

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Введение

Актуальная тенденция миниатюризации функциональных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов обуславливает поиск новых походов к решению этой задачи, в том числе и поиск новых материалов. Среди наиболее перспективных направлений решения этой задачи можно выделить направление с использованием метаматериалов – искусственных композитных структурированных сред, электрический и магнитный отклик которых существенно отличается от отклика составляющих метаматериал сред. Такого рода среды могут найти применение как в качестве поглощающих сред, так и при проектировании частотно-селективных устройств, антенн различных типов, в том числе антенн поверхностных волн. Использование метаматериалов в качестве подложек таких антенн позволяет не только существенно уменьшить геометрические размеры, но и существенно расширить рабочую полосу частот, управлять шириной основного лепестка, повышать эффективность излучения и т.д. [1 – 3].

Под метаматериалами понимают материалы, свойства которых обусловлены не столько индивидуальными физическими свойствами их компонентов, сколько специфической микро- и макроструктурой. Макроструктура таких материалов может быть обусловлена периодичностью системы однотипных элементов. В качестве однотипных элементов могут использоваться либо плоские или объемные диэлектрические или металлические элементы различной формы, либо композитные материалы.

В данной работе в качестве одиночного элемента будем рассматривать диэлектрические шайбы. В реальной ситуации они могут быть выполнены из карбонизированной гидроксилпатитовой керамики ($CaO - P_2O_5 - SiO_2 - Fe_2O_3$). Такое вещество может стать основой композитных компонентов по нескольким причинам. Во-первых, достаточно хорошо развита технология его создания [4 – 7]. Во-вторых, у карбонизированной гидроксилпатитовой керамики наблюдается достаточно сильная зависимость относительной диэлектрической проницаемости от частоты. За счет изменения композиции элементов, входящих в вещество, удастся управлять этой зависимостью. Отметим, что магнитные свойства могут проявляться благодаря наличию магнетитов (Fe_2O_3) [8, 9]. Тонкие слои упомянутого вещества (длина $< 0.05\lambda$) могут рассматриваться как однородный изотропный диэлектрик.

Цель данной работы – определение оптимальной зависимости относительной диэлектрической проницаемости одного слоя композитного диэлектрика от частоты, при которой многослойной структуре можно поставить в соответствие диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_M < 0$ в круглом волноводе при условии, что на систему набегают H_{11} - волна. Каждый слой рассматривается как диэлектрическая шайба, радиус которой совпадает с радиусом волновода.

Система диэлектриков

Рассмотрим круглый волновод радиуса a , заполненный материалами с относительной диэлектрической проницаемостью ε_1 при $z < 0$ и $z > d + NL$, ε_2 при $0 < z < d$ и $d + nL + h < z < d + (n+1)L$, ε_3 при $d + nL < z < d + h + nL$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, где $2N+1$ – количество слоев. Относительная магнитная проницаемость всех сред $\mu = 1$. Схематическое изображение структуры представлено на рис. 1.

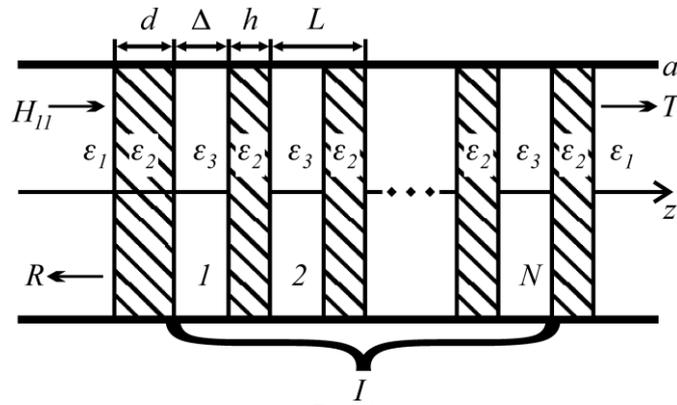


Рис.1

Применяя рекуррентную процедуру операторного метода, используя свойства полубесконечной периодической структуры [10], можно показать, что коэффициенты прохождения и отражения периодической системы $2N$ слоев (периодическая часть структуры обозначена как область I на рис.1), $N > 1$, могут быть определены по формулам:

$$\begin{aligned}
 R_N &= R_\infty + \tau_N \rho e_N (1 - \rho e_N \rho e_N)^{-1} T_\infty, & T_N &= \tau e_N (1 - \rho e_N \rho e_N)^{-1}, \\
 \rho &= (1 - r_3 e R_\infty e)^{-1} (r_3 - R_\infty) e, & \tau &= t_3 e (1 + R_\infty e \rho), \\
 T_\infty &= e_L e^{-1}, & R_\infty &= (1 - t_3 e e^{i\beta L})^{-1} r, \\
 e_L &= e^{i\beta L}, & e_N &= e^{i\beta L(N-2)}, & e &= e^{i\gamma_2 \Delta},
 \end{aligned}$$

где L – период расположения слоев, Δ – длина шайбы с диэлектрической проницаемостью ε_2 , t_3 , r_3 – коэффициенты прохождения и отражения диэлектрической шайбы с диэлектрической проницаемостью ε_3 , длина которой $h = L - \Delta$, γ_2 – постоянная распространения H_{11} -

волны круглого волновода, $\gamma_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_1}{k \sqrt{\varepsilon_2} a} \right)^2}$, μ_1 – корень уравнения $J_1'(x) = 0$, $J_1(x)$ – функция Бесселя первого порядка, β – постоянная распространения собственной волны периодической части структуры, определяемая уравнением [10]

$$1 - e^{-i\beta L} t_3 e - e r_3 e r_3 (1 - e^{i\beta L} e t_3)^{-1} = 0. \quad (1)$$

Единственное решение уравнения (1) выбирается из условия $|R_\infty| \leq 1$.

Коэффициенты прохождения и отражения T и R структуры, представленной на рис.1, могут быть определены из следующих выражений, полученных операторным методом [11 – 13]:

$$R = R_1 + T_2 e_d A_1, \quad T = t_{21} e_d A_2,$$

где

$$\begin{aligned}
 A_2 &= (1 - R_2 e_d r_{21} e_d)^{-1} T_1, & A_1 &= r_{21} e_d A_2, \\
 T_1 &= T_N e_d A_3 t_{12}, & T_2 &= t_{21} e_d (R_N e_d A_3 r_{21} e_d T_N + T_N), \\
 R_1 &= r_{12} + t_{21} e_d R_N e_d A_3 t_{12}, & R_2 &= T_N e_d A_3 r_{21} e_d T_N + R_N, \\
 A_3 &= (1 - r_{21} e_d R_N e_d)^{-1}, \\
 e_d &= e^{i\gamma_3 d},
 \end{aligned}$$

d – длина первой диэлектрической шайбы, t_{mn} и r_{mn} – операторы прохождения и отражения от стыка двух полупространств, заполненных материалом с относительными диэлектриче-

скими проницаемостями ε_m и ε_n (волна набегаёт из области с диэлектрической проницаемостью ε_m), $m, n = 1, 2$.

Численные результаты

С учетом построенного выше алгоритма выбраны значения величин ε_2 и ε_3 , при которых коэффициент отражения исследуемой многослойной структуры стремится к коэффициенту отражения R_M диэлектрика той же длины $(d + NL)$ с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_M < 0$. Коэффициент прохождения не рассматривался, так как при исследуемых геометрических параметрах он намного меньше коэффициента отражения. Выбор оптимальных значений ε_2 и ε_3 осуществлялся по следующей схеме. Вначале для данного значения волнового числа k задавались центральные значения $\varepsilon_{2,0}$ и $\varepsilon_{3,0}$. Потом, на каждом n -м шаге, $n = 0, 1, 2, \dots$ выбирались значения $\varepsilon_{2,n,m} = \varepsilon_{2,0} \pm ms_n$ и $\varepsilon_{3,n,l} = \varepsilon_{3,0} \pm ls_n$, $m, l = 0, 1, 2, \dots$, принадлежащие отрезку

$$\varepsilon_{2,0} - \alpha_n \leq \varepsilon_{2,n,m} \leq \varepsilon_{2,0} + \alpha_n, \varepsilon_{2,n,m} > 1, \varepsilon_{3,0} - \alpha_n \leq \varepsilon_{3,n,l} \leq \varepsilon_{3,0} + \alpha_n, \varepsilon_{3,n,l} > 1,$$

где $\alpha_n = \alpha_{n-1} + \beta$, $\alpha_0 = 0$, s_n и β – заданные числа, и вычислялся коэффициент отражения R . Процедура прекращалась тогда, когда для наперед заданного δ выполнялось условие

$$|R - R_M| < \delta.$$

Отметим, что данная процедура находила ближайшие к центральным значения относительной диэлектрической проницаемости.

На рис.2. представлены зависимости ε_2 (сплошная кривая) и ε_3 (пунктирная кривая) от волнового числа в 30% полосе для двух значений $\varepsilon_{2,0}$ и $\varepsilon_{3,0}$ при центральной частоте $ka = 2.4$. Значение $\varepsilon_M = -5$, погрешность δ выбиралась равной 0.1, $\varepsilon_1 = 1$, $d = 0.15$, $h = \Delta = 0.1$, $L = 0.2$, $N = 5$. Кривые 1 и 2 соответствуют случаю переменного значения ε_2 , кривая 3 – постоянному. Кривые представляют собой квазилинейную зависимость (за исключением центральной частоты). Вблизи центральной частоты зависимость ε_2 и ε_3 стремится к горизонтальной линии. Требование постоянного ε_2 приводит к более быстрому изменению значений ε_3 при изменении частоты по сравнению со случаем переменного ε_2 .

На рис.3. представлены зависимости ε_2 (сплошная кривая) и ε_3 (пунктирная кривая) от волнового числа при центральной частоте $ka = 2.4$. Параметры структуры $\varepsilon_1 = 1$, $d = h = 0.1$, $h = \Delta = 0.1$, $L = 0.2$, $N = 5$, $\varepsilon_M = -5$, $\delta = 0.1$. Кривая 1 соответствуют случаю переменного значения ε_2 , кривая 2 – постоянному. Очевидно, что чем ниже скорость вариации значений диэлектрической проницаемости при изменении частоты, тем легче с технологической точки зрения создать такой материал. Требование периодичности для первого слоя ($d = h$), приводит к значительному увеличению скорости убывания графика зависимости ε_2 и ε_3 от частоты. Кроме того, возможность изменять параметр d предоставляет еще одну степень свободы при создании метаматериала. При $ka > 2.575$ и постоянном ε_2 не удастся добиться непрерывного изменения зависимостей от частоты, и они терпят разрыв, который в условиях реального материала, очевидно, невозможен.

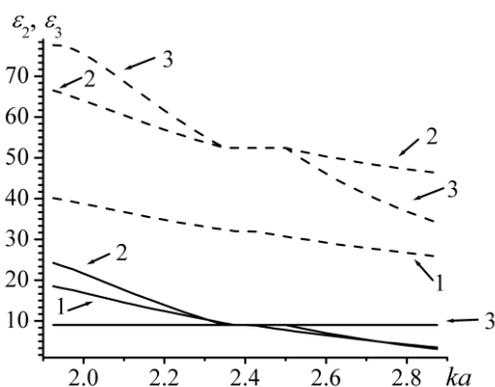


Рис.2

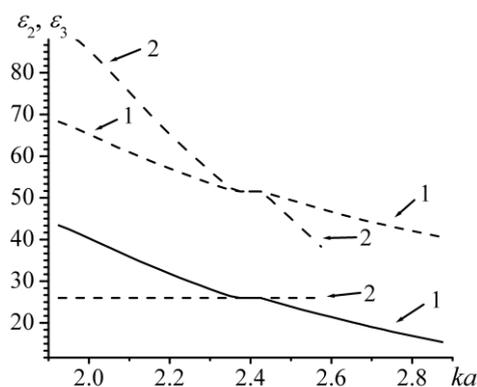


Рис.3

Выводы

Рассмотрена возможность создания многослойного материала, каждый слой которого представляет собой диэлектрическую шайбу в круглом волноводе. Предложен алгоритм выбора материальных параметров одиночных препятствий так, чтобы эквивалентная диэлектрическая проницаемость системы соответствовала диэлектрической проницаемости электроотрицательного метаматериала. В ходе расчетов установлено, что достаточно оптимальным является отказ от условия периодичности для первого слоя. Показано, что зависимость диэлектрической проницаемости шайб от частоты должна быть квази-линейной.

Построенная теоретическая модель позволяет рекомендовать параметры реального композитного материала (вещества), образующего один слой многослойной структуры.

Список литературы:

1. Kim, C., Ahn, H., Elles, D. S., Machado, M., Yoon, Y.-K. A high gain circular polarization antenna using metamaterial slabs // IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp. (APSURSI). – Toronto, July. 2010. – P. 1-4.
2. Cai, Y., Mias, C. Fast finite element time domain-floquet modal absorbing boundary condition modelling of periodic structures using recursive convolution // IEEE Trans. on Antennas Propag. – 2007. – Vol. 55, No. 9. – P. 2550-2558.
3. Wang, H., Tang, W., Shen, Z. On the design of radar absorbing materials using left-handed transmission line // Proc. IEEE Microwave Theory and Tech. Symp. Digest, Honolulu, Hawaii, USA. – 2007. – P.1475-1478.
4. Singh, R.K., Kothiyal, G.P., Srinivasan, A. Magnetic and structural properties of CaO-SiO₂-P₂P₅-Na₂O-Fe₂O₃ glass ceramics // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2008. – Vol. 320, No.7. – P.1352-1356.
5. Примак, Ю. Н., Ткаченко, Н. В. Особенности спекания и физические свойства карбонизированной гидроксилатапитной керамики // Вісник ХНУ, сер. «Фізика». – 2008. – Вип.11, № 821. – С.113-117.
6. Ткаченко, Н.В., Воронин, К.В., Зьман, З.З. Синтез и механические свойства карбонизированной гидроксилатапитной керамики // VIII Міжнар. наук. конф. «Фізичні явища в твердих тілах». 11 – 14 грудня 2007, Україна : тези доповідей. – Харків : Вид-во ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2007. – С.145.
7. Zyman, Z., Tkachenko, M. CO₂ gas-activated sintering of carbonated hydroxyapatites // J.Eur.Ceram.Soc. 2011. Vol. 31. P. 241–248.
8. Singh, R.K., Kothiyal, G.P., Srinivasan, A. Evaluation of CaO-SiO₂-P₂O₅-Na₂O-Fe₂O₃ bioglass-ceramics for hyperthermia application // Materials Science Forum. – 2008. – Vol. 587-588. – P. 171-174.
9. Zyman, Z.Z., Tkachenko, M.V., Ol'khovik, L.P., Dedukh, N.V. Carbonated hydroxyapatite ceramics modified by magnetic particles // Intern. Conf. "Functional Materials" – Partenit, Crimea, Ukraine, 2007. – P.503.
10. Грибовский, А. В., Литвиненко, Л. Н., Просвирнин, С. Л. Дифракция электромагнитных волн на многослойной структуре из бесконечных металлических экранов с прямоугольными отверстиями // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т.5, № 2. – С.166-170.
11. Литвиненко, Л. Н., Просвирнин, С.Л. Спектральные операторы рассеяния в задачах дифракции волн на плоских экранах. – Киев : Наук. думка, 1984. – 240 с.
12. Калиберда, М.Е., Литвиненко, Л.Н., Погарский, С.А. Дифракция волн типа H_{0m} и E_{0m} на системе аксиально-симметричных неоднородностей в коаксиальном тракте // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55, № 5. – С. 539-545.
13. Lytvynenko, L. M., Kaliberda, M. E., Pogarsky, S. A. Solution of Waves Transformation Problem in Axially Symmetric Structures // Frequenz. – 2012. – Vol. 66, No. 1-2. P. 17-25.

Харьковский национальный университет
им. В.Н. Каразіна

Поступила в редколлегию 17.08.2012