно назвать методом измерения фазовых сдвигов, а также особенности и условия его использования подробнее изложены в работе [25].

Для реализации описанного выше метода была создана еще одна экспериментальная установка, специально приспособленная для исследования характеристик спиновых волн в таких структурах, в которых невозможно использовать метод зондирования. С помощью метода измерения фазовых сдвигов были измерены дисперсионные зависимости спиновых волн в таких структурах, как феррит – металл (Ф–М, F–M), феррит – диэлектрик – металл (Ф–Д–М, F–D–M),

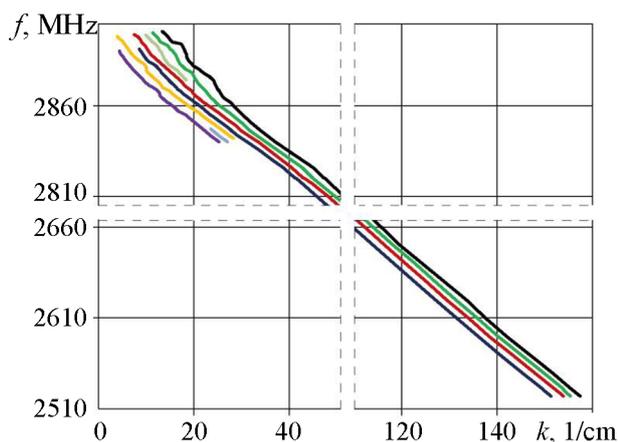


Рис. 6. Дисперсионные зависимости  $f(k)$  мод-спутников, на которые расщепляется первая мода обратной объемной спиновой волны (ООСВ) в высокооднородном магнитном поле из-за существования в ферритовой плёнке нескольких слоев с близкими магнитными параметрами (цвет online)

Fig. 6. Dispersion dependences of  $f(k)$  satellite modes, into which the first mode of backward volume spin wave (BVSW) in a highly homogeneous magnetic field splits due to the existence of several layers with close magnetic parameters in the ferrite film (color online)

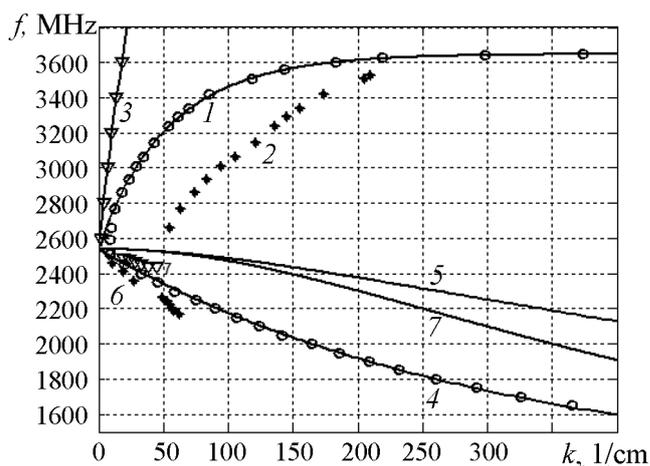


Рис. 7. Дисперсионные зависимости  $f(ky)$ . 1 — для ПСВ в свободной пленке ЖИГ; 2 — для ПСВ в структуре Ф-РМП (эксперимент); 3 — для ПСВ в структуре Ф-М; 4 — для первой моды ООСВ в свободной пленке ЖИГ; 5 — для второй моды ООСВ в свободной пленке ЖИГ; 6 — для ООСВ в структуре Ф-РМП; 7 — для ООСВ в структуре Ф-М (кривые 1, 3, 4, 7 — эксперимент и расчет; кривые 2 и 6 — экспериментальные точки, соединенные плавными кривыми, кривая 5 — расчет). Расчет и эксперимент выполнены для пленки ЖИГ толщиной  $d = 82$  мкм,  $4\pi M_0 = 1870$  Гс и внешнего поля  $H_0 = 367$  Э

Fig. 7. Dispersion dependences  $f(ky)$ . 1 — for SSW in the free film of YIG; 2 — for SSW in the F-MBL structure (experiment); 3 — for SSW in the F-M structure; 4 — for the first mode of BVSW in the free film of YIG; 6 — for BVSW in the F-MBL structure; 7 — for BVSW in the F-M structure (curves 1, 3, 4, and 7 are experiments and calculations; curves 2 and 6 are experimental points connected by smooth curves; curve 5 is calculations). The calculation and the experiment were performed for the YIG film with thickness  $d = 82$   $\mu\text{m}$ ,  $4\pi M_0 = 1870$  G and external field  $H_0 = 367$  Oe

структурой (ДС). Так, например, изменение начальной частоты спектра спиновых волн, возникающее с изменением внешнего магнитного поля  $H_0$ , можно измерить путем слежения за изменением по частоте постоянного значения фазы, соответствующего волновым числам  $k \sim 0$ . Аналогичным образом, изменяя магнитное поле  $H_0$  (и сохраняя фиксированным расстояние между преобразователями), можно следить за изменением по частоте любого другого постоянного значения фазы, соответствующего другому постоянному значению  $k$  и получить «эквивалентные» зависимости  $f_k(H_0)$ . Если затем для какого-нибудь фиксированного значения внешнего магнитного поля измерить все волновые числа, то, используя эквивалентные зависимости  $f_k(H_0)$ , можно построить дисперсионные зависимости спиновой волны в пленке с ДС сразу для любого фиксированного значения поля  $H_0$  (лежащего в интервале измерения эквивалентных зависимостей). С помощью этого метода были измерены эквивалентные и дисперсионные характеристики спиновых волн в пленках с ДС (рис. 8).

Кроме того, было обнаружено, что сами ферритовые пленки чистого ЖИГ можно условно разделить на два типа, различающихся в ненасыщенном состоянии как параметрами, поведением и фазовыми переходами ДС, так и характеристиками спиновых волн, распространяющихся в пленках. Пленки первого типа имеют высококонтрастную ДС, а пленки второго типа — слабоконтрастную [31], причем в пленках второго типа параметры ДС и характеристики волн изменяются гистерезисным образом при циклическом изменении величины приложенного поля  $H_0$  примерно

феррит – высокотемпературный сверхпроводник (Ф-ВТСП, F-HTSC) и феррит – решетка металлических полосок (Ф-РМП, F-MBL) [25–30] (см. рис. 7).

В частности, в результате экспериментов по измерению дисперсионной зависимости для первой и последней структур было обнаружено, что описание поверхностной спиновой волны (ПСВ, SSW) в магнитостатическом приближении приводит к неверному распределению волны по толщине ферритовой пленки. Как выяснилось, при описании волны в магнитостатическом приближении ее магнитостатический потенциал имеет максимум на металлизированной поверхности пленки, тогда как в действительности это неверно: реальная ПСВ имеет касательную плоскости пленки (и, следовательно, металлической плоскости) компоненту СВЧ электрического поля, которая на металле должна быть равна нулю. Поэтому в действительности энергия ПСВ в структуре феррит – металл локализуется у противоположной (не металлизированной) поверхности ферритовой пленки, что подтвердили и теоретические расчеты [29, 30].

Кроме того, слежение за изменением фазы спиновой волны оказалось весьма эффективным при исследовании характеристик спиновых волн в пленках с доменной

от 0 до насыщающего значения  $H_{\text{sat}}$  [32, 33], а в пленках первого типа гистерезисное изменение характеристик волн и параметров ДС не наблюдается [34, 35].

Как выяснилось, для решения некоторых фундаментальных вопросов в ферритовой пленке может потребоваться возбудить одновременно два волновых пучка. Так с помощью пересекающихся неколлинеарных волновых пучков ПСВ был выяснен механизм возникновения ее параметрической неустойчивости. Долгое время было неясно, начинаются ли нелинейные процессы при возбуждении ПСВ непосредственно в зоне расположения возбуждающего преобразователя (и значит, в качестве накачки выступает электромагнитное поле, сконцентрированное вблизи преобразователя), либо параметрическая неустойчивость возникает уже в самой ПСВ после ее возбуждения из-за слишком большой мощности волны. Чтобы однозначно ответить на этот вопрос, необходимо было разделить процессы возбуждения ПСВ и ее параметрического распада во времени и в пространстве. Осуществить это можно, возбудив ПСВ в ферритовой пленке в заведомо линейном режиме, а затем каким-нибудь образом повысить плотность энергии волны. Если на практике реализуется первый из описанных выше механизмов, процессы распада вообще не возникнут; если же реализуется второй механизм, то при определенных условиях в эксперименте можно будет наблюдать возникновение запороговых явлений, начиная с определенного сечения волнового пучка, в котором плотность энергии ПСВ превысит пороговое значение; причем в сечениях, лежащих ближе к возбуждающему преобразователю, запороговые явления наблюдаться не будут. Для ответа на поставленный вопрос был выполнен следующий эксперимент: в ферритовой пленке возбудили два неколлинеарных волновых пучка так, чтобы их траектории пересекались, и чтобы на преобразователе, возбуждающие пучки, поступала мощность, чуть меньше пороговой. Длина траекторий волновых пучков была подобрана так, чтобы оба пучка, достигнув точки пересечения, растратили бы на диссипацию меньше половины своей мощности (в противном случае реализовать нелинейный режим в точке пересечения пучков не удалось бы). Возникновение нелинейного режима в точке пересечения волновых пучков (и его отсутствие на участках траекторий пучков, расположенных до точки пересечения), наблюдавшееся в данном эксперименте [36], подтвердило, что на практике реализуется второй из перечисленных механизмов возникновения параметрической неустойчивости ПСВ.

Отметим, что в настоящее время эксперименты по измерению характеристик спиновых волн часто проводятся методом бриллюэновского рассеяния света на спиновых волнах [37, 38], который хотя и имеет более высокую разрешающую способность по сравнению с методом зондирования, но уступает последнему на 1–2 порядка по площади поверхности пленки, на которой можно выполнить измерения. В то же время описанные выше методы, такие как пространствен-

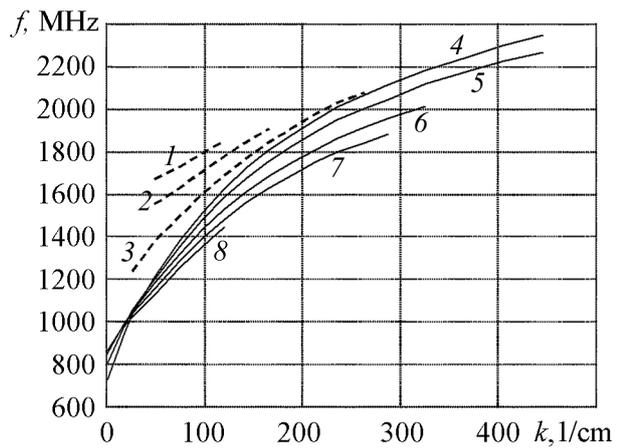


Рис. 8. Гистерезисное изменение дисперсионных зависимостей  $f(k)$  ПСВ при намагничивании пленки ЖИГ вдоль одной из проекций осей [111] на плоскость пленки. Штриховые кривые получены при увеличении поля  $H_0$  приблизительно от 0 до насыщающего значения  $H_{\text{sat}}$ , а сплошные кривые — при уменьшении поля  $H_0$  от насыщающего значения примерно до 0. Кривые измерены при следующих значениях магнитного поля  $H_0$  (Э): 4.7 (1 и 7); 11 (2 и 6), 21.7 (3 и 5);  $H_0 = H_{\text{sat}} = 33.5$  (4); 2.5 (8)

Fig. 8. Hysteresis change of the dispersion dependences  $f(k)$  of the SSW when the YIG film is magnetized along one of the projections of the axes [111] on the film plane. The dashed curves were obtained when the  $H_0$  field increased from  $\sim 0$  to the saturating  $H_{\text{sat}}$  value, and the solid curves were obtained when the  $H_0$  field decreased from the saturating  $H_{\text{sat}}$  value to  $\sim 0$ . The curves were measured at the following  $H_0$  magnetic field values (Oe): 4.7 (1 and 7); 11 (2 and 6), 21.7 (3 and 5);  $H_0 = H_{\text{sat}} = 33.5$  (4); 2.5 (8)

ный фурье-анализ и метод измерения фазовых сдвигов могут вполне применяться и вместе с методом бриллюэновского рассеяния света при экспериментальном измерении характеристик спиновых волн.

Таким образом, в данной работе рассмотрены экспериментальные методы исследования характеристик спиновых, такие как метод зондирования, метод измерения фазовых сдвигов, метод измерения эквивалентных зависимостей и использование фурье-анализа комплексного коэффициента передачи для определения пространственного спектра спиновых волн. Обсуждаются условия использования перечисленных методов, а также полученные с помощью этих методов результаты.

## 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 // Успехи физических наук. 2015. Т. 185, № 10. С. 1099–1128. DOI: 10.3367/UFN.0185.201510m.1099.
2. Chumak A. V., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B. Magnon spintronics // Nature Physics. 2015. Vol. 11, no. 6. P. 453–461. DOI: 10.1038/nphys3347.
3. Wang X. S., Zhang H. W., Wang X. R. Topological magnonics: A paradigm for spin-wave manipulation and device design // Phys. Rev. Appl. 2018. Vol. 9, no. 2. P. 024029. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.024029.
4. Pirro P., Vasyuchka V. I., Serga A. A., Hillebrands B. Advances in coherent magnonics // Nat. Rev. Mater. 2021. Vol. 6, no. 12. P. 1114–1135. DOI: 10.1038/s41578-021-00332-w.
5. 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., 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 // Journal of Physics: Condensed Matter. 2021. Vol. 33, no. 41. P. 413001. DOI: 10.1088/1361-648x/abc1a.
6. Chumak A., Kabos P., Wu M., Abert C., Adelman C., Adeyeye A., Åkerman 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., Golovchanskiy I. A., Gonzalez-Ballester 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., Kläui 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., Lindner M., Macêdo 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., Riente 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., Urbánek 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. Roadmap

- on spin-wave computing // IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58, no. 6. P. 0800172. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664.
7. *Damon R. W., Eshbach J. R.* Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // J. Phys. Chem. Solids. 1961. Vol. 19, no. 3–4. P. 308–320. DOI: 10.1016/0022-3697(61)90041-5.
  8. *Данилов В. В., Зависляк И. В., Балинский М. Г.* Спинволновая электродинамика. Киев: Либідь, 1991. 211 с.
  9. *Вашковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1993. 312 с.
  10. *Гуревич А. Г., Мелков Г. А.* Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 464 с.
  11. *Kalinikos B. A.* Dipole-exchange spin-wave spectrum of magnetic films // In: Cottam M. G. (ed) Linear and Nonlinear Spin Waves in Magnetic Films and Superlattices. Singapore: World Scientific, 1994. P. 89–156.
  12. *Гуляев Ю. В., Никитов С. А.* Брэгговское отражение ПМСВ от периодического участка поверхности феррита при наклонном падении волны // Физика твердого тела. 1982. Т. 23, № 12. С. 3678–3679.
  13. *Вашковский А. В., Гречушкин К. В., Стальмахов А. В.* Пространственно-частотные зависимости потока энергии поверхностной магнитостатической волны // Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30, № 12. С. 2422–2428.
  14. *Вашковский А. В., Шахназарян Д. Г.* Отражение поверхностной магнитостатической волны от края магнитной пленки // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32, № 4. С. 719–723.
  15. *Вашковский А. В., Зубков В. И., Локк Э. Г., Щеглов В. И.* Влияние неоднородности постоянного магнитного поля на траектории поверхностных магнитостатических волн // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15, № 4. С. 1–4.
  16. *Анненков А. Ю., Герус С. В.* Исследование распределения поверхностных магнитостатических волн путем сканирования поверхности ферритовой пластины // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 5. С. 572–577.
  17. *Анненков А. Ю., Виноградов А. П., Герус С. В., Рыжиков И. А., Шишков С. А.* Исследование магнитостатических волн в фотонных кристаллах // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71, № 11. С. 1612–1613.
  18. *Герус С. В.* Магнитостатические волны в пространственно-периодических и двумерно-неоднородных магнитных полях: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.11. М.: ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2010. 317 с.
  19. *Анненков А. Ю., Герус С. В., Ковалев С. И.* Трансформация поверхностных магнитостатических волн, канализируемых ступенчатым полем подмагничивания // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, № 6. С. 85–89.
  20. *Локк Э. Г.* Угловая ширина луча при дифракции на щели волны с неколлинеарными групповой и фазовой скоростями // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, № 12. С. 1327–1343. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201212e.1327.
  21. *Локк Э. Г.* Угловая ширина волнового пучка обратной спиновой волны, возбуждаемой линейным преобразователем в ферритовой пластине // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 1. С. 102–106. DOI: 10.7868/S0033849415010106.
  22. *Annenkov A. Y., Gerus S. V., Lock E. H.* Superdirectional beam of surface spin wave // Europhysics Letters. 2018. Vol. 123, no. 4. P. 44003. DOI: 10.1209/0295-5075/123/44003.
  23. *Annenkov A. Y., Gerus S. V., Lock E. H.* Superdirected beam of the backward volume spin wave // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 185. P. 02006. DOI: 10.1051/epjconf/201818502006.
  24. *Герус С. В., Локк Э. Г., Анненков А. Ю.* Влияние однородности магнитного поля, намагничивающего ферритовую пленку, на точность измерения характеристик спиновых волн // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 12. С. 1216–1223. DOI: 10.31857/S0033849421120081.

25. Локк Э. Г. Дисперсия магнитостатических волн в композитной структуре феррит-решетка металлических полосок // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 12. С. 1484–1494.
26. Зубков В. И., Локк Э. Г., Щеглов В. И. Прохождение поверхностных магнитостатических волн под металлической полосой, расположенной над поверхностью ферритовой пленки // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34, № 7. С. 1381–1384.
27. Ваишковский А. В., Зубков В. И., Лебедь Б. М., Локк Э. Г., Щеглов В. И., Яковлев С. В. Дисперсия поверхностных магнитостатических волн в слоистой структуре феррит–высокотемпературный сверхпроводник // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17, № 9. С. 67–70.
28. Ваишковский А. В., Зубков В. И., Локк Э. Г. Распространение магнитостатических волн в структуре феррит–ВТСП при наличии транспортного тока в сверхпроводнике // Физика твердого тела. 1997. Т. 39, № 12. С. 2195–2202.
29. Локк Э. Г. Распространение поверхностных магнитостатических волн в композитной структуре феррит-решетка металлических полосок // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50, № 1. С. 74–81.
30. Ваишковский А. В., Локк Э. Г. О взаимосвязи энергетических и дисперсионных характеристик магнитостатических волн в ферритовых структурах // Успехи физических наук. 2011 Т. 181, № 3. С. 293–304. DOI: 10.3367/UFNr.0181.201103c.0293.
31. Ваишковский А. В., Локк Э. Г., Щеглов В. И. Влияние наведенной одноосной анизотропии на доменную структуру и фазовые переходы пленок железиттриевого граната // Физика твердого тела. 1999. Т. 41, № 11. С. 2034–2041.
32. Ваишковский А. В., Локк Э. Г., Щеглов В. И. Распространение безобменных спиновых волн в ферритовых пленках с доменной структурой // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63, № 7. С. 544–548.
33. Ваишковский А. В., Локк Э. Г., Щеглов В. И. Распространение магнитостатических волн в ненасыщенных ферритовых пленках с полосовой доменной структурой // ЖЭТФ. 1997. Т. 111, № 3. С. 1016–1031.
34. Ваишковский А. В., Локк Э. Г., Щеглов В. И. Безобменные спиновые волны в пленках железиттриевого граната с полосовыми доменами, намагниченность внутри которых ориентирована вблизи плоскости пленки // Микроэлектроника. 1998. Т. 27, № 5. С. 393–395.
35. Ваишковский А. В., Локк Э. Г., Щеглов В. И. Гистерезис характеристик магнитостатических волн в ферритовых пленках с полосовыми доменами, векторы намагниченности которых ориентированы вблизи плоскости пленки // ЖЭТФ. 1998. Т. 114, № 10. С. 1430–1450.
36. Ваишковский А. В., Локк Э. Г. Наблюдение параметрической неустойчивости поверхностной магнитостатической волны // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60, № 7. С. 545–548.
37. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D. Magnonics // Journal of Physics D: Applied Physics. 2010. Vol. 43, no. 26. P. 264001. DOI: 10.1088/0022-3727/43/26/264001.
38. Sadovnikov A. V., Odintsov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E., Sharaevskii Y. P., Nikitov S. A. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes // Phys. Rev. B. 2017. Vol. 96, no. 14. P. 144428. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.144428.

## References

1. Nikitov SA, Kalyabin DV, Lisenkov IV, Slavin AN, Barabanenkov YN, Osokin SA, Sadovnikov AV, Beginin EN, Morozova MA, Sharaevsky YP, Filimonov YA, Khivintsev YV, Vysotsky SL, Sakharov VK, Pavlov ES. Magnonics: a new research area in spintronics and spin wave electronics. *Physics-Uspekhi*. 2015;58(10):1002–1028. DOI: 10.3367/UFNe.0185.201510m.1099.
2. Chumak AV, Vasyuchka VI, Serga AA, Hillebrands B. Magnon spintronics. *Nature Physics*. 2015;11(6):453–461. DOI: 10.1038/nphys3347.
3. Wang XS, Zhang HW, Wang XR. Topological magnonics: A paradigm for spin-wave manipulation and device design. *Phys. Rev. Appl.* 2018;9(2):024029. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.024029.

4. Pirro P, Vasyuchka VI, Serga AA, Hillebrands B. Advances in coherent magnonics. *Nat. Rev. Mater.* 2021;6(12):1114–1135. DOI: 10.1038/s41578-021-00332-w.
5. Barman A, Gubbiotti G, Ladak S, Adeyeye AO, Krawczyk M, Gräfe J, Adelman C, Cotofana S, Naeemi A, Vasyuchka VI, Hillebrands B, Nikitov SA, Yu H, Grundler D, Sadovnikov AV, Grachev AA, Sheshukova SE, Duquesne JY, Marangolo M, Csaba G, Porod W, Demidov VE, Urazhdin S, Demokritov SO, Albisetti E, Petti D, Bertacco R, Schultheiss H, Kruglyak VV, Poimanov VD, Sahoo S, Sinha J, Yang H, Münzenberg M, Moriyama T, Mizukami S, Landeros P, Gallardo RA, Carlotti G, Kim JV, Stamps RL, Camley RE, Rana B, Otani Y, Yu W, Yu T, Bauer GEW, Back C, Uhrig GS, Dobrovolskiy OV, Budinska B, Qin H, van Dijken S, Chumak AV, Khitun A, Nikonov DE, Young IA, Zingsem BW, Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap. *Journal of Physics: Condensed Matter.* 2021;33(41):413001. DOI: 10.1088/1361-648x/abec1a.
6. Chumak A, Kabos P, Wu M, Abert C, Adelman C, Adeyeye A, Åkerman 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, Bunyayev SA, Carmiggelt JJ, Cheenikundil RR, Ciubotaru F, Cotofana S, Csaba G, Dobrovolskiy OV, Dubs C, Elyasi M, Fripp KG, Fulara H, Golovchanskiy IA, Gonzalez-Ballester C, Graczyk P, Grundler D, Gruszecki P, Gubbiotti G, Guslienko 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, Kläui M, Klein O, Kloss JW, Knauer S, Koraltan S, Kostylev M, Krawczyk M, Krivorotov IN, Kruglyak VV, Lachance-Quirion D, Ladak S, Lebrun R, Li Y, Lindner M, Macêdo R, Mayr S, Melkov GA, Mieszczyk 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, Riente 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, Urbánek M, Usami K, Ustinov AB, van der Sar T, van Dijken S, Vasyuchka VI, Verba R, Viola Kusminskiy S, Wang Q, Weides M, Weiler M, Wintz S, Wolski SP, Zhang X. Roadmap on spin-wave computing. *IEEE Transactions on Magnetics.* 2022;58(6):0800172. 10.1109/TMAG.2022.3149664.
7. Damon RW, Eshbach JR. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids.* 1961;19(3–4):308–320. DOI: 10.1016/0022-3697(61)90041-5.
8. Danilov VV, Zavislyak IV, Balinsky MG. *Spinwave Electrodynamics.* Kiev: Libid; 1991. 211 p. (in Russian).
9. Vashkovskii AV, Stalmakhov VS, Sharaevskii YP. *Magnetostatic Waves in Ultrahigh Frequency Electronics.* Saratov: Saratov State University Publishing; 1993. 312 p. (in Russian).
10. Gurevich AG, Melkov GA. *Magnetization Oscillations and Waves.* Boca Raton: CRC Press; 1996. 464 p.
11. Kalinikos BA. Dipole-exchange spin-wave spectrum of magnetic films. In: Cottam MG, editor. *Linear and Nonlinear Spin Waves in Magnetic Films and Superlattices.* Singapore: World Scientific; 1994. P. 89–156.
12. Gulyaev YV, Nikitov SA. A Bragg reflection of MSSW from periodic ferrite surface area at oblique wave incidence. *Soviet Physics, Solid State.* 1982;23(12):3678–3679 (in Russian).
13. Vashkovskii AV, Grechushkin KV, Stalmakhov AV. Spatial-frequency dependences of surface magnetostatic wave energy flux. *Sov. J. Commun. Technol. Electron.* 1985;30(12):2422–2428 (in Russian).
14. Vashkovskii AV, Shahnazaryan DG. Surface magnetostatic wave reflection from film edge. *Sov. J. Commun. Technol. Electron.* 1987;32(4):719–723 (in Russian).
15. Vashkovskii AV, Zubkov VI, Lokk EG, Shcheglov VI. Effect of inhomogeneity of the permanent magnetic field on surface magnetostatic wave trajectories. *Tech. Phys. Lett.* 1989;15(4):1–4 (in Russian).

16. Annenkov AY, Gerus SV. Analysis of the distribution of magnetostatic surface waves by scanning the surface of a ferrite slab. *J. Commun. Technol. Electron.* 2012;57(5):519–524. DOI: 10.1134/S1064226912050014.
17. Annenkov AY, Vinogradov AP, Gerus SV, Ryzhikov IA, Shishkov SA, Inoue M. Investigation of magnetostatic waves in photonic crystals. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2007;71(11):1569–1570. DOI: 10.3103/S1062873807110299.
18. Gerus SV. Magnetostatic waves in spatially periodic and two-dimensional inhomogeneous magnetic fields. Dissertation for the degree of Doctor of Sciences in Physical and Mathematical Sciences. Moscow: Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino branch), Russian Academy of Sciences; 2010. 317 p. (in Russian).
19. Annenkov AY, Gerus SV, Kovalev SI. Transformation of surface magnetostatic waves channeled by a step bias field. *Tech. Phys.* 2002;47(6):737–741. DOI: 10.1134/1.1486198.
20. Lock EH. Angular beam width of a slit-diffracted wave with noncollinear group and phase velocities. *Physics-Uspexhi.* 2012;55(12):1239–1254. DOI: 10.3367/UFNe.0182.201212e.1327.
21. Lokk EG. The angular width of the wave beam of a backward spin wave excited by a linear transducer in a ferrite plate. *J. Commun. Technol. Electron.* 2015;60(1):97–101. DOI: 10.1134/S1064226915010106.
22. Annenkov AY, Gerus SV, Lock EH. Superdirectional beam of surface spin wave. *Europhysics Letters.* 2018;123(4):44003. DOI: 10.1209/0295-5075/123/44003.
23. Annenkov AY, Gerus SV, Lock EH. Superdirected beam of the backward volume spin wave. *EPJ Web of Conferences.* 2018;185:02006. DOI: 10.1051/epjconf/201818502006.
24. Gerus SV, Lock EH, Annenkov AY. Effect of nonuniform magnetic field that magnetizes a ferrite film on the measurement accuracy for characteristics of spin waves. *J. Commun. Technol. Electron.* 2021;66(12):1378–1384. DOI: 10.1134/S1064226921120081.
25. Lock EH. Magnetostatic wave dispersion in a ferrite-metal-strip grating structure. *J. Commun. Technol. Electron.* 2003;48(12):1369–1378.
26. Zubkov VI, Lokk EG, Shcheglov VI. Surface magnetostatic wave propagation under a metal bar placed over the surface of a ferrite film. *Sov. J. Commun. Technol. Electron.* 1989;34(7):1381–1384 (in Russian).
27. Vashkovskii AV, Zubkov VI, Lebed BM, Lokk EG, Shcheglov VI, Yakovlev SV. Dispersion of surface magnetostatic waves in layered structure ferrite-high-temperature superconductor. *Tech. Phys. Lett.* 1991;17(9):67–70 (in Russian).
28. Vashkovskii AV, Zubkov VI, Lokk EG. Propagation of magnetostatic waves in a ferrite plus high-T<sub>c</sub> superconductor structure in the presence of transport current in the superconductor. *Physics of the Solid State.* 1997;39(12):1961–1967. DOI: 10.1134/1.1130209.
29. Lokk EG. Propagation of magnetostatic surface waves in a composite structure composed of a ferrite and a grating of metal strips. *J. Commun. Technol. Electron.* 2005;50(1):67–74.
30. Vashkovskiy AV, Lock EH. On the relationship between magnetostatic wave energy and dispersion characteristics in ferrite structures. *Physics-Uspexhi.* 2011;54(3):281–290. DOI: 10.3367/UFNe.0181.201103c.0293.
31. Vashkovskii AV, Lokk EG, Shcheglov VI. Influence of induced uniaxial anisotropy on the domain structure and phase transitions of yttrium-iron garnet films. *Physics of the Solid State.* 1999;41(11):1868–1874. DOI: 10.1134/1.1131115.
32. Vashkovskii AV, Lokk EG, Shcheglov VI. Propagation of zero-exchange spin waves in ferrite films with domain structure. *JETP Lett.* 1996;63(7):572–577. DOI: 10.1134/1.567066.
33. Vashkovskii AV, Lokk EG, Shcheglov VI. Propagation of magnetostatic waves in unsaturated ferrite films with a strip domain structure. *J. Exp. Theor. Phys.* 1997;84(3):560–568. DOI: 10.1134/1.558176.

34. Vashkovskii AV, Lokk EG, Shcheglov VI. Unexchangeable spin waves in iron yttrium garnet films with stripe domains having magnetisation within them oriented near the film plane. *Microelectronics*. 1998;27(5):393–395 (in Russian).
35. Vashkovskii AV, Lokk EG, Shcheglov VI. Hysteresis of the characteristics of magnetostatic waves in ferrite films with stripe domains whose magnetization vectors are oriented close to the plane of the film. *J. Exp. Theor. Phys.* 1998;87(4):776–787. DOI: 10.1134/1.558721.
36. Vashkovskii AV, Lokk EG. Observation of a parametric instability of a surface magnetostatic waves. *JETP Lett.* 1994;60(7):561–564.
37. Kruglyak VV, Demokritov SO, Grundler D. Magnonics. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010;43(26):264001. DOI: 10.1088/0022-3727/43/26/264001.
38. Sadovnikov AV, Odintsov SA, Beginin EN, Sheshukova SE, Sharaevskii YP, Nikitov SA. Toward nonlinear magnonics: Intensity-dependent spin-wave switching in insulating side-coupled magnetic stripes. *Phys. Rev. B*. 2017;96(14):144428. DOI: 10.1103/PhysRevB.96.144428.



*Герус Сергей Валерианович* — родился в Москве (1947). Окончил МФТИ (1971) и аспирантуру МФТИ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1974) и доктора физико-математических наук (по специальности «Физика магнитных явлений», 2010). С 1974 года работает в ФИРЭ РАН, в настоящее время в должности ведущего научного сотрудника. Имеет более 200 научных трудов.

Россия, Московская область, 141195 Фрязино, пл. Введенского, 1  
 Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
 им. В. А. Котельникова РАН  
 E-mail: sgerus@yandex.ru  
 ORCID: 0000-0002-1611-6484  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 26995

*Локк Эдвин Гарривич* — родился в г. Ханларе (ранее — Еленендорф, ныне Гей-Гёль) Азербайджанской ССР (1961). Окончил Московский энергетический институт (1984) и поступил на работу в ИРЭ АН СССР, где защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1992, Фрязино) и доктора физико-математических наук (2008, Москва) по специальности «Физика магнитных явлений». Работает в должности главного научного сотрудника. С 2002 года по настоящее время руководит лабораторией по исследованию СВЧ свойств ферромагнетиков ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Научные интересы: спиновые волны, ферритовые структуры и метаматериалы, а также физические явления и эффекты, возникающие с участием спиновых волн. Имеет около 290 публикаций, в том числе 91 статью и 4 изобретения.



Россия, Московская область, 141195 Фрязино, пл. Введенского, 1  
 Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
 им. В. А. Котельникова РАН  
 E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru  
 ORCID: 0000-0003-0635-7687  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 26997