

УДК 537.624:537.632

ДИФРАКЦИЯ ОБРАТНОЙ ОБЪЕМНОЙ СПИНОВОЙ ВОЛНЫ НА СКВОЗНОМ ОТВЕРСТИИ В ФЕРРИТОВОЙ ПЛАСТИНЕ

© 2022 г. С. В. Герус¹, *, Э. Г. Локк¹, А. Ю. Анненков¹, А. Б. Хутиева², А. В. Садовников²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук”,
Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”,
Саратов, Россия

*E-mail: svg318@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 30.06.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 22.07.2022 г.

Экспериментально и теоретически исследована дифракция обратной объемной спиновой волны на сквозном отверстии в ферритовой пластине для случая, когда длина спиновой волны больше диаметра отверстия, а линейный преобразователь, возбуждающий волну, перпендикулярен внешнему однородному магнитному полю. Установлено, что в одном из направлений, в которых возможно сверхнаправленное распространение этой волны, возникает отчетливая тень от отверстия, наблюдаемая на значительном расстоянии от него. Получено хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими результатами.

DOI: 10.31857/S0367676522110126

Как известно, касательно намагниченная ферритовая пленка является одной из немногих реальных сред, в которой может распространяться дипольная спиновая волна (СВ) с обратным характером – обратная объемная спиновая волна (ООСВ), которую в литературе часто называют обратной объемной магнитостатической волной в соответствии с работой [1], где она впервые была описана в магнитостатическом приближении. За прошедшие годы основные характеристики ООСВ и различные устройства, использующие эти волны, описаны в ряде монографий (см. [2–4] и приведенные в этих работах списки литературы), а также в ряде сравнительно недавних статей [5–13], в которых получены новые результаты, касающиеся ООСВ. Отметим, что вплоть до начала 21-го века исследователей интересовали в основном дисперсионная зависимость ООСВ, амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи и время задержки ООСВ между двумя перпендикулярными внешнему магнитному полю \vec{H}_0 преобразователями¹, что было необходимо для создания различных фильтров, линий

задержки и других устройств аналоговой обработки сигналов на СВЧ.

Однако исследованиям дифракционных свойств ООСВ были посвящены лишь редкие работы [10, 14, 15]. Развивая эти исследования, ниже впервые представлены эксперименты по дифракции ООСВ на сквозном отверстии в ферритовой пленке железиттриевого граната (ЖИГ), имевшей толщину $s = 16.56$ мкм и намагниченность насыщения $4\pi M_0 = 1853$ Гс. В экспериментах визуализированные картины распределения энергии ООСВ в интервале частот 2845–2867 МГц² измерялись методом зондирования для области пленки ЖИГ, расположенной вокруг отверстия.

О геометрии эксперимента можно судить по рис. 1а, где представлена одна из полученных дифракционных картин, описывающая распределение амплитуды ООСВ с частотой $f_1 = 2864$ МГц в плоскости пленки ЖИГ. Линейный преобразователь I , возбуждающий ООСВ, имел длину $D = 5$ мм и был ориентирован перпендикулярно вектору внешнего магнитного поля \vec{H}_0 (параллельно

¹ Включая случаи, когда использовались преобразователи различной формы или между ними помещались различные неоднородности – решетка проводящих полосок, вытравленные канавки и т.п.

² Отметим, что в использованной пленке ЖИГ, в которой были изготовлены отверстия, ООСВ возбуждались не так эффективно, как поверхностные СВ, поэтому эксперименты удалось выполнить лишь для начального участка спектра ООСВ.

оси y), а центр сквозного отверстия 2, имевшего диаметр $d = 1$ мм, был расположен на расстоянии 3 мм от середины преобразователя вдоль оси z (рис. 1а). Для приема ООСВ использовался СВЧ зонд, представляющий собой петельку из тонкой позолоченной вольфрамовой проволоки и имеющий апертуру ~ 0.5 мм. Зонд был оснащен датчиком положения и мог свободно перемещаться вдоль поверхности пленки ЖИГ (подробнее метод зондирования описан в [16, 17]).

Измерение характеристик ООСВ производилось следующим образом: для ряда фиксированных координат y осуществлялось непрерывное перемещение зонда по поверхности пленки вдоль оси z с одновременной оцифровкой мгновенных значений координаты z и комплексной амплитуды СВЧ коэффициента передачи между преобразователями [16]. Поскольку именно ООСВ переносит СВЧ сигнал в ферритовой пленке, то, фактически, зонд измеряет комплексную амплитуду ООСВ во время своего перемещения. В результате обработки экспериментальных данных на компьютере можно было получить визуализированные картины по распределению амплитуды или фазы исследуемой ООСВ в области ее распространения на фиксированной частоте.

Фурье анализ полученного распределения комплексной амплитуды ООСВ дал возможность построить экспериментальную дисперсионную зависимость первой моды ООСВ $f(k_z)$ (см. рис. 2а). Аппроксимируя экспериментальную зависимость $f(k_z)$ теоретической, было уточнено значение внешнего однородного магнитного поля H_0 , которое оказалось равно 455 Э.

Для найденной величины H_0 и известных параметров пленки была рассчитана дифракционная картина, соответствующая экспериментальной картине на рис. 1а. Рассчитанная дифракционная картина, выполненная на базе пакета программ MUMAX3 с помощью методики микромагнитного моделирования, показана на рис. 1б. Представленное на рис. 1б распределение амплитуды (интенсивности) ООСВ в плоскости ферритовой пленки рассчитано методом конечных разностей на основе уравнения Ландау–Лифшица, которое содержит диссипативный член, записанный в предложенной Гильбертом форме, причем при расчетах параметр диссипации был выбран равным 10^{-5} .

Кроме того, для объяснения полученных результатов была рассчитана изочастотная зависимость ООСВ с частотой $f_1 = 2864$ МГц, показанная на рис. 2б. Голубым цветом на этой зависимости отмечены точки, которым соответствуют сверхнаправленные волны ($\sigma = 0$), а для одной из таких точек показаны волновой вектор и вектор групповой скорости \vec{k}_{s1} и \vec{V}_{s1} (отметим, что на изочастотной зависимости ООСВ на самом деле существует не четыре, а восемь точек, которым соответствуют сверхнаправленные волны с $\sigma = 0$:

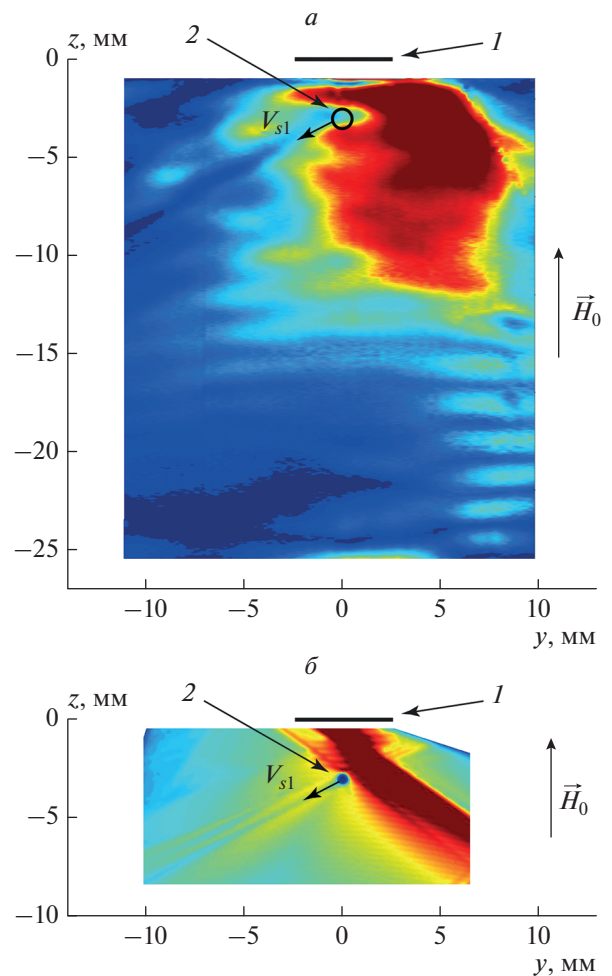


Рис. 1. Экспериментальное (а) и рассчитанное (б) распределения амплитуды ООСВ в плоскости ферритовой пленки при дифракции волны с частотой $f_1 = 2864$ МГц на сквозном отверстии в ферритовой пластине. Показаны возбуждающий линейный преобразователь (1), отверстие (2) и рассчитанный вектор групповой скорости ООСВ \vec{V}_{s1} , в направлении которого наблюдается тень от отверстия.

еще четыре точки соответствуют волновым векторам, ориентированным под углами $\approx \pm 60^\circ$ и $\pm 120^\circ$ и на рис. 2б не показаны). Также в соответствии с теорией [8, 18] были рассчитаны зависимость угла ψ , под которым ориентирован вектор групповой скорости ООСВ \vec{V} , от угла ϕ , задающего ориентацию волнового вектора ООСВ \vec{k} (рис. 3а) и зависимость относительной угловой ширины³ дифракционного луча σ от угла ϕ (рис. 3б).

³ Относительная угловая ширина луча σ показывает, во сколько раз абсолютная угловая ширина луча в анизотропной среде больше или меньше, чем ширина аналогичного луча (с таким же отношением λ_0/D) в изотропной среде (подробнее о величине σ см. [8, 18]).

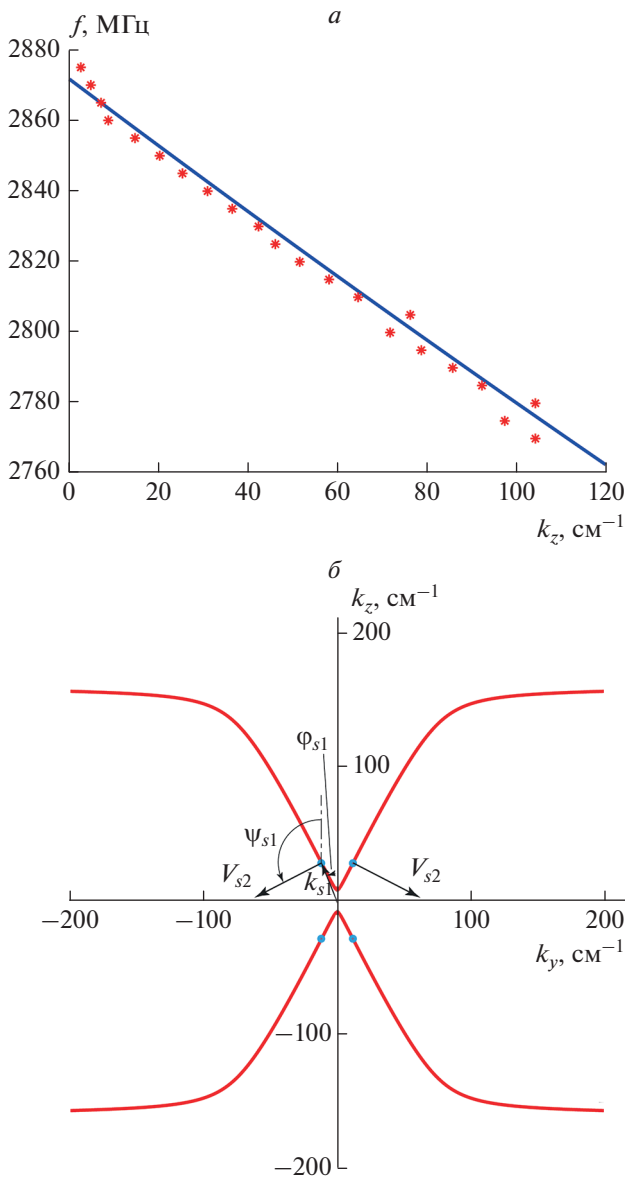


Рис. 2. Дисперсионная зависимость ООСВ вдоль оси z , параллельной вектору \vec{H}_0 (а), и изочастотная зависимость ООСВ с частотой $f_1 = 2864$ МГц (б). На изочастотной зависимости отмечены точки перегиба и показаны векторы групповой скорости \vec{V}_{s1} и \vec{V}_{s2} , которым соответствуют значения $\sigma = 0$ и вдоль которых может возникать сверхнаправленное распространение луча ООСВ. Отмечены также ориентации ϕ_{s1} и ψ_{s1} векторов \vec{k}_{s1} и \vec{V}_{s1} .

Опишем теперь подробно на примере ООСВ с частотой $f_1 = 2864$ МГц, как происходит возбуждение, распространение и дифракция волнового пучка (см. рис. 1).

Очевидно, что показанные на рис. 1а картины можно считать интерференцией двух дифракционных картин: дифракционной картины, возникающей

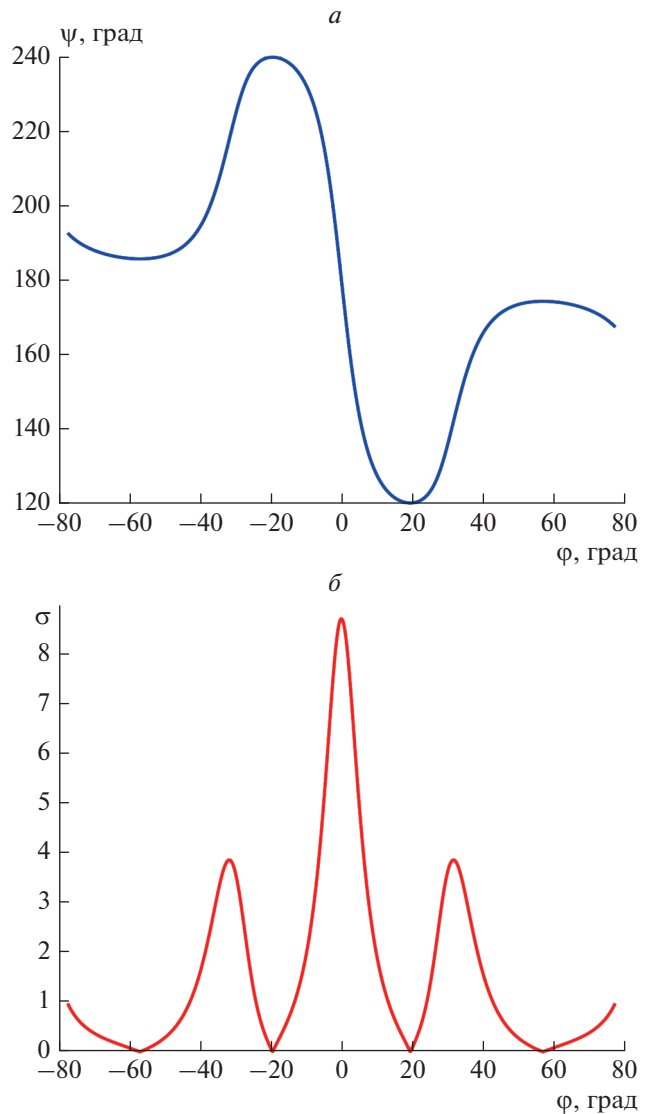


Рис. 3. Зависимость ориентации ψ вектора групповой скорости \vec{V} (а) и зависимость относительной угловой ширины луча σ (б) от угла ϕ , задающего ориентацию волнового вектора \vec{k} , для ООСВ с частотой $f_1 = 2864$ МГц.

щей из-за ограниченности возбуждаемого волнового пучка по ширине, и картины, возникающей в результате дифракции этого волнового пучка на отверстии. Рассмотрим вначале особенности дифракции, связанные с первой из упомянутых картин.

Основная часть СВЧ энергии, поступающая на преобразователь, расходуется на возбуждение ООСВ с волновыми векторами \vec{k} , близкими по ориентации к вектору \vec{k}_0 (направленному под углом $\phi_0 = 0$ и имеющему величину $k_0 = 8.36 \text{ cm}^{-1}$) и групповыми скоростями \vec{V} , близкими по ориентации к вектору \vec{V}_0 (направленному под углом $\psi_0 = 180^\circ$). Поскольку для волн с такими \vec{k} величина

σ , определяющая дифракционную расходимость, принимает очень большие значения $\sigma \sim 10 \gg 1$ (см. рис. 3б), и поскольку длина ООСВ $\lambda(\varphi \sim 0) \sim 7.5$ мм сравнима с длиной преобразователя $D = 5$ мм, то вся эта энергия волны быстро расплывается по ферритовой пленке и амплитуда волны заметно уменьшается по мере ее распространения (рис. 1). Так как у ООСВ зависимость $\psi(\varphi)$ всегда немонотонная (см. рис. 3а), то сектор расплывания энергии определяют не углы отсечки⁴, а углы сверхнаправленного распространения волны (соответствующие голубым точкам на рис. 2б), которое возникает при ориентации волнового вектора \vec{k} под углами $\varphi_{s1} - \varphi_{s4}$ (для $f_l = 2864$ МГц $\varphi_{s1} = 22.1^\circ$, $\varphi_{s2} = -\varphi_{s1}$, $\varphi_{s3} = 180^\circ - \varphi_{s1}$ и $\varphi_{s4} = -180^\circ + \varphi_{s1}$) и происходит в направлении вектора групповой скорости \vec{V} под углами $\psi_{s1} - \psi_{s4}$ ($\psi_{s1} = 117.29^\circ$, $\psi_{s2} = -\psi_{s1}$, $\psi_{s3} = 180^\circ - \psi_{s1}$ и $\psi_{s4} = -180^\circ + \psi_{s1}$). Это наглядно демонстрирует и рис. 3а, из которого видно, что углы ψ_{s1} и ψ_{s2} , соответствующие углам $\varphi = \pm 22.1^\circ$, гораздо больше по величине, чем углы отсечки $\psi_{отс1}$ и $\psi_{отс2}$, соответствующие углам $\varphi = \pm 85.2^\circ$. Таким образом, если на рис. 1а из правого конца преобразователя провести луч под углом, равным $\psi_{s2} = -117.29^\circ$, а из левого конца преобразователя – луч под углом $\psi_{s1} = 117.29^\circ$, то построенные лучи ограничат область ферритовой пленки, по которой расплывается вся энергия ООСВ.

Теперь следует напомнить, что для данной геометрии в соответствии с работой [12] ООСВ, которым соответствуют положительные ориентации φ и ψ волновых векторов \vec{k} и векторов групповой скорости \vec{V} (такие ориентации будут расположены слева от оси k_z на рис. 2б), локализованы вблизи нижней поверхности ферритовой пленки, граничащей с подложкой, тогда как энергия волн, которым соответствуют отрицательные ориентации φ и ψ векторов \vec{k} и \vec{V} (такие ориентации будут расположены справа от оси k_z на рис. 2б), локализована вблизи свободной (верхней) поверхности ферритовой пленки. Поскольку возбуждающий преобразователь также расположен у свободной поверхности ферритовой пленки, то он эффективнее возбуждает ООСВ, энергия которых локализована у этой поверхности. Кроме того, поскольку зондирование СВ проводится со стороны свободной поверхности пленки, то СВЧ-сигнал от волн, локализованных у этой поверхности, оказывается значительно больше, чем СВЧ-сигнал от волн, локализованных у противоположной поверхности. Отмеченные

выше особенности возбуждения, распространения и приема ООСВ приводят к тому, что экспериментальное и теоретическое распределения амплитуды ООСВ, показанные на рис. 1, выглядят несимметрично: в области пленки, лежащей справа от оси z , амплитуда волн оказывается значительно больше, чем в области пленки, лежащей слева от оси z .

Рассмотрим теперь особенности дифракции волнового пучка на отверстии в ферритовой пластине. Как видно из рис. 1, тень от отверстия практически не возникает ни вдоль оси z , ни в других направлениях, отстоящих от отрицательного направления оси z на $\sim \pm 60^\circ$. Это обусловлено тем, что, во-первых, для ООСВ с $\varphi \sim 0$, бегущих в направлениях $\psi \sim 180^\circ$, длина волны составляет $\lambda \sim 7$ мм, что в ~ 7 раз больше диаметра отверстия $d = 1$ мм, и, во-вторых, этим направлениям соответствует наибольшая величина σ , определяющая дифракционную расходимость (см. рис. 3б).

Дифракция ООСВ, характеризующихся большими ориентациями φ волнового вектора \vec{k} происходит иначе: так, при $\varphi = \varphi_{s1} = 22.1^\circ$ зависимость $\psi(\varphi)$ имеет экстремум (рис. 3а), причем $\psi(\varphi_{s1}) = \psi_{s1} = 117.29^\circ$, а $\sigma(\varphi_{s1}) = 0$ (рис. 3б), что означает отсутствие дифракционной расходимости волнового пучка. В результате, на дифракционной картине за отверстием в направлении вектора \vec{V}_{s1} (ориентированного под углом $\psi_{s1} = 117.29^\circ$) наблюдается отчетливая тень, похожая на отходящую от отверстия “канавку” (см. рис. 1а и 1б), ширина которой равняется диаметру отверстия d и не меняется по мере распространения волны из-за отсутствия дифракционной расходимости в этом направлении (на рис. 1а протяженность этой “канавки” примерно 12 мм). Однако, наиболее удивительным фактом является то, что в данном эксперименте отсутствует аналогичная “канавка” в направлении вектора \vec{V}_{s2} , ориентированного под углом $\psi_{s1} = -117.29^\circ$ (см. рис. 1а). Поскольку отверстие в пленке сквозное, то взаимные свойства ООСВ (то есть, локализация энергии волн, бегущих слева и справа от оси z , у разных поверхностей пленки) не должны были бы влиять на дифракцию волны на отверстии, и мы ожидали наблюдать две отчетливые тени от отверстия (в направлениях векторов \vec{V}_{s1} и \vec{V}_{s2}). Возможно, этот факт помогут объяснить дальнейшие численные расчеты на основе программ, которые могли бы рассчитывать распределение параметров волны в поперечном сечении ферритовой пластины.

Отметим также, что для ООСВ, характеризующихся еще большими ориентациями φ волнового

⁴ Существование углов отсечки у ООСВ недавно доказано в [9, 11], где приведены формулы для их вычисления.

вектора \vec{k} , на зависимости $\psi(\varphi)$ возникает еще один экстремум при $\varphi = 63.2^\circ$, причем, как видно из рис. 3а, $\psi(63.2^\circ) = 178.93^\circ$ и $k(63.2^\circ) = 352.56 \text{ см}^{-1}$, а величина σ снова становится равной нулю (см. рис. 3б), что тоже соответствует сверхнаправленному распространению волнового пучка. Поскольку на рис. 1а мы не видим тени от отверстия в направлении $\sim 180^\circ$, то можно сделать вывод, что ООСВ с $k > \sim 300 \text{ см}^{-1}$ не возбуждались в данном эксперименте. Кроме того, следует отметить, что мы, возможно, могли бы видеть тень от отверстия еще в ряде направлений, которым соответствует сверхнаправленное распространение высших мод ООСВ (ведь у каждой высшей моды ООСВ, как и у первой моды ООСВ, на изочастотной зависимости имеется 8 точек, соответствующих сверхнаправленному распространению волны). Однако из-за того, что высшие моды ООСВ характеризуются большими значениями волнового числа и возбуждаются в ферритовой пленке очень неэффективно, в эксперименте не видно теней от отверстия, возникающих из-за дифракции высших мод ООСВ.

Таким образом, для эксперимента и расчета, представленных на рис. 1, можно сделать следующий вывод: поскольку $k_{s1}(\varphi_{s1} = 22.1^\circ) = 28.19 \text{ см}^{-1}$, что соответствует длине волны $\lambda_{s1} = 2229 \text{ мкм}$, то можно констатировать следующее: в результате дифракции на отверстии диаметром $d = 1 \text{ мм}$ ООСВ с длиной волны $\lambda_{s1} = 2229 \text{ мкм}$, превышающей размер отверстия в $\lambda_{s1}/d = 2.2$ раза, в направлении $\psi_{s1} = 117.29^\circ$, исходящем от отверстия, возникает отчетливая тень шириной d на расстоянии $\sim L = 12 \text{ мм}$ от отверстия (и это, по-видимому, не предел), причем расстояние L превышает диаметр отверстия в $L/d = 12$ раз.

Отметим, что отчетливая (хотя и не очень контрастная) тень от отверстия в направлении вектора \vec{V}_{s1} наблюдалась и на дифракционных картинах для ООСВ с другими частотами, поскольку на изочастотной зависимости ООСВ всегда имеются точки перегиба.

Таким образом, эксперимент по дифракции ООСВ на отверстии показал, что из-за наличия у ООСВ направлений, в которых возможно сверхнаправленное распространение волны, в этих направлениях от отверстия в ферритовой пленке возникает отчетливая тень, наблюдаемая на расстоянии, значительно превосходящем оценочное расстояние, полученное на основе критерия разрешимости Рэлея.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках темы государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и при финансовой

поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00356).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Damon R.W., Eshbach J.R.* // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. № 3/4. P. 308.
2. *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994.
3. *Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Саратов. гос. ун-т, 1993.
4. *Demokritov S.O., Slavin A.N.* Topics in applied physics. V. 125. Magnonics: from fundamentals to applications. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
5. *Анненков А.Ю., Герус С.В.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 1. С. 82; *Annenkov A.Yu., Gerus S.V.* // Tech. Phys. 1999. V. 44. No. 1. P. 74.
6. *Локк Э.Г.* // Радиотехн. и электрон. 2003. Т. 48. № 12. С. 1484; *Lokk E.G.* // J. Commun. Technol. Electron. 2003. V. 48. No. 12. P. 1369.
7. *Вашковский А.В., Локк Э.Г.* // УФН. 2006. Т. 176. № 4. С. 403; *Vashkovsky A.V., Lock E.H.* // Phys. Usp. 2006. V. 49. No. 4. P. 389.
8. *Локк Э.Г.* // Радиотехн. и электрон. 2015. Т. 60. № 1. С. 102; *Lokk E.G.* // J. Commun. Technol. Electron. 2015. V. 60. No. 1. P. 33.
9. *Локк Э.Г.* // Радиотехн. и электрон. 2018. Т. 63. № 8. С. 845; *Lokk E.G.* // J. Commun. Technol. Electron. 2018. V. 63. No. 8. P. 915.
10. *Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H.* // EPJ Web Conf. 2018. V. 185. Art. No. 02006.
11. *Локк Э.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1034; *Lock E.H.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 8. P. 932.
12. *Локк Э.Г.* // Радиотехн. и электрон. 2020. Т. 65. № 3. С. 267; *Lock E.H.* // J. Commun. Technol. Electron. 2020. V. 65. No. 3. P. 265.
13. *Локк Э.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 174; *Lock E.H.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 134.
14. *Parekh J.P., Tuan H.S.* // J. Appl. Phys. 1981. V. 53. No. 3. P. 2279.
15. *Вашковский А.В., Гречушкин К.В., Стальмахов А.В., Тюлюкин В.А.* // Радиотехн. и электрон. 1987. Т. 32. № 11. С. 2295; *Vashkovsky A.V., Grechushkin K.V., Stalmakhov A.V., Tyulyukin V.A.* // Sov. J. Commun. Technol. Electron. 1987. V. 32. No. 11. P. 2295.
16. *Анненков А.Ю., Герус С.В.* // Радиотехн. и электрон. 2012. Т. 57. № 5. С. 572; *Annenkov A.Yu., Gerus S.V.* // J. Commun. Technol. Electron. 2012. V. 57. No. 5. P. 519.
17. *Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H.* // EPL. 2018. V. 123. № 4. Art. No. 44003.
18. *Локк Э.Г.* // УФН. 2012. Т. 182. № 12. С. 1327; *Lock E.H.* // Phys. Usp. 2012. V. 55. No. 12. P. 1239.

Diffraction of backward volume spin waves on a through hole in a ferrite plate**S. V. Gerus^{a, *}, E. H. Lock^a, A. Yu. Annenkov^a, A. B. Khutieva^b, A. V. Sadovnikov^b**^a*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), Fryazino, 141190 Russia*^b*Saratov National Research State University, Saratov, 410012 Russia***e-mail: svg318@ire216.msk.su*

Diffraction of a backward volume spin wave on a through hole in a ferrite plate is investigated experimentally and theoretically for the case where the spin wave length is larger than the hole diameter and the linear transducer, exciting the wave, is perpendicular to the external homogeneous magnetic field. It is found that in one of the directions in which super-directional propagation of this wave is possible, the distinct shadow from the hole is observed at a considerable distance from the hole. A good agreement between the experimental and theoretical results is obtained.