

ФИЗИКА

УДК 621.396.029.6

МАГНИТНОЕ КАЧАНИЕ СВЧ-ПОЛЯ В ОБЛУЧАТЕЛЯХ
НА ПОЛИСЛОЙНЫХ ФЕРРИТОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХканд. техн. наук А.Л. АДАМОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ,
О.В. МОЖЕЙКО, А.В. ЛАПТИНСКИЙ

(Полоцкий государственный университет),

д-р техн. наук, проф. С.П. КУНДАС

(Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, Минск)

Проведено численное моделирование электродинамической задачи в системе облучателя с ферритовыми элементами, приобретающими анизотропные магнитные свойства под действием постоянного подмагничивающего поля. Показано и проанализировано влияние напряженности поля подмагничивания на коэффициент отражения, магнитных потерь и распределения СВЧ-поля в апертуре рупора.

Проблема управления распределением энергией СВЧ-поля особенно актуальна для сверхразмерных (с размерами, значительно превышающими рабочую длину волны) технологических камер, где неизбежно образование интерференционной картины поля. Использование металлических рассеивателей поля неприемлемо ввиду их разогрева наводимыми токами и необходимости определенной пространственной регулировки их положения в камере в процессе работы.

Для управления полем в лучевых камерах предложено [1] использовать известное явление возникновения анизотропии магнитных свойств ферритов в присутствии низкочастотного подмагничивающего поля. Механизм распространения СВЧ-поля в ферритах, также как и явление ферромагнитного резонанса, широко исследовался в работах Гуревича, Ситидзе и др. [2 – 5] и используется в ферритовых СВЧ-устройствах: вентилях, Y-циркуляторах, фазовращателях и т.д.

Сдует отметить, что большая сложность расчета таких электродинамических систем с элементами сложной формы и анизотропным заполнением делает невозможным аналитический расчет и приводит к необходимости использования численных методов расчета МКЭ (FEM), МКР (FDTD).

Рассмотрим электродинамическую систему (рис. 1), границами которой является H -секториальный рупор, питаемый через прямоугольный волновод (тип волн H_{01}) вдоль оси z . Возбуждаемая электромагнитная волна проходит через тонкие ферритовые диски, размещенные в месте сочленения волновода и рупора. Постоянное магнитное поле H , приложенное к ферритам в направлении оси y , вызывает пространственную анизотропию комплексной магнитной проницаемости феррита. В результате различия фазовых скоростей распространения левополяризованной и правополяризованных магнитных волн высокочастотного поля при прохождении через феррит произойдет смещение результирующей электромагнитной волны. Величина этого отклонения, степень согласования ферритовой системы и мощность магнитных потерь будет сложным образом зависеть от величины и равномерности постоянного подмагничивающего поля, размеров ферритовых дисков и их пространственного положения в облучателе.

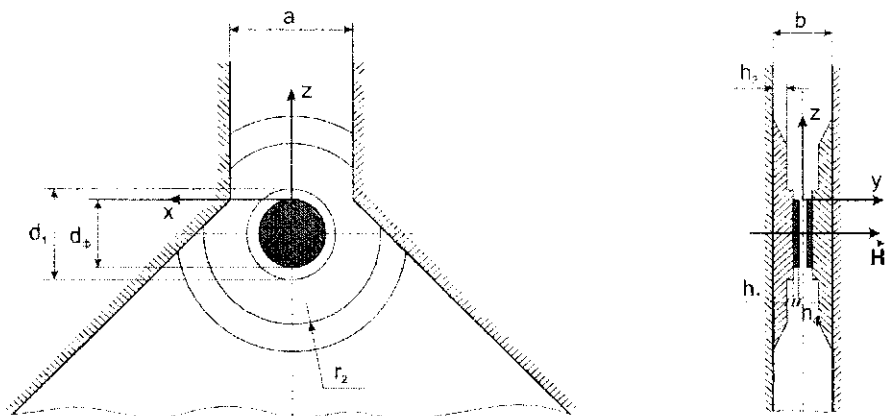


Рис. 1. Геометрия электродинамической задачи

При расчете магнитной проницаемости феррита $\mu(H, f)$, т.е. ее тензорной величины, в функции напряженности магнитного поля H , А/м, и частоты f , Гц, использовались дисперсионные выражения для гиротропных сред с учетом магнитных потерь:

$$\mu(H, f) = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_0(H, f) & 0 & j\mu_2(H, f) \\ 0 & 1 & 0 \\ -j\mu_2(H, f) & 0 & \mu_1(H, f) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\mu_1(H, f) = \mu_1'(H, f) - j\mu_1''(H, f) = \mu_\infty + \frac{f_m(f_l + jf\alpha)}{(f_l + jf\alpha)^2 - f^2}; \quad (2)$$

$$\mu_2(H, f) = \mu_2'(H, f) - j\mu_2''(H, f) = \frac{f \cdot f_m}{(f_l + jf\alpha)^2 - f^2}, \quad (3)$$

где f_l – частота ферромагнитного резонанса (Ларморова частота), Гц, $f_l = \mu_0 \gamma H$; f_m – гиротропная частота, Гц, $f_m = \gamma M_s$; H – напряженность внутреннего магнитного поля в феррите, определяемая с учетом поля анизотропии и размагничивающих факторов (направлено по y), А/м; M_s – намагниченность насыщения, Тл; $\mu_\infty = 1$; γ – гиромагнитное отношение $\gamma = 0,035176$ МГц·м/А; g – фактор Ланда; α – безразмерный коэффициент, характеризующий потери $\alpha = \gamma \Delta H / (2f_{\Delta H})$; ΔH – ширина линии ферромагнитного резонанса на частоте $\omega_{\Delta H}$, Гц, на уровне 0,5, А/м.

Следует отметить, что указанные зависимости (1)...(3) выводятся из уравнения движения намагниченности, полученного Ландау и Лившицем для образцов, намагниченных до насыщения.

На рисунке 2 представлены зависимости элементов тензора $\mu(H, f)$, рассчитанные для бесконечно-го образца из феррограната Y – Gd – Al – Co – Tb(Sm) высокого уровня мощности марки 20СЧ8М: $M_s = 1280$ Гс (0,128 Т); $g = 2,0$ и $\Delta H = 60$ Э ($4,775 \cdot 10^3$ А/м) (при $f_{\Delta H} = 9,4$ ГГц).

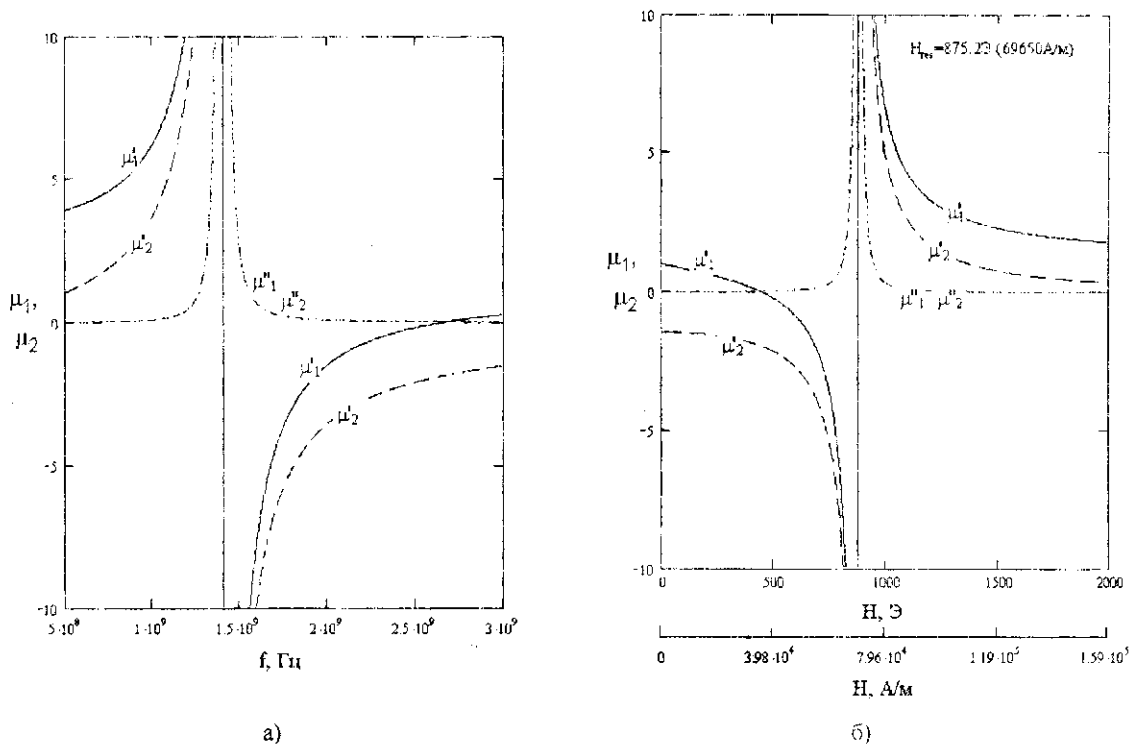


Рис. 2. Зависимость компонентов тензора магнитной проницаемости намагниченного феррита от частоты при $H = 500$ Э (39790 А/м) (а) и напряженности подмагничивающего поля при $f = 2,45$ ГГц (б)

Численный электродинамический расчет производился для геометрических размеров системы: $a = 90$ мм; $b = 45$ мм; $d_{\phi} = 48$ мм; $h_{\phi} = 3,5$ мм; $d_1 = 64$ мм; $h_1 = 5$ мм; $r_2 = 65$ мм; $h_2 = 10,5$ мм.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования, отражающие изменение удельной мощности, а точнее его максимального локального значения $P_{\text{max, локал}}$ в объеме ферритового диска, модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ и характер распределения амплитуды электрической напряженности $|E|$ СВЧ-поля в зависимости от магнитного поля подмагничивания H .

Как видно (рис. 3, а) при увеличении H во всем диапазоне от 0 до 700 Э (55700 А/м) коэффициент отражения $|S_{11}|$ не возрастает и находится в пределах 0,2...0,4. Одновременно происходит смещение максимума напряженности СВЧ-поля в раскрытие рупора (рис. 3, б), а при значениях более 500 Э распределение поля приобретает двухвершинный характер, причем в целом значение $|E|$ снижается, что связано с увеличением потерь в феррите при таких напряженностях H .

Очевидно, что увеличение магнитных потерь (см. рис. 3, а) вблизи 400...500 Э обусловлено резким ростом мнимой части магнитной проницаемости, т.е. приближением к области ферромагнитного резонанса при $H = 875,2$ Э на данной рабочей частоте.

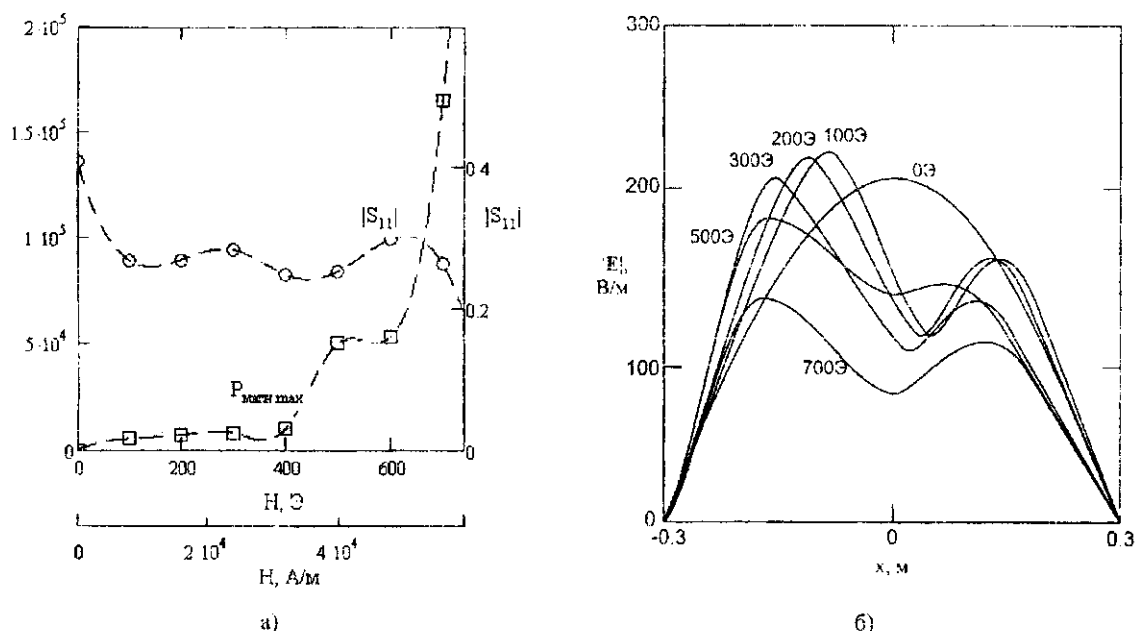


Рис. 3. Зависимости $P_{\text{max, локал}}$, $|S_{11}|$ и распределение $|E|$ при различных значениях H

При расчете магнитной системы в целом необходимо учитывать, что для реальных образцов ферритов конечных размеров внутренне магнитное поле будет отличаться от внешнего приложенного поля. Для точного расчета распределения внутреннего магнитного поля потребуется решить соответствующую задачу магнитостатики.

Внутреннее макроскопическое поле складывается из внешнего магнитного поля и размагничивающих полей, зависящих от размеров и форм образца и его ориентации относительно внешнего магнитного поля:

$$H_{\text{ext}} = H + N \frac{M_s}{\mu_0},$$

где N – размагничивающий фактор.

Размагничивающие факторы для разных форм образцов табулированы, в частности, для тонкого диска диаметром d , м, и толщиной l , м, [6]:

$$N = 1 - \left(\frac{l}{d} \right) \left(1 + \frac{l^2}{d^2} \right)^{0.5}.$$

За максимальную напряженность магнитного поля в ферритовом диске (изменение H в лорезонансной области) можно принять напряженность H_{res} возникновения ферромагнитного резонанса на данной рабочей частоте СВЧ-поля, где магнитная проницаемость принимает аномальные значения.

Максимальная напряженность поля магнитной системы H_{max}^{ext} , А/м, подмагничивающей феррит в направлении оси y (перпендикулярно поверхности диска) с учетом размагничивающих факторов, должна быть:

$$H_{max}^{ext} = H_{res} + N_y \frac{M_s}{\mu_0}; \quad H_{res} = \frac{f_{res}}{\gamma},$$

где f_{res} частота ферромагнитного резонанса, $f_{res} = 2,45$ ГГц.

Для снижения краевых эффектов в виде искажения силовых линий поля на ферритовых дисках диаметр сердечника соленоида должен быть больше диаметра диска.

Рассмотренное взаимодействие ферритов, намагничиваемых постоянным полем, с СВЧ-полем в лучевых облучателях позволяет с низкими значениями коэффициента отражения и магнитных потерь реализовать процессы управления смещением поля по объему материала и, таким образом, управлять тепловыделением и усреднять тепловые процессы с повышением их равномерности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2160 U BY, МПК F 26B 3/347, H 05B 6/64. СВЧ-печь для термообработки материалов / Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Кундас С.П. – № u 20050075; Заявл. 16.02.2005; Оpubл. 30.09.2005 // Афіцыйны бюлетэнь / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. – 2005. – № 3(46). – С. 253.
2. Гуревич А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. – М.: Физ.-мат. издат., 1962. – 410 с.
3. Смоленский Г.А., Леман В.В. Ферриты и их техническое применение. – Л.: Наука, 1975 – 219 с.
4. Ситидзе Ю., Сато Х. Ферриты. – М.: Мир, 1970. – 407 с.
5. Некоторые применения ферритов в антенно-волноводной технике: Сб. сокр. переводов из иностр. журн. / Под. ред. А.Л. Микаэляна. – М.: Сов. радио, 1958. – 255 с.
6. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. – М.: Сов. радио, 1965, Т. 2. – 784 с.