

## Векторные линии поля высокочастотной магнитной индукции поверхностной спиновой волны, распространяющейся в касательно намагниченной ферритовой пластине

*На основе уравнений Максвелла получены уравнения для векторных линий СВЧ полей дипольной спиновой волны в касательно намагниченной ферритовой пластине. Найдено, что векторные линии поля высокочастотной магнитной индукции образуют противоположно направленные вихри, локализованные вблизи противоположных поверхностей пластины. Обнаружено, что векторы СВЧ магнитного поля и СВЧ магнитной индукции внутри ферритовой пластины в целом направлены противоположно. Установлена взаимосвязь между СВЧ магнитной индукцией и электрическим полем волны.*

**Ключевые слова:** ферритовая пластина, спиновая волна, СВЧ магнитная индукция, структура СВЧ поля

Казалось бы, все свойства поверхностной спиновой волны, распространяющейся в касательно намагниченной ферритовой пластине перпендикулярно внешнему магнитному полю  $\mathbf{H}_0$  (и известной также как поверхностная магнитостатическая волна [1]) уже изучены. Однако, структура поля СВЧ магнитной индукции  $\mathbf{b}$  спиновой волны до сих пор не исследовалась. Очевидно, что имеет смысл рассматривать структуру поля  $\mathbf{b}$  лишь в совокупности со структурой остальных электромагнитных величин – электрического поля  $\mathbf{e}$ , магнитного поля  $\mathbf{h}$  и намагниченности  $\mathbf{m}$ , поскольку все эти поля взаимосвязаны и в совокупности представляют собой общее электромагнитное СВЧ поле спиновой волны. Поэтому ниже рассчитана структура всех перечисленных полей. Отметим, что структура полей  $\mathbf{h}$  и  $\mathbf{m}$  уже исследовалась ранее (см. например, [1, 2]), а структура поля  $\mathbf{e}$  – в [3 -5].

Пусть поверхностная спиновая волна с частотой  $f$  распространяется вдоль оси  $y$  в касательно намагниченной ферритовой пластине толщиной  $s$  (рис. 1).

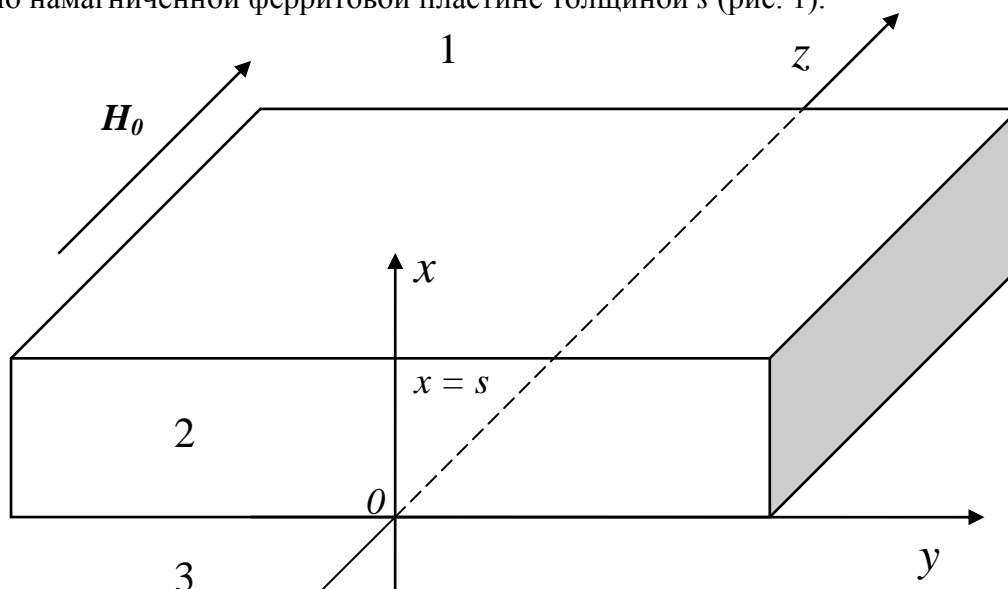


Рисунок.1. Геометрия задачи: 1, 3 – полупространства вакуума, 2 – ферритовая пластина, намагниченная до насыщения внешним однородным магнитным полем  $\mathbf{H}_0$ .

Исходя из уравнений векторного анализа (см., например, [6] с.45-47), запишем уравнения для векторных линий СВЧ полей спиновой волны в каждой из сред ( $j = 1, 2, 3$ ):

$$\frac{dx}{\operatorname{Re}(h_{jx})} = \frac{dy}{\operatorname{Re}(h_{jy})}, \quad \frac{dx}{\operatorname{Re}(b_{jx})} = \frac{dy}{\operatorname{Re}(b_{jy})}, \quad \frac{dx}{\operatorname{Re}(m_{jx})} = \frac{dy}{\operatorname{Re}(m_{jy})} \quad (1)$$

Остановимся подробнее на выводе уравнения для векторных линий магнитной индукции  $\mathbf{b}$ . Очевидно, что в полупространствах 1 и 3, где  $\mu_1 = \mu_3 = \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1$ , эти уравнения совпадают с уравнениями векторных линий для магнитного поля  $\mathbf{h}$ . В ферритовой пластине

$$\mathbf{b}_2 = \mathbf{h}_2 + 4\pi\mathbf{m}_2 \quad \text{или} \quad \mathbf{b}_2 = \overrightarrow{\mu}_2 \mathbf{h}_2 \quad \text{или} \quad \begin{cases} b_{2x} = \mu h_{2x} + i\nu h_{2y} \\ b_{2y} = -i\nu h_{2x} + \mu h_{2y} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mu$  и  $\nu$  – диагональная и недиагональная компоненты тензора магнитной проницаемости  $\overrightarrow{\mu}_2$ . Подставляя в (2) выражения для компонент  $h_{2x}$  и  $h_{2y}$  (которые можно найти, например, в [7]), несложно привести (2) к виду:

$$\begin{cases} b_{2x} = k_y \exp(-ik_y y) (A \exp(k_{2x} x) + B \exp(-k_{2x} x)) / k_0 \\ b_{2y} = -ik_{2x} \exp(-ik_y y) (A \exp(k_{2x} x) - B \exp(-k_{2x} x)) / k_0 \end{cases} \quad (3)$$

Сравнивая (3) и выражения (7) для поля  $\mathbf{e}$  в [7] видно, что справедливо соотношение

$$b_{2x} = e_{2z} k_y / k_0. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (1), упрощая и интегрируя полученное уравнение, получим для (1):

$$k_{2x} x - \ln|1 + \xi \exp(2k_{2x} x)| - \ln|\sin(k_y y)| = k_y C'_2, \quad (5)$$

Здесь,  $k_0 = \omega/c$ ,  $k_y$  и  $k_{2x}$  – постоянная распространения и  $x$ -компонента волнового вектора,  $C'_2$  – константа, возникающая при интегрировании, а величина  $\xi$  определяется выражением:

$$\xi = \frac{k_{2x} + \frac{\nu}{\mu} k_y - \frac{\mu_{\perp}}{\mu_1} k_{1x}}{k_{2x} - \frac{\nu}{\mu} k_y + \frac{\mu_{\perp}}{\mu_1} k_{1x}} \exp(-2k_{2x} s) \quad (6)$$

Уравнение (5) описывает векторные линии магнитной индукции  $\mathbf{b}$  поверхностной спиновой волны внутри ферритового слоя. Аналогичным образом из (1) можно получить уравнения для векторных линий СВЧ магнитного поля  $\mathbf{h}$  и намагниченности  $\mathbf{m}$  спиновой волны. На рис. 1 приведены векторные линии СВЧ магнитной индукции  $\mathbf{b}$ , магнитного поля  $\mathbf{h}$  и намагниченности  $\mathbf{m}$  поверхностной спиновой волны, а на рис. 2 – нормированные зависимости амплитуд компонент СВЧ полей этой волны. Приведенные на рис. 1 и 2 зависимости рассчитаны при значении  $H_0 = 300$  Э и следующих ферритовой пластины и спиновой волны:  $\varepsilon_2 = 15$ ,  $4\pi M_0 = 1750$  Гс,  $s = 10$  мкм,  $k_y = 1000$  см<sup>-1</sup>. При данном значении  $k_y$  частота спиновой волны равна  $f = 3167$  МГц.

Как показали расчеты (рис. 1в), векторные линии магнитной индукции образуют вихри, локализованные вблизи обеих поверхностей ферритовой пленки, тогда как векторные линии магнитного поля не имеют вихревой структуры (рис. 1а). Следует отметить, что векторы  $\mathbf{b}_2$  и  $\mathbf{h}_2$  внутри ферритовой пластины в целом направлены противоположно, хотя в окружающих пленку полупространствах структуры полей  $\mathbf{b}$  и  $\mathbf{h}$  совпадают (ср. рис. 1а и 1в). Такая

ситуация возникает из-за того, что  $\mathbf{b}_2 = \mathbf{h}_2 + 4\pi\mathbf{m}_2$ , а векторы  $\mathbf{m}_2$  и  $\mathbf{h}_2$  также в целом направлены противоположно, причем, как правило,  $m_2 > h_2$ .

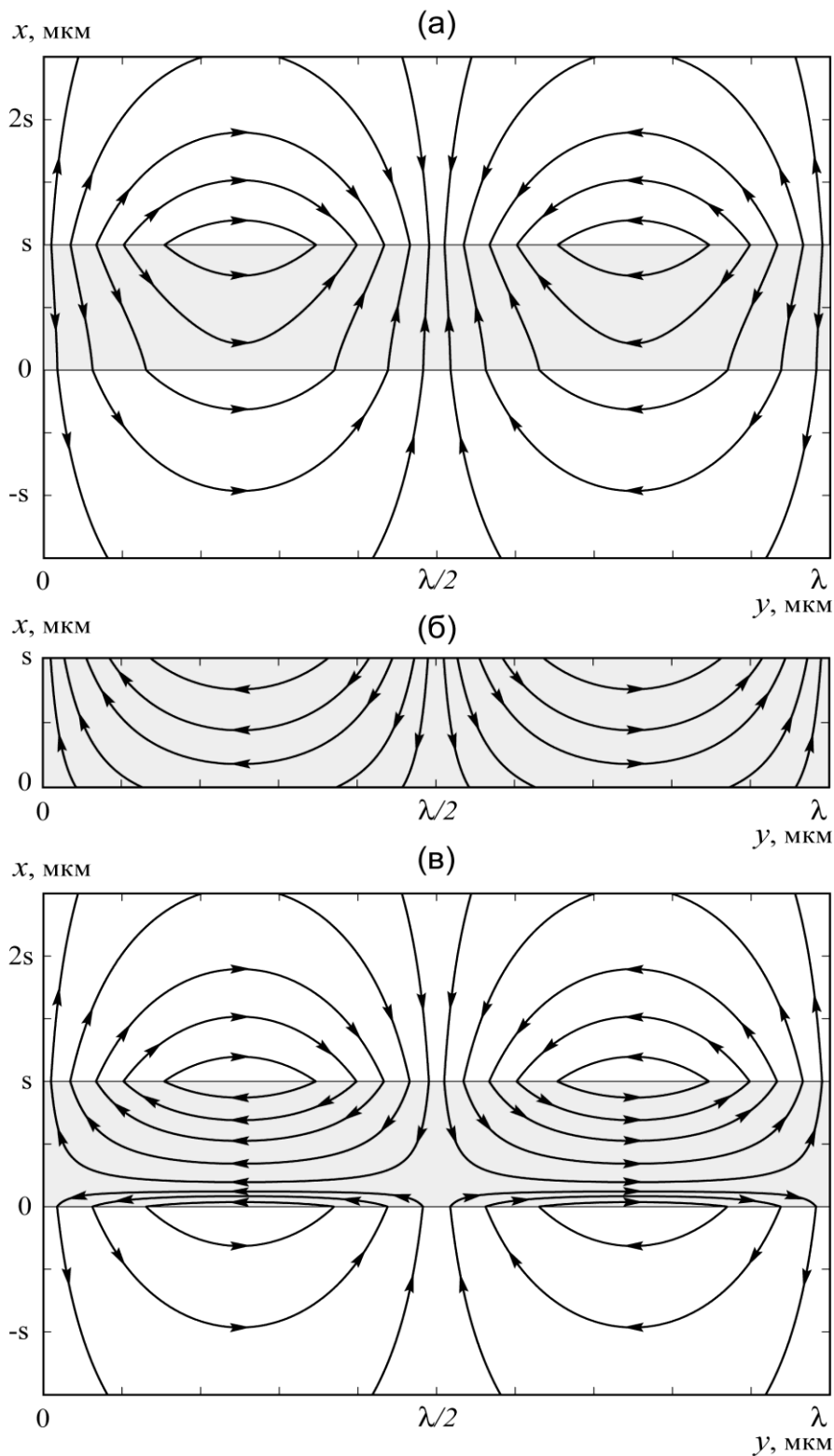


Рисунок. 2. Структура СВЧ магнитного поля  $\mathbf{h}$  (а), намагниченности  $\mathbf{m}$  (б) и магнитной индукции  $\mathbf{b}$  (в) поверхностной спиновой волны в ферритовой пленке толщиной  $s$  и в прилегающих к пленке полупространствах вакуума.

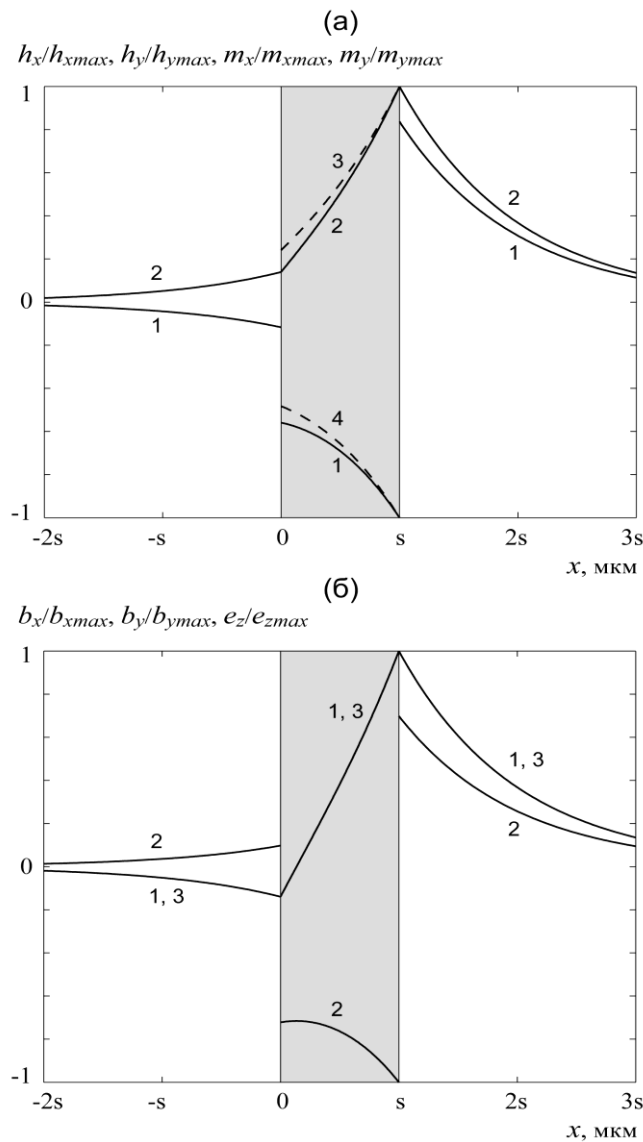


Рисунок 3. Распределение нормированных амплитуд компонент СВЧ магнитного поля  $h_x$  и  $h_y$ , намагниченности  $m_x$  и  $m_y$ , магнитной индукции  $b_x$  и  $b_y$  и электрического поля  $e_z$  в направлении оси  $x$ , перпендикулярной плоскости ферритовой пленки. (а): 1 –  $h_x/h_{xmax}$ , 2 –  $h_y/h_{ymax}$ , 3 –  $m_x/m_{xmax}$ , 4 –  $m_y/m_{ymax}$ . (б): 1 –  $b_x/b_{xmax}$ , 2 –  $b_y/b_{ymax}$ , 3 –  $e_z/e_{zmax}$ .

Внутри ферритовой пластины существует координата  $x = x_0$ , при которой величины  $e_z$  и  $b_x$ , проходя через ноль, меняют знак (рис. 2б, кривые 1 и 3), что для величины  $e_z$  было обнаружено ранее [3, 4]. Значение  $x_0$  определяется формулой

$$x_0 = \frac{1}{2k_{2x}} \ln \left| -\frac{1}{\xi} \right|. \quad (7)$$

Отметим, что согласованная расстановка стрелок на векторных линиях полей  $\mathbf{h}$ ,  $\mathbf{m}$  и  $\mathbf{b}$  на рис. 1 осуществлена с помощью амплитудных зависимостей, представленных на рис. 2. Рассмотрим кратко, как это было сделано. Зафиксируем для простоты координату  $y$ : пусть  $y = \lambda/10$ . Будем считать (см. рис. 2б, кривая 3), что при данном значении  $y = \lambda/10$  поле  $e_{jz}$

принимает отрицательные значения при  $x < x_0$  (это означает, что вектор  $\mathbf{e}_z$  направлен противоположно оси  $z$ , то есть, направлен от плоскости рисунка 2 к читателю) и положительные значения – при  $x > x_0$  (это значит, что вектор  $\mathbf{e}_z$  сонаправлен с осью  $z$ , то есть, направлен от читателя к плоскости рис. 2). Поскольку зависимость  $b_{jx}(x)$  совпадает с зависимостью  $e_{jz}(x)$  (рис. 2б, кривые 1 и 3), то имеем  $b_{jx} < 0$  при  $x < x_0$  и  $b_{jx} > 0$  при  $x > x_0$  и, следовательно, при  $y = \lambda/10$  и  $x < x_0$  проекция любого вектора<sup>1</sup>  $\mathbf{b}$  на ось  $x$  должна быть направлена противоположно оси  $x$ , а при  $y = \lambda/10$  и  $x > x_0$  – вдоль оси  $x$ . Так как значения  $x$ -компоненты СВЧ намагниченности  $m_{jx}$  всегда положительны (рис. 2а, кривая 3), то проекция любого вектора  $\mathbf{m}$  на ось  $x$  при  $y = \lambda/10$  должна быть направлена вдоль оси  $x$ . При определении направления линий СВЧ магнитного поля  $\mathbf{h}$  будем исходить из того, что  $h_{jx} < 0$  при  $x < s$  и  $h_{jx} > 0$  при  $x > s$  (рис. 2а, кривая 1) и, следовательно, при  $y = \lambda/10$  и  $x < s$  проекция любого вектора  $\mathbf{h}$  на ось  $x$  должна быть направлена противоположно оси  $x$ , а при  $y = \lambda/10$  и  $x > s$  – вдоль оси  $x$ . Таким образом, приведенные рассуждения дают возможность определить направления векторных линий СВЧ магнитного поля  $\mathbf{h}$ , намагниченности  $\mathbf{m}$  и магнитной индукции  $\mathbf{b}$ . Очевидно также, что для координаты  $y$ , лежащей на расстоянии  $\lambda/2$  от выбранного значения ( $y = \lambda/10$ ) направления векторных линий всех СВЧ полей будет противоположным.

Полученная картина векторных линий СВЧ полей существенно расширяет наши представления о структуре СВЧ полей и физических свойствах поверхностной спиновой волны, и, в частности, подтверждает взаимосвязь (вытекающую из уравнений Максвелла) между структурами СВЧ электрического поля и СВЧ поля магнитной индукции поверхностной спиновой волны.

#### Библиографический список

1. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic Modes of a Ferromagnetic Slab. // J. Phys. Chem. Sol., 1961, v.19, №3/4, p.308-320.
2. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны / М.: Наука, 1994. -464с.
3. Вашковский А. В., Локк Э. Г. Характеристики поверхностной магнитостатической волны в структуре феррит-диэлектрик, помещенной в медленно меняющееся неоднородное магнитное поле / Радиотехника и электроника. – 2001 – Т. 46, №10 – С. 1257-1265.
4. Локк Э. Г. Распространение поверхностных магнитостатических волн в композитной структуре феррит – решетка металлических полосок / Радиотехника и электроника. – 2005 – Т. 50, №1 – С. 74-81.
5. Вашковский А.В., Локк Э.Г. О взаимосвязи энергетических и дисперсионных характеристик магнитостатических волн в ферритовых структурах // Успехи физ. Наук – 2011- Т. 181 - №3 - С. 293-304.
6. Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И. Векторный Анализ: Задачи и примеры с подробными решениями. — М.: Едиториал УРСС, 2002. — 144 с.
7. Локк Э.Г. Спиновые волны в структуре диэлектрик-феррит-диэлектрик, граничащей с «магнитными стенками» или идеальными проводниками (на основе уравнений Максвелла) / Э.Г. Локк // - Радиотехника и электроника – 2014 – Т. 59, №5.

<sup>1</sup> В соответствии с математическим смыслом векторных линий поля, здесь и ниже подразумевается любой вектор, построенный на рис. 2 по касательной к линии поля в точке пересечения этой линии с прямой  $y = \lambda/10$ .