

УДК 537.624:537.632

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СПИНОВОЙ ВОЛНЫ ПО ТОЛЩИНЕ ФЕРРИТОВОЙ ПЛАСТИНЫ И НАПРАВЛЕНИЯМИ ЕЕ ГРУППОВОЙ И ФАЗОВОЙ СКОРОСТЕЙ

© 2023 г. Э. Г. Локк¹, *, С. В. Герус¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

*E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 12.06.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 28.06.2023 г.

Исследованы общие невзаимные свойства поверхностной и обратной спиновых волн в касательно-намагниченной ферритовой пластине. Установлено правило, которое определяет взаимосвязь между локализацией спиновой волны по толщине ферритовой пластины и направлениями ее групповой и фазовой скоростей.

DOI: 10.31857/S0367676523702605, EDN: TURCIY

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в касательно-намагниченной ферритовой пластине могут возбуждаться и распространяться с малыми потерями поверхностные и обратные объемные спиновые волны (СВ) с невзаимными свойствами. Впервые эти волны были описаны в работе [1] с использованием магнитостатического приближения, из-за чего их часто называют магнитостатическими волнами. В дальнейшем некоторые свойства СВ и устройства на их основе были описаны в монографиях и обзорных статьях [2–9]. В частности, было установлено, что СВ обладают невзаимными свойствами, причем, если невзаимные свойства поверхностных СВ (ПСВ) были описаны еще в [1], то невзаимные свойства обратных СВ (ОСВ) были обнаружены намного позже в работах [9–16]. Так, в [9, 11, 13, 15, 16] экспериментально и теоретически было установлено, что при возбуждении ОСВ линейным преобразователем, расположенным на одной из поверхностей ферритовой пластины, возникают две волны, характеризующиеся противоположно направленными волновыми векторами, различными амплитудами и различным¹ распределением магнитного потенциала (который описывает решение задачи о распростране-

нии СВ [1]) в сечении пластины. Кроме того, было найдено, что в зависимости от ориентации волнового вектора (или возбуждающего преобразователя) наибольшее значение модуля магнитного потенциала ОСВ может находиться как на поверхности, так и внутри ферритовой пластины [11, 13, 16].

Несмотря на большое количество работ, посвященных описанию невзаимных свойств СВ, исследователям достаточно трудно помнить все сложные формулы, описывающие СВ, и регулярно пользоваться ими при проведении экспериментов, чтобы выяснить, в каком направлении будет переноситься наибольшая часть энергии данной СВ при определенной ориентации возбуждающего преобразователя. Ниже на основе анализа результатов, полученных в работах [1, 9–16], сформулированы некоторые правила, которые позволяют определить, в какую сторону (относительно возбуждающего преобразователя, произвольно ориентированного на поверхности ферритовой пластины) будет переноситься наибольшая часть энергии ПСВ или ОСВ.

НЕВЗАИМНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОЙ И ОБРАТНОЙ СПИНОВЫХ ВОЛН В ФЕРРИТОВОЙ ПЛАСТИНЕ

Рассмотрим ферритовую пластину 2 толщины s , окруженную полупространствами вакуума 1 и 3 и намагниченную до насыщения касательным

¹ Исключением является случай, когда обе волны распространяются параллельно вектору внешнего магнитного поля в противоположных направлениях. Только в этом случае обе волны обладают одинаковым распределением магнитного потенциала в сечении ферритовой пластины и поэтому возбуждаются с одинаковой амплитудой.

однородным магнитным полем $\vec{H}_0$ (рис. 1а). При исследовании распространения СВ в такой пластине ось z традиционно направляют вдоль вектора $\vec{H}_0$, а ось x — перпендикулярно поверхностям пластины и описывают ферритовый слой тензором магнитной проницаемости $\vec{\mu}_2$ вида [4]

$$\vec{\mu}_2 = \begin{vmatrix} \mu & i\nu & 0 \\ -i\nu & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\mu = 1 + \frac{\omega_M \omega_H}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad \nu = \frac{\omega_M \omega}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad (2)$$

$\Omega_H = \gamma H_0$, $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$, $\omega = 2\pi f$, γ — гиромагнитная постоянная, $4\pi M_0$ — намагниченность насыщения феррита, f — частота СВ.

Различные свойства и характеристики СВ в такой пластине рассмотрены во множестве монографий и статей [1–16]. Ниже нас будут интересовать невязимые свойства ПСВ и ОСВ в свободной ферритовой пластине. Эти свойства удобно исследовать с помощью изочастотных зависимостей ПСВ и ОСВ², представленных на рис. 2 для пластины со следующими параметрами $s = 20$ мкм, $4\pi M_0 = 1750$ Гс и величины поля $H_0 = 300$ Э.

Напомним кратко, какие свойства СВ обычно называют невязимыми. Как отмечалось в [12], если изочастотная зависимость волны в среде или структуре не является центрально симметричной фигурой, то возникает невязимое распространение волн, когда параметры волн (например, длина волны λ или величина групповой скорости U), распространяющихся в прямом и в обратном направлении, различны. Очевидно, что такого рода невязимость не характерна для ПСВ и ОСВ в свободной ферритовой пластине, поскольку изочастотные зависимости этих волн центрально симметричны (рис. 2).

Однако у ПСВ и ОСВ в свободной ферритовой пластине возникает невязимость другого рода. Так, как известно [11, 16], противоположно направленные лучи СВ, имеющие одинаковые параметры, отличаются распределением амплитуды магнитного потенциала $\Psi_{0n}(x)$ (определяющего распределение энергии СВ) по толщине ферритовой пластины: у одного луча наибольший³ максимум распределения $\Psi_{0n}(x)$ расположен ближе к одной поверхности ферритовой пластины, а у другого луча — ближе к другой поверхности пластины. Ниже, характеризуя распределение $\Psi_{0n}(x)$

² Здесь и везде ниже под аббревиатурой ОСВ в целях краткости изложения подразумевается первая мода ОСВ, которая, как правило, и наблюдается в экспериментах.

³ Определение величины Ψ_{0n} см. ниже; см также сноску 1.

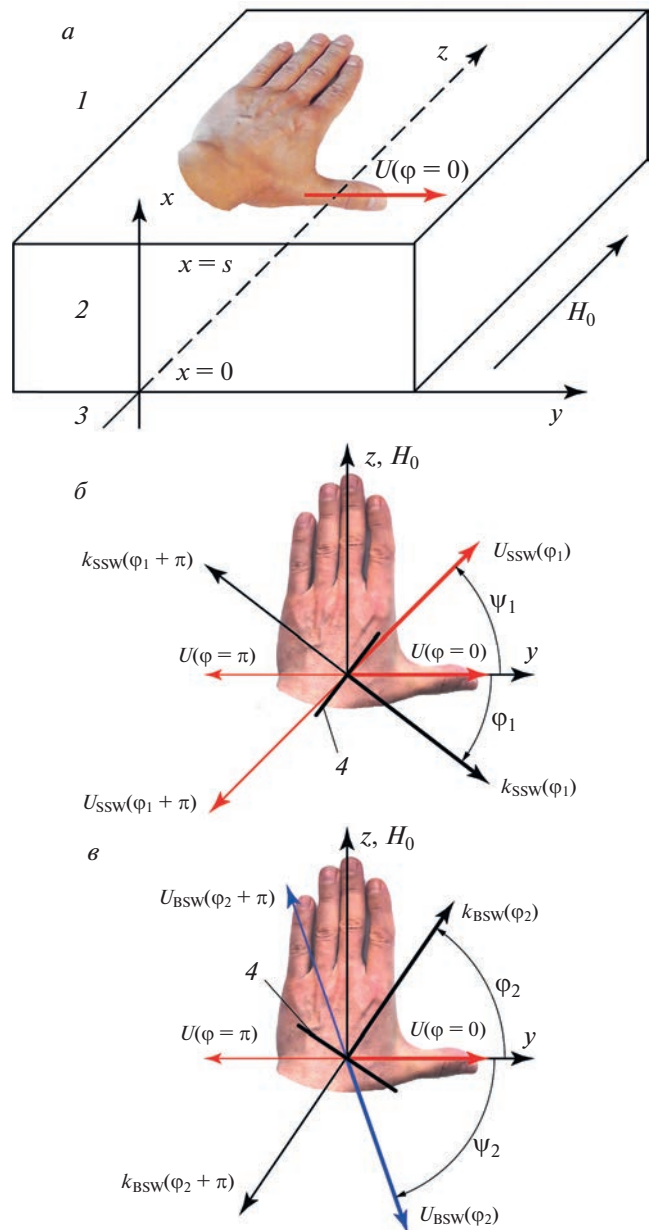


Рис. 1. Пример использования правила левой руки в пространстве (а) и в плоскости ферритовой пластины (вид со стороны поверхности $x = s$) для ПСВ (б) и ОСВ (в), характеризующимися векторами групповой скорости $\vec{U}_{SSW}$ и $\vec{U}_{BSW}$: 1 и 3 — полупространства вакуума, 2 — ферритовая пластина (пленка), 4 — линейный преобразователь, возбуждающий СВ. Изображены векторы $\vec{k}_{SSW}$, $\vec{k}_{BSW}$, $\vec{U}_{SSW}$, $\vec{U}_{BSW}$, углы φ_1 , φ_2 , ψ_1 , ψ_2 , определяющие их ориентации (соответствующие изображенным на рис. 2), линейные преобразователи, возбуждающие ПСВ и ОСВ с этими и с противоположно направленными векторами $\vec{k}$ и $\vec{U}$, и направления $\vec{U}(\varphi = 0)$ и $\vec{U}(\varphi = \pi)$, в которых переносит энергию коллинеарная ПСВ, локализованная, соответственно, у поверхностей $x = s$ и $x = 0$. Жирным показаны векторы, которые соответствуют СВ, локализованным у поверхности $x = s$. Остальные векторы соответствуют СВ, локализованным у поверхности $x = 0$.

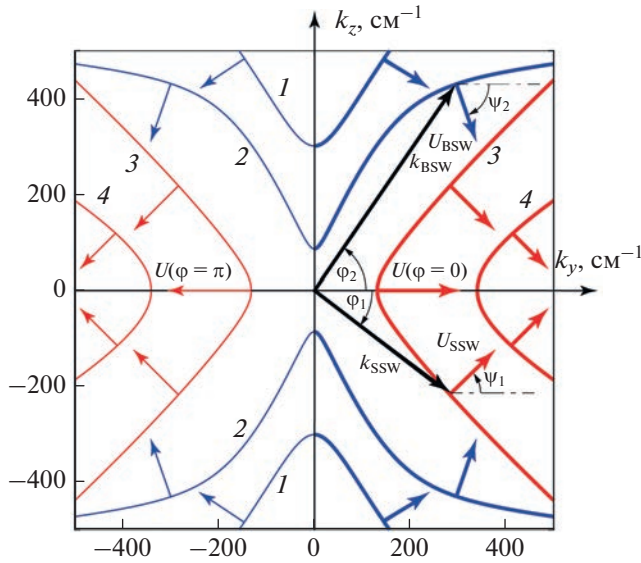


Рис. 2. Изочастотные зависимости для первой моды ОСВ с частотами 1950 и 2120 МГц (кривые 1 и 2) и для ПСВ с частотами 2700 и 3050 МГц (кривые 3 и 4). Изображены произвольно выбранные волновые векторы ПСВ и ОСВ $\vec{k}_{SSW}$ и $\vec{k}_{BSW}$, углы φ_1 и φ_2 , определяющие их ориентации, соответствующие векторы групповой скорости $\vec{U}_{SSW}$ и $\vec{U}_{BSW}$, углы ψ_1 и ψ_2 , определяющие их ориентации, и ряд произвольных векторов $\vec{U}$ для ПСВ и ОСВ. Жирным показаны участки зависимостей и векторы, которые соответствуют СВ, локализованном у поверхности $x = s$. Остальные участки зависимостей и векторы соответствуют СВ, локализованном у поверхности $x = 0$.

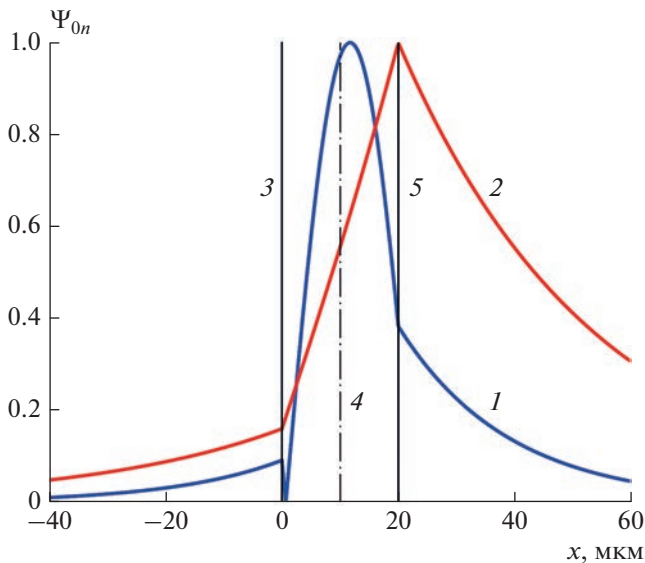


Рис. 3. Нормированное распределение модуля амплитуды магнитного потенциала $\Psi_{0n}(x)$ для первой моды ОСВ при $f = 2120$ МГц, $\varphi_2 = 55^\circ$ (кривая 1) и для ПСВ при $f = 2700$ МГц, $\varphi_2 = -38^\circ$ (кривая 2). Прямые 3–5 соответствуют координатам $x = 0$, $x = s/2 = 10$ мкм и $x = s = 20$ мкм.

СВ, мы будем кратко говорить, что наибольшая часть энергии СВ локализована у определенной поверхности ферритовой пластины, или, что волна локализована вблизи той или другой поверхности пластины. Несимметричное распределение энергии СВ по толщине пластины приводит к тому, что линейный преобразователь, расположенный на одной из поверхностей пластины, эффективно возбуждает лишь луч СВ, локализованный вблизи той же поверхности, тогда как луч СВ, локализованный вблизи противоположной поверхности (и бегущий в противоположном направлении) возбуждается неэффективно. Общие свойства этого явления, которое обычно тоже называют невзаимным распространением СВ, будут исследованы ниже.

На основе анализа результатов, полученных в работах [3, 11, 16], участки изочастотных зависимостей, показанные жирными кривыми на рис. 2, соответствуют ПСВ и ОСВ, у которых наибольшая часть энергии локализована ближе к поверхности $x = s$ ферритовой пластины, тогда как остальные участки этих зависимостей соответствуют волнам, у которых наибольшая часть энергии локализована ближе к поверхности $x = 0$. На рис. 2 изображены также два произвольно выбранных волновых вектора ПСВ и ОСВ $\vec{k}_{SSW}$ и $\vec{k}_{BSW}$, углы φ_1 и φ_2 , определяющие их ориентации, соответствующие векторы групповой скорости $\vec{U}_{SSW}$ и $\vec{U}_{BSW}$, углы ψ_1 и ψ_2 , определяющие их ориентации, а также еще ряд векторов групповой скорости $\vec{U}$ ПСВ и ОСВ для различных произвольно выбранных точек изочастотных зависимостей, причем жирные векторы $\vec{U}$ соответствуют волнам, локализованным ближе к поверхности $x = s$ ферритовой пластины, а остальные векторы $\vec{U}$ — волнам, локализованным ближе к поверхности $x = 0$.

На рис. 3 показано распределение модуля нормированной амплитуды магнитного потенциала $\Psi_{0n}(x)$ для произвольно выбранных волновых векторов ПСВ и ОСВ $\vec{k}_{SSW}$ и $\vec{k}_{BSW}$, изображенных на рис. 2. Как видно из рис. 3, действительно, наибольший максимум распределения $\Psi_{0n}(x)$ как для ОСВ (кривая 1), так и для ПСВ (кривая 2) локализован ближе к поверхности $x = s$ ферритовой пластины. Отметим, что в отличие от [11, 16] в данной работе мы определяем величину Ψ_{0n} не как $\Psi_{0n} = \Psi_0/|\Psi_{0\max}|$, а как $\Psi_{0n} = |\Psi_0|/|\Psi_{0\max}|$. При таком определении величина Ψ_{0n} не может принимать отрицательные значения, а наибольший максимум распределения $\Psi_{0n}(x)$ определяет локализацию наибольшей части энергии СВ по оси x .

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРАВЛЕНИЯМИ ГРУППОВОЙ И ФАЗОВОЙ СКОРОСТЕЙ ВОЛНЫ И ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПО ТОЛЩИНЕ ФЕРРИТОВОЙ ПЛАСТИНЫ

Будем анализировать и описывать невзаимные свойства ПСВ и ОСВ одновременно в плоскости (y, z) ферритовой пластины (рис. 1) и в соответствующей плоскости (k_y, k_z) волновых чисел (рис. 2).

Очевидно, что каждому исследователю, возбуждающему лучи ПСВ или ОСВ линейным преобразователем, необходимо знать, вблизи какой поверхности ферритовой пластины будет локализована энергия каждого из двух возбуждающихся лучей ПСВ или ОСВ, бегущих в противоположных направлениях. Можно сформулировать правило, устанавливающее ответ на этот вопрос.

Правило левой руки для СВ⁴: если мысленно положить ладонь левой руки на какую-либо поверхность ферритовой пластины так, чтобы четыре пальца были направлены вдоль вектора $\vec{H}_0$, то все невзаимные⁵ ПСВ и ОСВ, локализованные у данной поверхности, будут иметь волновые векторы $\vec{k}$ и векторы групповой скорости $\vec{U}$ с положительной проекцией на направление большого пальца руки, отогнутого на 90°. В частности, коллинеарная⁶ ПСВ, локализованная у данной поверхности пластины, будет переносить энергию вдоль вектора групповой скорости $\vec{U}(\varphi = 0)$, направленного также, как и большой палец руки. Отметим, что в отличие от работ [1, 11, 16] в правиле левой руки все углы φ и ψ следует отсчитывать от направления большого пальца левой руки.

Использование этого правила для ПСВ и ОСВ, локализованных у поверхности ферритовой пластины $x = s$ продемонстрировано, соответственно, на рис. 1б и 1в на примере векторов $\vec{U}_{\text{SSW}}$ и $\vec{U}_{\text{BSW}}$, произвольно выбранных для ПСВ и ОСВ на рис. 2. Действительно, как видно из рис. 1 и 2, все жирные векторы групповой скорости $\vec{U}$, которые описывают ПСВ и ОСВ, локализованные ближе к поверхности $x = s$ ферритовой пластины, имеют положительную проекцию на направление большого пальца левой руки, тогда как остальные век-

торы $\vec{U}$ имеют отрицательную проекцию на это направление⁷.

Очевидно, что если известна частота СВ ω , то сектор углов ψ , внутри которых будет локализована энергия волны, будет заключен между углами отсечки⁸ ψ_{cut1} и ψ_{cut2} вектора групповой скорости, которые также следует отсчитывать от направления большого пальца левой руки (как для ПСВ, так и для ОСВ). Поэтому углы ψ_{cut1} и ψ_{cut2} будут описываться одинаковыми формулами (см. формулы (6) в [12])

$$\psi_{\text{cut1}} = \varphi_{\text{cut1}} - \pi/2, \quad \psi_{\text{cut2}} = \varphi_{\text{cut2}} + \pi/2, \quad (3)$$

где углы отсечки φ_{cut1} и φ_{cut2} волнового вектора ПСВ для интервала частот $\omega_{\perp} < \omega < \omega_H + \omega_M/2$ можно найти по формулам (см. формулу (24) в [17]):

$$\varphi_{\text{cut1}} = \arccos \frac{\omega + \sqrt{\omega^2 - \omega_{\perp}^2}}{\omega_H + \omega_M}, \quad \varphi_{\text{cut2}} = -\varphi_{\text{cut1}}, \quad (4)$$

а углы отсечки φ_{cut1} и φ_{cut2} волнового вектора ОСВ для интервала частот $\omega_H < \omega < \omega_{\perp}$ — по формулам (см. формулу (36) в [16])

$$\varphi_{\text{cut1}} = \pi/2 - \arctg \sqrt{\frac{\omega^2 - \omega_H^2}{\omega_{\perp}^2 - \omega^2}}, \quad \varphi_{\text{cut2}} = -\varphi_{\text{cut1}}. \quad (5)$$

В приведенных формулах использовано обозначение $\omega_{\perp} = \sqrt{\omega_H^2 + \omega_M \omega_M}$.

Отметим, что если известна ориентация преобразователя (определяющая направление φ возбуждающихся волновых векторов СВ), то сектор углов $\psi_{\text{cut1}} < \psi < \psi_{\text{cut2}}$, внутри которых локализована энергия волны, можно определить точнее. Как видно из рис. 2, имеет место следующее правило, справедливое как для ПСВ, так и для ОСВ: если угол φ принимает положительное значение, то угол ψ принимает отрицательное значение и наоборот. Следует иметь в виду, что при наличии на изочастотной зависимости ПСВ точек перегиба (что имеет место лишь для волн начальной части спектра ПСВ), сектор углов, внутри которого будет заключена энергия ПСВ, будет немного шире (поскольку величина $|\psi|$ в точке перегиба будет больше, чем величина $|\psi_{\text{cut1}}|$). Наличие же точек перегиба на изочастотной зависимости ОСВ при используемом отсчете углов не имеет значения.

Легко убедиться, что сформулированное правило левой руки и приведенные выше формулы справедливы и для СВ, локализованных у противоположной поверхности пластины $x = 0$ (только в этом случае ладонь левой руки будет лежать на поверхности $x = 0$ пластины, а все углы следует отсчитывать от нового направления большого пальца руки).

⁴ Очевидно, что данное правило сформулировано в рамках законов геометрической оптики, где используется понятие луча, считается, что длина СВ намного меньше ширины луча (или длины преобразователя), а дифракционные явления не значительны.

⁵ Напомним, что из всех СВ не обладает свойством невзаимности только коллинеарная ОСВ, распространяющаяся параллельно оси z .

⁶ Здесь для краткости, как и в [12], мы называем волну коллинеарной, если она характеризуется коллинеарной ориентацией волнового вектора и вектора групповой скорости.

⁷ Отметим здесь, что рис. 1 в [16] некорректно описывает направление распространения ОСВ из-за неудачного расположения системы координат.

⁸ Подробнее определения и физический смысл углов отсечки вектора групповой скорости и волнового вектора даны в разделе 6.3 в [12].

Отметим, что представленное правило левой руки может быть весьма полезным для исследователей СВ, в особенности для экспериментаторов, которые имеют дело с реальной касательно-намагниченной ферритовой пластиной, и им необходимо быстро определить, где и как расположить приемный преобразователь, чтобы наиболее эффективно принять энергию распространяющихся лучей СВ. Очевидно также, что по известным значениям ω и ϕ СВ каждый исследователь может точно рассчитать ориентацию вектора $\vec{U}$ для ПСВ и ОСВ как численным, так и аналитическим способами (см., например, [11]).

Следует также иметь в виду, что данное правило сформулировано для СВ в ферритовой пластине, находящийся в свободном пространстве. Возможность использования этого правила для СВ в более сложных ферритовых структурах следует уточнять на основе анализа изочастотных зависимостей СВ в исследуемой структуре. Кроме того, необходимо помнить, что в ферритовых структурах, содержащих металлические плоскости, распределение $\Psi_{0n}(x)$, полученное в магнитостатическом приближении, неадекватно описывает распределение энергии СВ по толщине ферритовой пластины (см. [18]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы общие невязимые свойства ПСВ и ОСВ в касательно-намагниченной ферритовой пластине. На основе анализа свойств изочастотных зависимостей и всех возможных ориентаций волновых векторов $\vec{k}$ и векторов групповой скорости $\vec{U}$ этих волн обнаружена корреляция между направлениями этих векторов и расположением наибольшего максимума в распределении модуля амплитуды нормированного магнитного потенциала $\Psi_{0n}(x)$ по отношению к поверхностям ферритовой пластины. Установлено мнемоническое правило левой руки, определяющее взаимосвязь между распределением волны по толщине ферритовой пластины и направлениями векторов $\vec{k}$ и $\vec{U}$ СВ.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Damon R.W., Eshbach J.R. // J. Phys. Chem. Sol. 1961. V. 19. No. 3/4. P. 308.
2. Ваннэ Г.М. СВЧ устройства на магнитостатических волнах. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1984.
3. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1993.
4. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994.
5. Demokritov S.O., Slavin A.N. Topics in applied physics. V. 125. Magnonics: from fundamentals to applications Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
6. Никитов С.А., Калябин Д.В., Лисенков И.В. и др. // УФН. 2015. Т. 185. № 10. С. 1099; Nikitov S.A., Kalyabin D.V., Lisenkov I.V. et al // Phys. Usp. 2015. V. 58. No. 4. P. 1002.
7. Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B. // Nature Physics. 2015. V. 11. P. 453.
8. Pirro P., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B. // Nature Rev. Mater. 2021. V. 6. P. 1114.
9. Вугальтер Г.А., Коровин А.Г. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 21. С. 73; Vugalter G.A., Korovin A.G. // Tech. Phys. Lett. 1989. V. 15. No. 21. P. 73.
10. 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.
11. 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.
12. Локк Э.Г. // УФН. 2008. Т. 178. № 4. С. 397; Lock E.H. // Phys. Usp. 2008. V. 51. No. 4. P. 375.
13. Анненков А.Ю., Герус С.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 10. С. 1416; Annenkov A.Yu., Gerus S.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2010. V. 74. No. 10. P. 1355.
14. Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. // EPJ Web Conf. 2018. V. 185. Art. No. 02006.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Локк Э.Г. // УФН. 2011. Т. 181. № 3. С. 293; Lock E.H. // Phys. Usp. 2011. V. 54. No. 3. P. 281.

Relationship between the spin wave distribution across a ferrite plate thickness and the directions of wave's group and phase velocities

E. H. Lock^a, *, S. V. Gerus^a

^a Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch, Fryazino, 141190 Russia

*e-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru

The general nonreciprocal properties of surface and backward spin waves in a tangentially magnetized ferrite plate are investigated. It is established the rule that determines interconnection between the spin wave localization over the ferrite plate thickness and the directions of group and phase velocities of the wave.