

09

## **Характеристики излучения, возникающего при преобразовании обратных объемных магнитостатических волн в электромагнитные**

© В.И. Зубков, В.И. Щеглов

Учреждение Российской академии наук  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Фрязинский филиал  
E-mail: edwin@ms.ire.rssi.ru; vshcheg@mail.cplire.ru

Поступило в Редакцию 15 апреля 2008 г.

На основе модели ускоренного движения магнитных зарядов вычислена диаграмма направленности излучения электромагнитных волн, возникающего при распространении обратных объемных магнитостатических волн в ферритовой пластине, касательно намагниченной линейно спадающим полем. Показано, что диаграмма направленности состоит из двух лепестков, симметричных относительно плоскости ферритовой пластины и наклоненных к ней назад относительно направления распространения обратных объемных магнитостатических волн.

PACS: 41.20.-g, 78.20.Ci, 78.66.-w

Технологический прорыв в создании искусственных композиционных сред вызвал бум в изучении „необычных“ свойств волн, проявляющихся при их отражении и преломлении на включениях и других границах таких сред [1–3]. Он „затушевал“ тот факт, что эти свойства обусловлены тем, что волны обратные [1,2] и на самом деле ничего необычного в них нет. Подобные волны исследованы в ферритовых пленках (ФП) и планарных структурах на их основе [4], которые из-за технологичности и возможностей, связанных со способами намагничивания, до сих пор остаются реальным конкурентом композиционных сред.

В ФП существуют магнитостатические волны (МСВ) различных типов. В касательно намагниченных ФП, изучаемых ниже, МСВ могут быть как объемными (ОМСВ), так и поверхностными (ПМСВ), при

этом ОМСВ являются обратными волнами, а ПМСВ — прямыми [4]. Проявления „необычных“ свойств волн в композиционных средах, которые связаны с их отражением и преломлением, в ФП описаны в [5].

Актуальными становятся стирание „белых пятен“ в изучении преобразования волн различных типов друг в друга и сопутствующие эффекты, в частности возникновение излучения электромагнитной волны (ЭМВ). Хотя первые шаги в этом плане были сделаны еще в 60-х годах прошлого столетия [1–3], многое осталось неясным. Излучение ЭМВ может быть использовано в антенной технике, если известно его пространственное распределение (диаграмма направленности).

Ниже исследуется трансформация ОМСВ при их распространении в ситуации, когда ФП намагничена линейно-неоднородным полем. Определяются условия, в которых трансформация ОМСВ может привести к излучению ЭМВ, обусловленному ускорением МСВ.

Ранее было исследовано излучение ЭМВ, возникающее при распространении ПМСВ в ФП, намагниченной линейно возрастающим полем [6–8]. Теоретически показано [9], что его диаграмма направленности состоит из двух лепестков, симметричных относительно плоскости ФП и наклоненных к ней вперед по направлению распространения ПМСВ. В условиях эксперимента обнаруживается только один из них [6–8].

Из закона дисперсии ОМСВ [4] очевидно, что для преобразования ОМСВ в ЭМВ и излучения последней намагничивающее ФП поле должно спадать. Для расчета диаграммы направленности излучения ЭМВ будет использована та же модель ускоренного движения магнитных зарядов, что и предложенная в [9] для ПМСВ.

Геометрия задачи показана на рис. 1, где 1 — ФП толщиной  $d$  с намагниченностью насыщения  $4\pi M_0$ , 2 — преобразователь длиной  $b$ , возбуждающий обратные ОМСВ.  $Oxyz$  — система координат, плоскость  $yOz$  которой совпадает с плоскостью ФП. Поле  $H_g$  направлено вдоль оси  $Oz$  и зависит от  $z$ :

$$H_g = H_0 - \eta z, \quad \eta > 0, \quad (1)$$

где  $H_0$  — однородная составляющая.

ОМСВ с частотой  $\omega = 2\pi f$ , волновым вектором  $\mathbf{k}_m$  и фазовой скоростью  $\mathbf{v}_m$  распространяется в положительном направлении оси  $Oz$  вдоль вектора групповой скорости  $\mathbf{s}_m$ . Для обратных волн направления векторов  $\mathbf{k}_m$  и  $\mathbf{s}_m$  противоположны. ЭМВ с волновым вектором  $\mathbf{k}_e$  излучается в плоскостях, параллельных плоскости  $xOz$ , из области ФП 3,

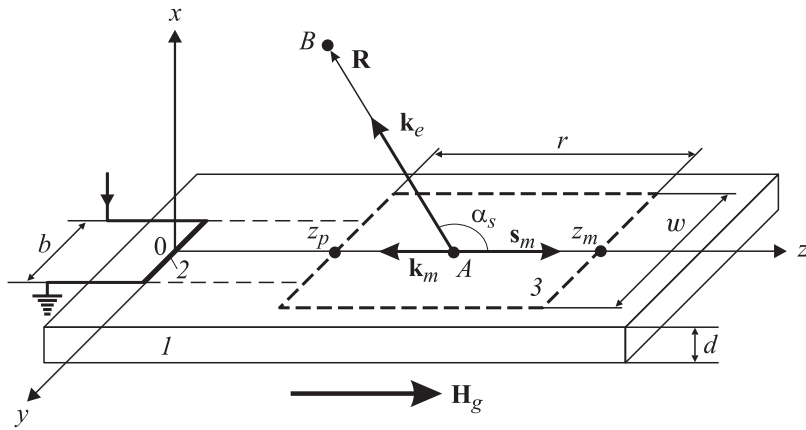


Рис. 1. Геометрия задачи.

ограниченной пунктиром на рис. 1. Ее границы по оси  $Oz$  имеют координаты  $z_p$  и  $z_m$ , длина равна  $r$ , а ширина —  $w$ . Вектор  $\mathbf{R}$  соединяет точку  $A$  области излучения с точкой наблюдения  $B$ . Направления векторов  $\mathbf{k}_e$  и  $\mathbf{R}$  совпадают, а угол между ними и осью  $Oz$ , отсчитываемый против часовой стрелки от оси  $Oz$ , равен  $\alpha_s$ .

Ускорение ОМСВ при ее распространении в поле  $H_g$  можно представить как изменение плотности магнитных зарядов. Учитывая отрицательное направление фазовой скорости ОМСВ, получаем выражение для нормированной к единице диаграммы направленности излучения ЭВМ  $U_m(R, \alpha_s)/U_0(R)$ , где  $U_m(R, \alpha_s)$  — мощность излученной волны в точке  $B$ , а  $U_0(R)$  — максимальная мощность излучения:

$$\frac{U_m(R, \alpha_s)}{U_0(R)} = \left[ \int_{z_p}^{z_m} \left( \frac{dM_y}{dz} \right) \frac{w_m \sin \alpha_s}{(1 + c^{-1} v_m \cos \alpha_s)^2} dz \right]^2, \quad (2)$$

где  $M_y$  —  $y$ -составляющая переменной намагниченности ОМСВ,  $w_m$  — фазовое ускорение ОМСВ,  $c$  — скорость ЭМВ. В соответствии с (1) величины  $M_y$ ,  $v_m$  и  $w_m$  зависят от координаты  $z$ . Величины  $M_y$ ,  $v_m$ ,  $w_m$ ,  $z_p$  и  $z_m$  для ОМСВ определяются аналогично подобным в [9].

Дисперсионное соотношение для ОМСВ имеет вид [4]:

$$\mu + 1 + 2\sqrt{-\mu} \operatorname{ctg}[(\sqrt{-\mu})^{-1}kd] = 0, \quad (3)$$

где

$$\mu = 1 + \omega_H \omega_M [\omega_H^2 - \omega^2]^{-1}, \quad (4)$$

$\omega_H = \gamma H_g$ ,  $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$ ,  $\gamma$  — гиромагнитная постоянная.

Распределение магнитных зарядов, создаваемых ОМСВ вдоль оси  $0z$ , периодически, в результате чего вклады в суммарную энергию ЭМВ от зарядов различных знаков взаимно компенсируются. Длина ОМСВ при распространении в поле  $H_g$ , задаваемом (1), увеличивается, поэтому нескомпенсированным остается лишь излучение из участка на конце области распространения ОМСВ (вблизи координаты  $z_m$ ). На этом участке ускорение  $w_m$  увеличивается, стремясь к бесконечности при приближении к  $z_m$ , а производная  $dM_y/dz$  уменьшается, стремясь к нулю. Произведение  $w_m(dM_y/dz)$  имеет максимум при  $z = z_s$  ( $z_p < z_s < z_m$ ). Между  $z_p$  и  $z_m$  фазовая скорость ОМСВ приближается к скорости ЭМВ и меняется мало. Это позволяет считать, что основной вклад в выражение (2) определяется значением скорости  $v_m$  вблизи  $z = z_s$  и благодаря малости участка между  $z_p$  и  $z_m$  скорость  $v_m$  и ускорение  $w_m$  в его пределах можно заменить их средними значениями:

$$v_{m0} = \frac{\omega(k|_{z=z_p} - k|_{z=z_m})}{2k|_{z=z_p}k|_{z=z_m}}, \quad (5)$$

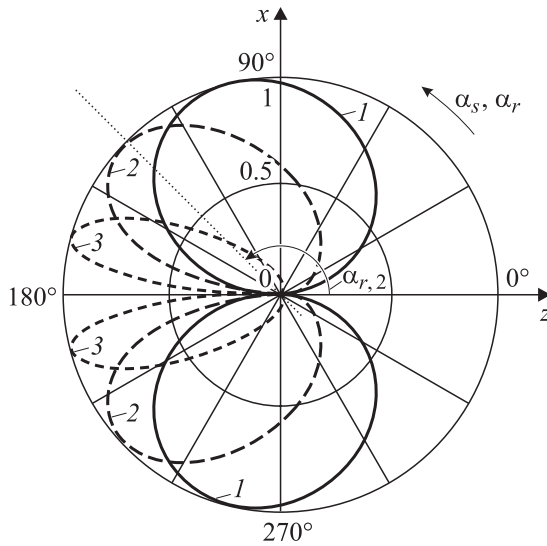
$$w_{m0} = \frac{\omega^2(k|_{z=z_p} - k|_{z=z_m})^2}{2(z_m - z_p)(k|_{z=z_p}k|_{z=z_m})^2}. \quad (6)$$

При подстановке (5) и (6) в (2) интеграл легко вычисляется.

Излучение возможно в частотном диапазоне ниже частоты

$$\omega_l = \sqrt{\omega_H(\omega_H + \omega_M)}. \quad (7)$$

Из (2) следует вид нормированной диаграммы направленности, расположенной на плоскости  $x0z$  в круге единичного радиуса, в форме двух симметричных лепестков, похожих на эллипсы, развернутые так, что они имеют горизонтальную касательную в плоскости  $x0y$  в начале координат. Характеристиками такой диаграммы являются наклон и



**Рис. 2.** Нормированная диаграмма направленности излучения ЭМВ.

ширина лепестка. Угол наклона  $\alpha_r$  — угол наклона прямой, соединяющей начало координат с единичным значением „амплитуды“ лепестка, а ширина — малая ось эллипса. В (2) дробь в подынтегральном выражении определяет величину угла  $\alpha_r$ , а производная  $dM_y/dz$  — ширину лепестка.

На рис. 2 показаны нормированные диаграммы направленности излучения первой моды ОМСВ с частотой  $f = 2400$  GHz ( $f < f_l = 2411$  GHz) для значений  $v_{m0}c^{-1}$ , равных 0.1, 0.5 и 0.9 (кривые 1–3), при тех же значениях параметров  $H_\theta$ ,  $4\pi M_0$  и  $\eta$ , что и в [7,9]. Угол  $\alpha_r$  отмечен только на кривой 2. Лепестки диаграмм направленности имеют описанный выше вид и наклонены назад от направления распространения волны (угол  $\alpha_r > 90^\circ$ ). С увеличением значения  $v_{m0}c^{-1}$  их ширина уменьшается, а угол  $\alpha_r$  растет. Из сравнения рис. 2 с рис. 2 из [9] следует, что принципиальное отличие излучения ОМСВ от излучения ПМСВ состоит именно в наклоне лепестков диаграммы направленности (назад от направления распространения ОМСВ и вперед для ПМСВ). Это отличие обусловлено

обратным характером ОМСВ и различием намагничивающих полей  $H_g$  (спадающее и возрастающее). Излучение ОМСВ похоже на излучение ПМСВ той же формой лепестка диаграммы и зависимостью его ширины от параметра  $v_{m0}c^{-1}$  (сжатие при увеличении  $v_{m0}c^{-1}$ , различное для ОМСВ и ПМСВ).

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 07-02-00233-а.

## Список литературы

- [1] *Веселаго В.Г.* // УФН. 1967. Т. 92. № 3. С. 517–526.
- [2] *Lindell I.V., Tretyakov S.A., Nikoskinen K.I., Ilvonen S.* // *Micr. Opt. Tech. Lett.* 2001. V. 31. N 2. P. 129–133.
- [3] *Бырдин В.М.* // РЭ. 2005. Т. 50. № 12. С. 1413–1438.
- [4] *Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1993.
- [5] *Вашковский А.В., Локк Э.Г.* // УФН. 2006. Т. 176. № 4. С. 403–414.
- [6] *Вашковский А.В., Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И.* // РЭ. 1993. Т. 38. № 5. С. 818–824.
- [7] *Вашковский А.В., Локк Э.Г.* // РЭ. 1995. Т. 40. № 7. С. 1030–1137.
- [8] *Вашковский А.В., Локк Э.Г.* // РЭ. 2004. Т. 49. № 8. С. 966–972.
- [9] *Зубков В.И., Щеглов В.И.* // РЭ. 2001. Т. 46. № 4. С. 433–440.