

УДК 537.624,537.632

СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СПИНОВЫХ ВОЛН В СИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРЕ МЕТАЛЛ–ДИЭЛЕКТРИК–ФЕРРИТ– ДИЭЛЕКТРИК–МЕТАЛЛ

© 2020 г. А. Ю. Анненков¹, *, С. В. Герус¹, Э. Г. Локк¹

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

*E-mail: amts-f@mail.ru

Поступила в редакцию 02.12.2019 г.

После доработки 23.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Теоретически исследованы характеристики поверхностных спиновых волн в касательно намагниченной симметричной структуре металл–диэлектрик–феррит–диэлектрик–металл. Установлено, что при определенных параметрах структуры эти одномодовые волны имеют обратный характер во всем частотном диапазоне и во всем диапазоне ориентаций волнового вектора, при которых они существуют.

DOI: 10.31857/S0367676520050051

В последние десятилетия сложилось новое научное направление, связанное с разработкой и исследованием новых искусственных сред (или метаматериалов) и различных структур на их основе. Разработка и создание искусственных сред и структур на основе ферромагнитных материалов (в частности, на основе ферритовых пленок) является актуальным научно-техническим направлением современной радиоэлектроники, поскольку характеристики электромагнитных волн в таких средах могут существенно отличаться от характеристик этих волн в изотропных и в анизотропных средах.

Как известно, в ферритовой пластине могут распространяться с малыми потерями обратные спиновые волны, названные в [1] обратными объемными магнитостатическими волнами. К недостаткам этих волн, препятствующих их практическому использованию, можно отнести их многомодовость и отсутствие линейного участка на дисперсионной зависимости первой моды (которая, в основном, и возбуждается в экспериментах). В данной работе на основе расчетов будет показано, что при определенных параметрах в простейшей искусственной плоскопараллельной структуре металл–диэлектрик–феррит–диэлектрик–металл (МДФДМ) можно возбудить спектр спиновых волн, которые являются обратными и одномодовыми во всем частотном диапазоне их существования. Несмотря на то, что ранее характеристики спиновых волн в структуре МДФДМ и, в особенности, в структуре ФДМ исследовались во многих работах (см., например, [2–13]), изочастотные зависимости спиновых волн в не-

симметричной структуре МДФДМ исследованы лишь недавно в [13]. Ниже будут рассчитаны и проанализированы изочастотные и дисперсионные зависимости спиновых волн в симметричной структуре МДФДМ.

Исходя из уравнений Максвелла в магнитостатическом приближении $\text{rot } \vec{h} = 0$ и $\text{rot } \vec{b} = 0$ и вводя магнитостатический потенциал Ψ в соответствии с выражением $\vec{h} = \text{grad } \Psi$, можно получить уравнения для потенциала внутри и вне ферритовой пластины. В силу непрерывности нормальной компоненты \vec{b} и потенциала Ψ на границах сред 1–3 можно составить систему уравнений, решив которую, получим дисперсионное уравнение, описывающее распространение поверхностной спиновой волны (ПСВ) в произвольном направлении структуры МДФДМ (другие формы уравнения см. в [8, 13]):

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha\mu - v \cos \varphi + \text{th}(kw)}{\alpha\mu + v \cos \varphi - \text{th}(kw)} = \\ & = \frac{\alpha\mu - v \cos \varphi - \text{th}(kd)}{\alpha\mu + v \cos \varphi + \text{th}(kd)} \exp(-2\alpha ks), \end{aligned} \quad (1)$$

где k – модуль волнового вектора \vec{k} в плоскости структуры; φ – угол между вектором \vec{k} и осью y (отсчитываемый от оси y против часовой стрелки); $\alpha = \sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi / \mu}$; $k_y = k \cos \varphi$ и $k_z = k \sin \varphi$ – компоненты волнового вектора в декартовой системе координат; $\mu = 1 + \omega_M \omega_H / (\omega_H^2 - \omega^2)$ и $v = \omega_M \omega / (\omega_H^2 - \omega^2)$ – диагональная и недиагональная

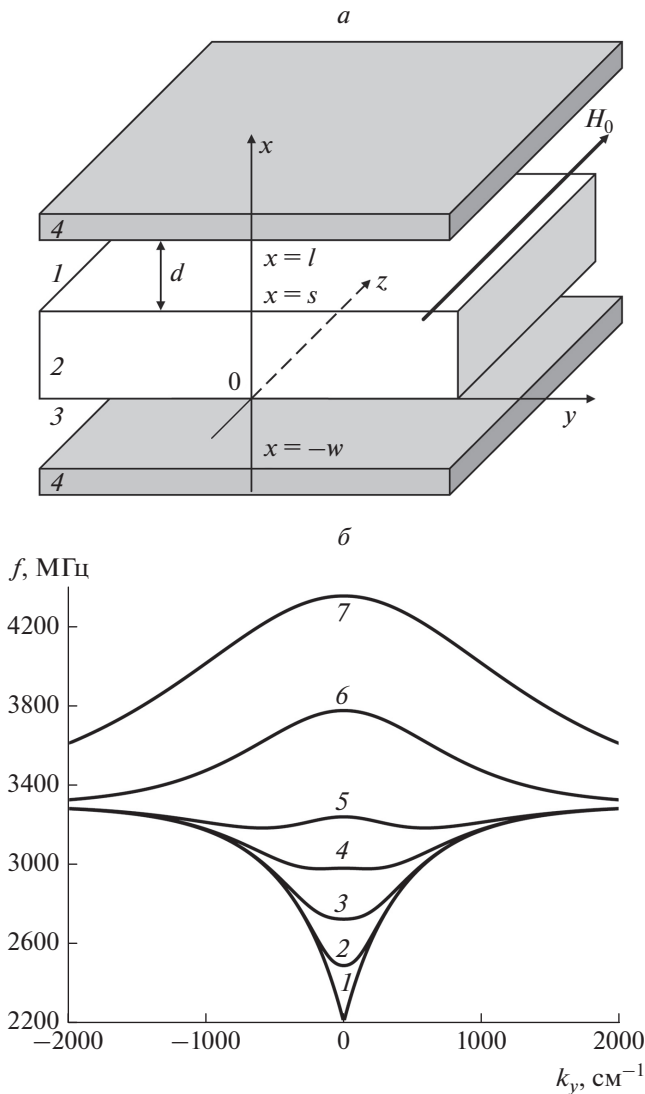


Рис. 1. Геометрия структуры МДФДМ (а): 1, 3 – слои диэлектрика (или пространства вакуума); 2 – ферритовая пластина; 4 – идеально проводящие плоскости. Дисперсионные зависимости ПСВ $f(k_y)$ в симметричной структуре МДФДМ (б) при $s = 10$ мкм и значениях $w = d = \infty, 100, 50, 30, 20, 10$ и 5 мкм (кривые 1–7).

компоненты тензора магнитной проницаемости феррита; $\omega_H = \gamma H_0$; $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$; $\omega = 2\pi f$; γ – гиромагнитная постоянная; $4\pi M_0$ – намагниченность насыщения феррита; f – частота волны.

Рассмотрим характеристики ПСВ в симметричной структуре МДФДМ, в которой $d = w$ (рис. 1а). В этом случае, полагая в (1) $\varphi = 0$, перемножая левую и правую части уравнения (1) и приводя подобные, можно получить дисперсионное уравнение для волн, распространяющихся вдоль оси y :

$$\mu_{\perp} + 2 \operatorname{th}(kd) \operatorname{cth}(ks) + \frac{1}{\mu} \operatorname{th}^2(kd) = 0, \quad (2)$$

где $\mu_{\perp} = (\mu^2 - \nu^2)/\mu$. Из уравнения (2) несложно получить дисперсионную зависимость ПСВ $\omega(k)$ в явном виде:

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_H^2 + \omega_M^2 + 2\omega_H\omega_M[1 + \operatorname{th}(kd)\operatorname{cth}(ks)]}{1 + \operatorname{th}^2(kd) + 2 \operatorname{th}(kd)\operatorname{cth}(ks)}}. \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (3) вместо k можно писать и k_y , поскольку при $\varphi = 0$ $k_y = k$.

На рис. 1б приведены дисперсионные зависимости ПСВ $f(k_y)$ в симметричной структуре МДФДМ для различных значений $d = w$ при следующих параметрах: $s = 10$ мкм, $H_0 = 300$ Э, $4\pi M_0 = 1750$ Гс. Как видно из рис. 1б, в этой структуре вдоль оси y может распространяться как прямая одномодовая ПСВ (при $d = w > 35$ мкм), так и обратная одномодовая ПСВ (при $d = w < 13$ мкм).

Проанализируем характеристики ПСВ, рассчитанные в структуре МДФДМ при $s = 10$ мкм и $w = d = 5$ мкм (рис. 2)¹. Как видно из рис. 2б, дисперсионные зависимости ПСВ $f(k)$ для различных значений угла φ “отходят” от оси частот при различных значениях частоты, тогда как в свободной ферритовой пластине аналогичные зависимости $f(k)$ всегда начинаются на оси частот при $f_{\perp} = \omega_{\perp}/2\pi = \sqrt{\omega_H^2 + \omega_H\omega_M}/2\pi$. Здесь использован термин “отходят”, поскольку в структуре МДФДМ сами точки, лежащие на оси частот, не являются решениями уравнения (1) и не принадлежат дисперсионной зависимости (в этом можно убедиться, полагая в уравнении (1) $k = 0$). При $k \rightarrow \infty$ зависимости $f(k)$ на рис. 2б стремятся к частоте

$$\omega(k \rightarrow \infty) = \frac{\omega_H + (\omega_H + \omega_M) \cos^2 \varphi}{2 \cos \varphi}, \quad (4)$$

совпадающей с аналогичной частотой для ПСВ в ферритовой пластине [14]. Значение частоты, к которому стремится зависимость $f(k)$ при $\varphi = 0$ и $k \rightarrow 0$ (кривая 1 на рис. 2б), можно найти из выражения (3), полагая в нем $k \rightarrow 0$ и используя правило Лопиталья (или разложение в ряд Тейлора):

$$\begin{aligned} \omega(\varphi = 0, k \rightarrow 0) &= \\ &= \sqrt{\frac{\omega_H^2 + \omega_M^2 + 2\omega_H\omega_M(1 + d/s)}{1 + 2d/s}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из рис. 2б, ПСВ сохраняет обратный одномодовый характер не только во всем диапазоне частот, но и во всем диапазоне ориентаций φ волнового вектора.

Изочастотные зависимости ПСВ (рис. 2а) либо имеют форму петли (кривые 7–11), либо стремятся к определенным асимптотам при $k \rightarrow \infty$ (кривые 1–10), то есть имеют углы отсечки $\varphi_{\text{отс}}(f)$, зависящие от частоты. Все изочастотные зависи-

¹ Фрагмент дисперсионной поверхности ПСВ $f(k, \varphi)$ для тех же параметров структуры представлен ранее на рис. 6 в [13].

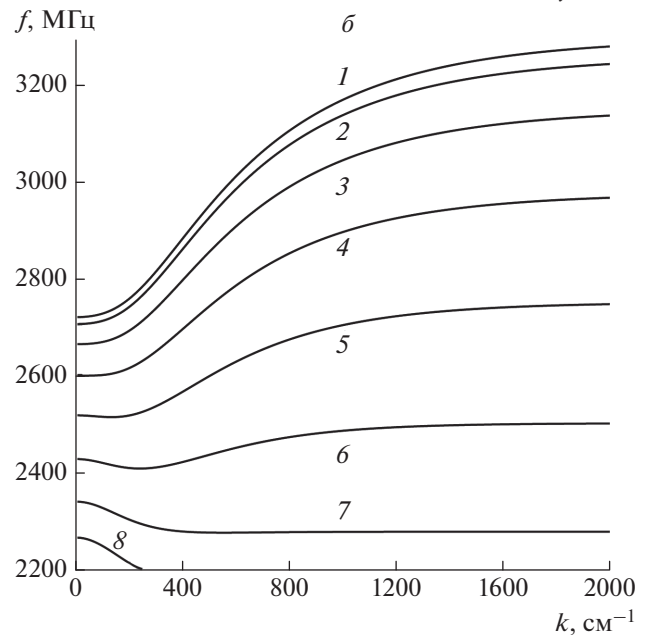
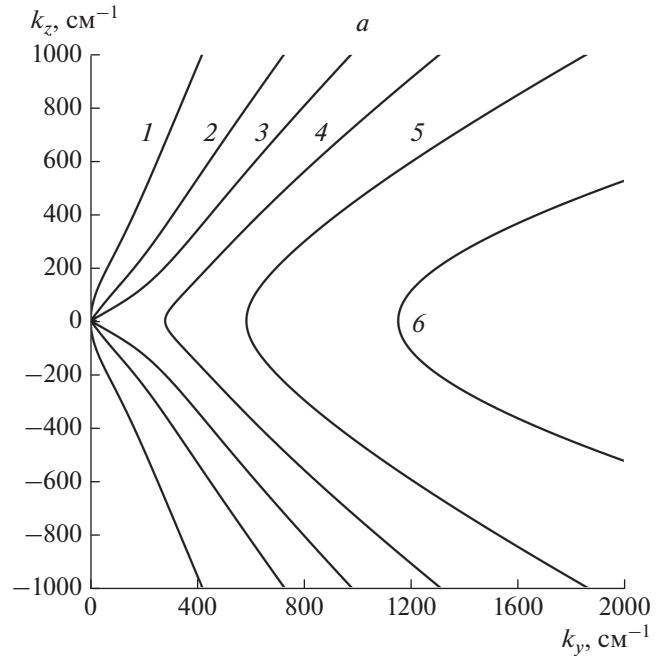
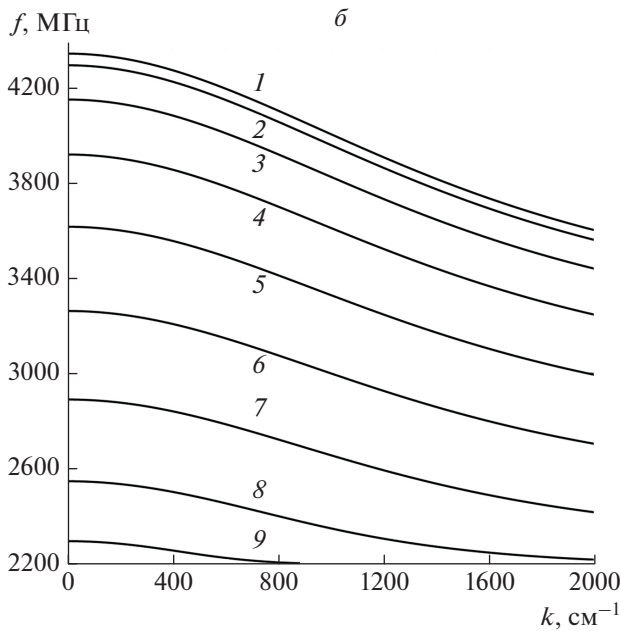
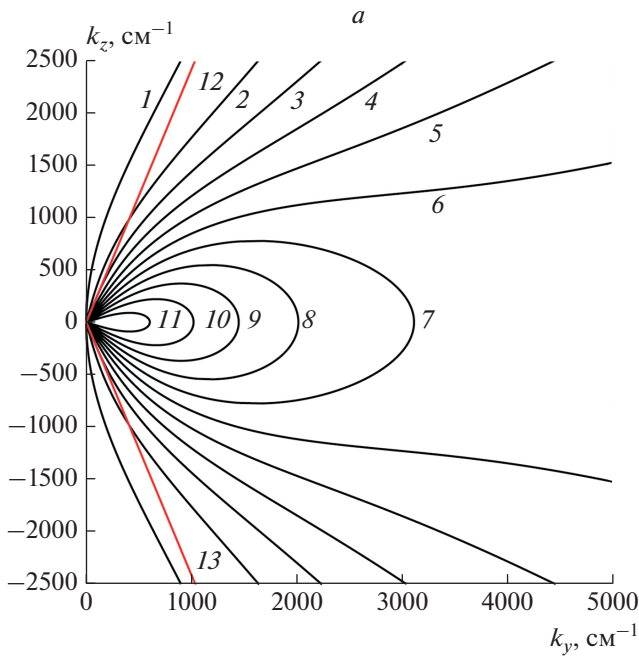


Рис. 2. Изочастотные зависимости ПСВ (а) для частот 2200–4200 МГц с шагом 200 МГц (кривые 1–11) и дисперсионные зависимости ПСВ $f(k)$ (б) для значений $\varphi = 0^\circ\text{--}80^\circ$ с шагом 10° (кривые 1–9) в структуре МДФДМ при $s = 10$ мкм и $w = d = 5$ мкм. Прямые 12 и 13 соответствуют максимальным углам отсечки ПСВ $\varphi = 67.5^\circ$ и $\varphi = -67.5^\circ$.

Рис. 3. Изочастотные зависимости ПСВ (а) для частот 2200–3200 МГц с шагом 200 МГц (кривые 1–6) и дисперсионные зависимости ПСВ $f(k)$ (б) для значений $\varphi = 0^\circ\text{--}70^\circ$ с шагом 10° (кривые 1–8) в структуре МДФДМ при $s = 10$ мкм и $w = d = 50$ мкм.

мости ПСВ, как и зависимости $f(k)$, тоже “отходят” от оси частот, то есть, от точки $(k_y = 0, k_z = 0)$ (рис. 2а), причем при низких значениях частоты эти зависимости могут описывать волны с ориентациями волнового вектора φ , превышающими максимальный угол отсечки ПСВ $|\varphi_{\text{отсмакс}}| =$

$= \arctg \sqrt{\omega_M / \omega_H} = 67.5^\circ$ (см. кривые 1 и 2 на рис. 2а). Это приводит к тому, что дисперсионные зависимости, рассчитанные для углов $|\varphi| > |\varphi_{\text{отсмакс}}|$ (кривые 8 и 9 на рис. 2б) существуют лишь в ограниченном интервале значений k (подробнее об этом явлении см. свойства 7 и 8 ПСВ, изложенные в разделе 3 работы [13]).

Отметим также, что при больших значениях толщин $w = d = 50$ мкм в структуре МДФДМ возникают не обратные, а прямые ПСВ, которые описывает, например, дисперсионная кривая \mathcal{Z} на рис. 1б. Рассматривая эту кривую и рассчитывая для нее по формуле (5) частоту $f = \omega(\varphi = 0, k \rightarrow 0)/2\pi = 2719$ МГц, можно подумать, что ПСВ в этой структуре всегда имеют прямой характер и существуют лишь при $f > 2719$ МГц. Однако расчеты изочастотных и дисперсионных зависимостей ПСВ при данных параметрах структуры (рис. 3) показали, что ПСВ в этой структуре не всегда имеют прямой характер и существуют и при частотах $f > f_{\perp} = 2198$ МГц (рис. 3б)! Это объясняется тем, что в интервале частот 2198–2719 МГц уравнение (1) не имеет решений, соответствующих ориентации волнового вектора $\varphi = 0$. Поэтому по виду зависимости $f(k_y)$ на рис. 1б нельзя адекватно представить изочастотные зависимости ПСВ и ее дисперсионные зависимости при различных значениях φ . Отметим, что при $|\varphi| > |\varphi_{\text{отсмакс}}|$ в структуре МДФДМ с данными параметрами также возникает обратная одномодовая ПСВ, существующая в ограниченном интервале значений k (рис. 3б, кривая δ).

В целом, как видно из представленных рисунков, свойства дисперсионных и изочастотных зависимостей ПСВ в симметричной структуре МДФДМ интересны как в теоретическом, так и в практическом отношении и могут использоваться при разработке различных спинволновых устройств и магнанных кристаллов.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме № 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Damon R.W., Eshbach J.R.* // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. № 3/4. P. 308.
2. *Van de Vaart H.* // Electr. Lett. 1970. V. 6. № 19. P. 601.
3. *Bongianni W.L.* // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. № 6. P. 2541.
4. *Yukawa T., Yamada J., Abe K. et al.* // JJAP. 1977. V. 16. № 12. P. 2187.
5. *Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: изд-во Саратов. ун-та, 1993, 312 с.
6. *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994, 464 с.
7. *Зубков В.И., Шеглов В.И.* // Радиотехн. электрон. 1997. Т. 42. № 9. С. 1114; *Zubkov V.I., Shcheglov V.I.* // J. Commun. Technol. Electron. 1997. V. 42. № 9. P. 1114.
8. *Локк Э.Г.* // Радиотехн. электрон. 2007. Т. 52. № 2. С. 202; *Lokk E.G.* // J. Commun. Technol. Electron. 2007. V. 52. № 2. P. 189.
9. *Вашковский А.В., Локк Э.Г.* // УФН. 2011. Т. 181. № 3. С. 293; *Vashkovsky A.V., Lock E.H.* // Phys. Usp. 2011. V. 54. № 3. P. 281.
10. *Локк Э.Г.* // Радиотехн. электрон. 2014. Т. 59. № 7. С. 711; *Lokk E.G.* // J. Commun. Technol. Electron. 2014. V. 59. № 7. P. 767.
11. *Локк Э.Г., Вашковский А.В.* // Радиотехн. электрон. 2016. Т. 61. № 8. С. 746; *Lokk E.G., Vashkovskii A.V.* // J. Commun. Technol. Electron. 2016. V. 61. № 8. P. 877.
12. *Анненков А.Ю., Герус С.В., Локк Э.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1037; *Annenkov A.Y., Gerus S.V., Lock E.H.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 8. P. 935.
13. *Локк Э.Г., Герус С.В., Анненков А.Ю.* // Радиотехн. электрон. 2018. Т. 63. № 10. С. 1089; *Lokk E.G., Gerus S.V., Annenkov A.Y.* // J. Commun. Technol. Electron. 2018. V. 63. № 10. P. 1197.
14. *Беспярых Ю.И., Зубков В.И., Тарасенко В.В.* // ЖТФ. 1980. Т. 50. № 1. С. 140; *Bespyatykh Yu.I., Zubkov V.I., Tarasenko V.V.* // Tech. Phys. J. 1980. V. 50. № 1. P. 140.