

05:09

## **Условия существования обратных поверхностных магнитоэлектрических волн в структуре феррит–диэлектрик–металл**

© В.И. Зубков, В.И. Щеглов

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

Поступило в Редакцию 10 декабря 1996 г.

В окончательной редакции 13 марта 1998 г.

Теоретически исследована дисперсия поверхностных магнитоэлектрических волн (ПМСВ) различных частот, распространяющихся в намагниченном однородном магнитном поле структурах феррит–диэлектрик–металл (СФДМ). Установлено, что в СФДМ в зависимости от соотношения толщин ферритового и диэлектрического слоев обратные ПМСВ существуют в разных частотных диапазонах и имеют разные волновые числа и направления распространения. Определены условия, при которых возможно непосредственное наблюдение обратных ПМСВ в СФДМ.

Изучение дисперсии прямых и обратных поверхностных магнитоэлектрических волн (ППМСВ и ОПМСВ) в структурах феррит–диэлектрик–металл (СФДМ) актуально в связи с их возможным использованием для аналоговой обработки информации в СВЧ-диапазоне [1] (при цитировании авторы имеют в виду и литературу во всех ссылках). Большое число работ по изучению дисперсии ПМСВ в СФДМ с конкретными параметрами [1–6] создает иллюзию изученности проблемы существования ОПМСВ в СФДМ. Однако отсутствие прямого экспериментального доказательства их существования [4–6] непонятно. Ниже объяснены возможные причины этого.

Рассмотрим бесконечную в плоскости  $yOz$  СФДМ, состоящую из ферритовой пленки (ФП) толщиной  $d$ , намагниченной до насыщения, идеально проводящего металлического слоя и диэлектрического слоя (в магнитостатике — вакуумного) между ними с толщиной  $s$  (далее этот слой обозначается просто  $s$ ). Плоскость  $x = 0$  есть поверхность ФП, ближайшая к металлическому слою. Подмагничивающее поле  $H_0$  направлено по оси  $z$ . В СФДМ распространяется ПМСВ с частотой  $\omega$ , волновой вектор  $\mathbf{k}$  и групповая скорость  $v_g$  которой направлены под углами  $\varphi$  и  $\psi$  к оси  $y$ .

Дисперсионное соотношение для ПМСВ в СФДМ записывается в виде [7]:

$$[\beta - 2\mu\alpha \operatorname{cth}(\alpha kd)] + (\beta + 2 - 2p\nu \cos \varphi) \exp(-2ks) = 0, \quad (1)$$

где  $\alpha = [\mu^{-1} \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi]^{1/2}$ ;  $\beta = (\nu^2 - \mu^2 + \mu) \cos^2 \varphi - \mu - 1$ ;  $\mu = 1 + \Omega_H(\Omega_H^2 - \Omega^2)^{-1}$ ;  $\nu = \Omega(\Omega_H^2 - \Omega^2)^{-1}$ ;  $\Omega = \omega(4\pi|\gamma|M_0)^{-1}$ ;  $\Omega_H = H_0(4\pi M_0)^{-1}$ ;  $4\pi M_0$  — намагниченность насыщения ФП,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение для электрона,  $p = \pm 1$ . Только ПМСВ, распространяющиеся в плоскости  $x = 0$  СФДМ ( $p = 1$ ), могут быть как прямыми, так и обратными волнами [1–3].

Дисперсионное соотношение (1) рассматривают как закон дисперсии  $\Omega_s(k)$  при заданных параметрах  $\varphi$ ,  $d$ ,  $s$  и  $\Omega_H$ . По нему определяется тип ПМСВ (прямая или обратная) [1–5]. Вид закона дисперсии  $\Omega_s(k)$  зависит от соотношения между  $d$  и  $s$ , качественно не меняется при изменении  $\Omega_H$ , а угол  $\varphi$  считается свободным параметром, который задается возбуждающей ПМСВ антенной ( $\varphi = \varphi_0$ ) [1–6]. Ниже определена связь между частотным диапазоном существования, волновыми числами и направлениями распространения ОПМСВ и показано, что определение типа волны только по закону дисперсии недостаточно.

Известно [1–3,5], что ПМСВ существуют в диапазоне частот от нижней  $\Omega_l$  до верхней  $\Omega_u$  ( $s, \varphi$ ) и в интервале углов  $\varphi$ , ограниченном углами ”отсечки”  $\pm\varphi_c(s)$ . При этом  $\Omega_u(\infty, 0) < \Omega_u(s, \varphi) < \Omega_u(0, 0)$  и  $\varphi_c(s) < \varphi_c(0)$ , где  $\Omega_u(\infty, 0)$  и  $\Omega_u(0, 0)$  и  $\varphi_c(\infty)$  и  $\varphi_c(0)$  — верхние частоты и углы отсечки для ПМСВ в ФП ( $s = \infty$ ) и в структуре феррит–металл (СФМ) ( $s = 0$ ):

$$\Omega_l = \sqrt{\Omega_H(\Omega_H + 1)}, \quad (2)$$

$$\Omega_u(\infty, 0) = \Omega_H + 0.5, \quad (3)$$

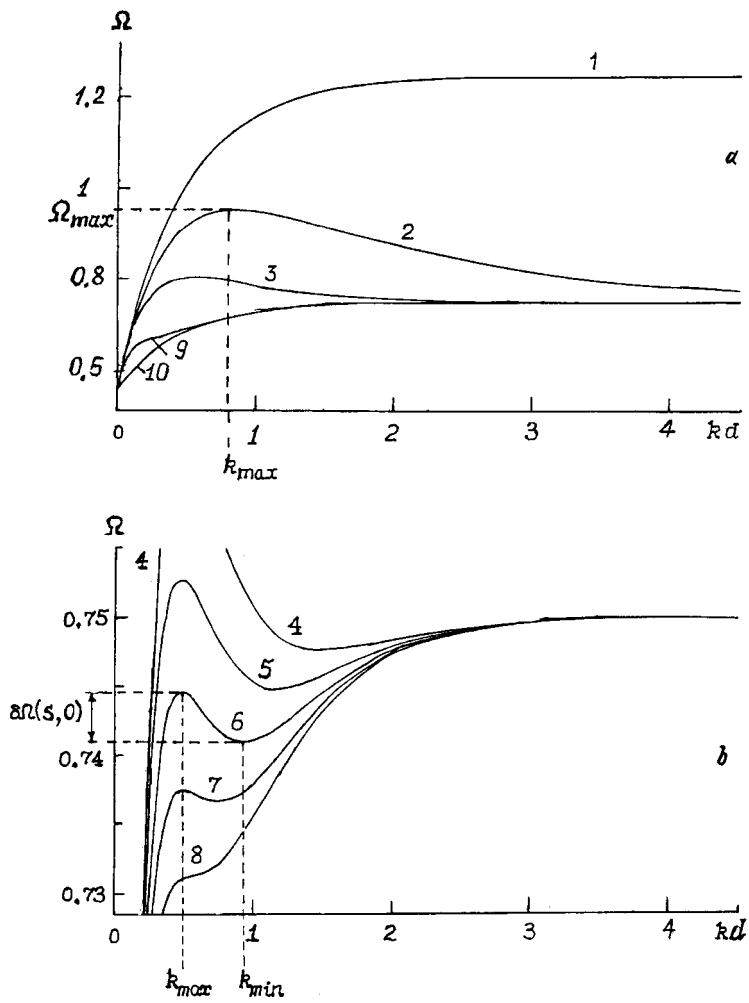
$$\varphi_c(\infty) = \arccos \left\{ \left[ \Omega + \sqrt{\Omega^2 - \Omega_H(\Omega_H + 1)} \right] (\Omega_H + 1)^{-1} \right\}, \quad (4)$$

$$\Omega_u(0, 0) = \Omega_H + 1, \quad (5)$$

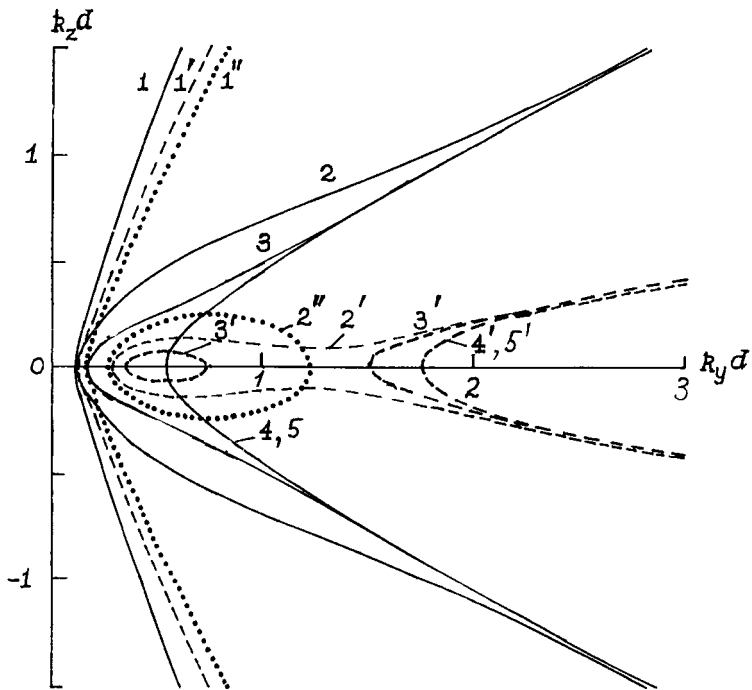
$$\varphi_c(0) = \arccos \sqrt{[\Omega^2 - \Omega_H(\Omega_H + 1)](\Omega_H + 1)^{-1}}. \quad (6)$$

На рис. 1 приведены дисперсионные кривые ПМСВ  $\Omega_s(k_y, d)$  в СФДМ с различными  $s$ . Видно, что имеются три вида зависимостей  $\Omega_s(k_y d)$ . Во-первых, в диапазоне частот  $\Omega_u(\infty, 0) < \Omega < \Omega_u(0, 0)$  функции  $\Omega_s(k_y d)$  для ПМСВ в СФДМ с малыми  $s$  ( $0 < s \leq s_{b1}$ ) имеют максимум при  $kd = k_{\max, s} d$  и стремятся к  $\Omega_u(\infty, 0)$  при  $kd \rightarrow \infty$  (кривые 2 и 3). Каждой ППМСВ с  $k < k_{\max, s}$  соответствует ОПМСВ с  $k$  в  $k_{\max, s} < k < \infty$ . Во-вторых, в диапазоне частот  $\Omega_l < \Omega < \Omega_u(\infty, 0)$  функция  $\Omega_s(k_y d)$  для ПМСВ в СФДМ с большими  $s$  ( $s \geq s_{b1}$ ) имеет максимум и минимум (кривые 4–7). ОПМСВ существуют при  $s_{b1} < s < s_{b2}$  и в интервале частот  $\delta\Omega(s, 0) \ll \Omega_l$ . ППМСВ имеют волновые числа  $k$  в интервалах  $0 < k < k_{\max, s}$  и  $k_{\min, s} < k < \infty$ , а ОПМСВ — в  $k_{\max, s} < k < k_{\min, s}$  (кривые 4–7). В-третьих, функции  $\Omega_s(k_y d)$  для ПМСВ в СФДМ с  $s_{b2} < s < \infty$  имеют точку перегиба (кривая 8) и в них вроде бы есть лишь ППМСВ.

Однако соотношение (1) задает дисперсионную поверхность  $\Omega_s(k_y, k_z)$  ( $k_y$  и  $k_z$  — проекции волнового вектора ПМСВ  $\mathbf{k}$  на оси  $y$  и  $z$ ), а закон дисперсии  $\Omega_s(k_y)$  является ее сечением плоскостью  $k_z = 0$  и не дает полной информации, которая получается при изучении, наряду с ним и ее сечений плоскостями  $\Omega_i = \text{const}$  ( $k_y, 0, k_z$ ) — кривых  $k_z(k_y)$  (аналогично ПМСВ в ФП [8,9]). На рис. 2 приведены зависимости  $k_z(k_y)$  для ПМСВ с частотами  $\Omega = 0.608, 0.695, 0.745$  и  $0.775$  в СФДМ с различными  $s$ . В ФП и в СФМ кривые  $k_z(k_y)$  похожи на гиперболы канонического вида [2,8,9] (кривые 1 и 4). Обозначим их как  $qH(\infty)$  при  $s = \infty$  и  $qH(0)$  при  $s = 0$ . Направление распространения ПМСВ на плоскости  $k_y, 0, k_z$  задано прямой, исходящей из начала координат под углом  $\varphi_0$  (далее — прямая направления; при обсуждении рис. 2 будем проводить ее мысленно). При  $|\varphi_0| < |\varphi_{c, s}|$  эта прямая пересекает  $qH(\infty)$  и  $qH(0)$  в одной точке, в которой проекция групповой скорости на направление фазовой показывает, что ПМСВ в ФП и в СФМ — прямые волны. В СФДМ прямая направления пересекает кривые  $k_z(k_y)$  в двух или трех точках. При нумерации их по увеличению  $k_y$  в первой и третьей точках существуют ППМСВ, а во второй — ОПМСВ.



**Рис. 1.** Дисперсионные кривые  $\Omega_s(k, d)$  ПМСВ в СФДМ с различными  $s$  при  $\Omega_H = 0.25$  ( $s_{b1} \approx \frac{4}{3}d$  и  $s_{b2} \approx 2d$ ). Кривые на рисунке: 1 —  $s = 0$ ; 2 —  $s = \frac{1}{3}d$ ; 3 —  $s = d$ ; 4 —  $s = 1.467d$ ; 5 —  $s = 1.6d$ ; 6 —  $s = 1.733d$ ; 7 —  $s = 1.867d$ ; 8 —  $s = 2d$ ; 9 —  $s = 4d$  и 10 —  $s = \infty$ . Для кривых 2 и 6 отмечены  $k_{\max, s'}$ ,  $k_{\min, s'}$ ,  $\Omega_u(s, 0)$ ,  $\delta\Omega_s$ .



**Рис. 2.** Зависимости  $k_z(k_y)$  для ПМСВ с частотами  $\Omega = 0.695$  (сплошные кривые),  $0.745$  (штриховые кривые) и  $0.775$  (пунктирные кривые) в СФДМ с различными  $s$  при  $\Omega_H = 0.25$ . Сплошные и пунктирные кривые: 1 —  $s = 0$ ; 2 —  $s = d$ ; 3 —  $s = 2d$ ; 4 —  $s = 4d$ ; 5 —  $s = \infty$ . Штриховые кривые: 1 —  $s = 0$ ; 2 —  $s = 1.533d$ ; 3 —  $s = \frac{5}{3}d$ ; 4 —  $s = 4d$ . На частотах  $\Omega = 0.695$  и  $0.745$  кривые 5 мало отличаются от кривых 4. На частоте  $\Omega = 0.775$  кривые 3–5 не существуют.

В СФДМ с различными  $s$ , как видно из кривых  $k_z(k_y)$  (рис. 2), ОПМСВ различных частотных диапазонов распространяются в разных интервалах изменения угла  $\varphi$  и имеют различные волновые числа.

Рассмотрим ПМСВ в СФДМ с малыми  $s$  (прямая направления пересекает кривые  $k_z(k_y)$  в двух точках). В диапазоне частот от  $\Omega_u(\infty, 0)$  до  $\Omega_u(0, 0)$  ОПМСВ существуют при изменении угла  $\varphi$  от  $-\varphi_c(0)$  до  $+\varphi_c(0)$ , так как кривые  $k_z(k_y)$  похожи на эллипсы неканонического

вида, которые лежат при  $k_y > 0$  (пунктирная кривая 2), а прямая направления может пересекать их только при  $|\varphi_0| < |\varphi_c(0)|$ . В диапазоне частот от  $\Omega_l$  до  $\Omega_u(\infty, 0)$  ОПМСВ существуют в интервале углов  $|\varphi_c(\infty)| < |\varphi_0| < |\varphi_c(0)|$ , так как кривые  $k_z(k_y)$  являются строго возрастающими функциями (сплошные кривые 2 и 3), находящимися между  $qH(0)$  и  $qH(\infty)$ , и прямая направления может пересекать их только в этом интервале углов. Кривые  $k_z(k_y)$  в точке с наименьшим значением  $k_y$  ( $k_{y,\text{inf},s}$  при  $k_z = 0$ ) близки к  $qH(0)$ ;  $k_{y,\text{inf},s}$  растет с увеличением  $s$ .

Рассмотрим ПМСВ в СФДМ с большими  $s$  (прямая направления пересекает кривые  $k_z(k_y)$  в трех точках), где существуют две ППМСВ и одна ОПМСВ. В СФДМ с  $s_{b1} < s < s_{b2}$  кривые  $k_z(k_y)$  либо состоят из двух частей, одной похожей на эллипс, а другой — на  $qH(\infty)$  (штриховая кривая 3), либо являются неразрывными кривыми, имеющими максимум (при  $k_y = k_{y,\text{max}}$ ) и минимум (при  $k_y = k_{y,\text{min}}$ ) (штриховая кривая 2). При этом  $k_{y,\text{max}} < k_{y,\text{min}} < k_{y,\text{inf},\infty}$  для кривой  $qH(\infty)$ . ОПМСВ и вторая ППМСВ существуют при изменении угла  $\varphi_0$  от  $0^\circ$  до  $\pm\varphi_c(\infty)$  в частотном интервале  $\delta\Omega(s, \varphi)$ , находящемся в диапазоне от  $\Omega_l$  до  $\Omega_u(\infty, 0)$  (при  $s \geq s_{b1}$  — около  $\Omega_u(\infty, 0)$ ). В СФДМ с  $s_{b2} < s < \infty$  кривые  $k_z(k_y)$  являются возрастающими функциями, имеющими слабо выраженные выпуклость и вогнутость (кривая 3). ОПМСВ и вторая ППМСВ существуют в узком интервале углов  $|\varphi_{c0}| < |\varphi_0| < |\varphi_c(\infty)|$ , где  $\varphi_{c0}$  — угол наклона прямой, проходящей через начало координат и вершину вогнутости. Их частотный интервал существования  $\delta\Omega(s, \varphi)$  находится в диапазоне от  $\Omega_l$  до  $\Omega_u(\infty, 0)$  (при  $s \rightarrow \infty$  — около  $\Omega_l$ ).

При анализе известного эксперимента [1,4–6], целиком посвященного изучению ПМСВ, распространяющихся только при  $\varphi_0 = 0$ , видно, что дисперсионные кривые ППМСВ в СФДМ хорошо совпадают с теоретическими. ОПМСВ не наблюдаются, а объясняют это большими потерями на их распространение (из-за малости их групповой скорости).

Однако групповая скорость ОПМСВ с  $\varphi_0 = 0$  сравнима с групповой скоростью ППМСВ (рис. 1). Наблюдение этих ОПМСВ возможно при использовании узкополосных преобразователей, возбуждающих ПМСВ с большими волновыми числами (рис. 2), и связано только с трудностями измерений при малых  $s$ , пути преодоления которых известны [5,6]. Групповая скорость ОПМСВ с  $|\varphi_c(\infty)| < |\varphi_0| < |\varphi_c(0)|$  действительно

много меньше групповой скорости ППМСВ. Наблюдение этих ОПМСВ возможно, если выбрать  $|\varphi_0| \approx |\varphi_c(\infty)|$  и использовать узкополосные преобразователи.

По нашему мнению, в [4,5] ОПМСВ не наблюдались только из-за применения широкополосных преобразователей. В [6] ОПМСВ могли возбуждаться, но роль их не выяснена, так как это не было целью работы.

Работа поддержана РФФИ (грант 96-02-17283а).

## Список литературы

- [1] Исхак В.С. // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 2. С. 86–104.
- [2] Вугальтер Г.А., Гилинский И.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 10. С. 1187–1220.
- [3] Беспятых Ю.И., Вашковский А.В., Зубков В.И. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 5. С. 1003–1008.
- [4] Есиков О.С., Толокнов Н.А., Фетисов Ю.К. // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. № 1. С. 128–132.
- [5] Валяевский А.Б., Вашковский А.В., Стальмахов А.В., Тюлюкин В.А. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. № 9. С. 1820–1830.
- [6] Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И. // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. № 7. С. 1381–1384.
- [7] Вашковский А.В., Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И. // ЖТФ. 1995. Т. 65. № 8. С. 78–89.
- [8] Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 8. С. 1617–1623.
- [9] Вашковский А.В., Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И. // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 6. С. 950–961.