

Определение электрофизических параметров спиралевидных включений в диэлектрическую среду для обеспечения киральных свойств

И.В. Малышев, Е.Н. Осадчий, Н.В. Паршина

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В данной работе были определены R , L , C – параметры спиральных структур с размерами l и S для получения искусственных киральных подложек. Это позволило, задаваясь параметрами поляризуемости спиральных структур α_{ij} , применять эти особенности для определения проводящих свойств метаматериалов.

Ключевые слова: киральная подложка, спиральная структура, поляризуемость спирали, поляризационный момент, коэффициент отражения диэлектрической среды, диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Известно, что для получения искусственных киральных метаматериалов используют металлические спиральные структуры [1] или современные полосковые многослойные металл-полупроводниковые гибридные InGaAs/GaAs/Ti/Al [2] или иные спиральные включения, входящие в состав твердого сплава диэлектрической смолы. При этом плотности электрического и магнитного полей, входящие в состав уравнений Максвелла \bar{D} и \bar{B} будут иметь для изотропной Пастеровской среды киральнозависимые поправки [1]:

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} - jk\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \bar{H},$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} + jk\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \bar{E}, \quad (1)$$

где \bar{E} и \bar{H} – напряженности электрического и магнитного полей; ε , ε_0 , μ , μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды и вакуума, соответственно; k – безразмерный коэффициент киральности (часто полагают $k \leq n \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{\mu_0 \varepsilon_0}}$, n – коэффициент отражения диэлектрической среды).

Основные параметры спирали – площадь её диаметра S и длина l , которая определяется из условия $l \ll \lambda$.

Установлено, что поляризационные моменты p_e и p_m этих спиралей будут определены вдоль единичных векторов и как плоскостные параметры пространства среды [3, 4]:

$$\begin{aligned} p_e &= \alpha_{ee} uH E + \alpha_{em} uH H, \\ p_m &= \alpha_{mm} uH H + \alpha_{me} uH E. \end{aligned} \quad (2)$$

Поляризуемость α_{ij} спирали, определяющая киральные свойства среды, выраженная через распределённые: индуктивность L петли, ёмкость C провода (или полоска) и собственного сопротивления излучения R , которая равна сумме сопротивлений двух эквивалентных излучателей [2].

Для идеального проводника материала провода:

$$\alpha_{ee} = \frac{cl^2}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}, \quad (3)$$

$$\alpha_{mm} = \frac{\mu^2 \omega^2 CS^2}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}, \quad (4)$$

$$\alpha_{em} = -\alpha_{me} = \frac{j\omega \mu CS l}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}, \quad (5)$$

где μ – диэлектрическая фоновая проницаемости среды.

В данной работе будут определены R , L , C – параметры для спирали с размерами l и S , входящих в соотношении (2 – 4). Что позволит, задавая параметры поляризуемости спирали α_{ij} , в конечном счете учесть это в излучательных свойствах метаматериалов.

Используя подстановку $x + iy = (1 - \omega^2 LC) + j\omega RC$, перепишем эти соотношения в виде:

$$\frac{x+jy}{C} = \frac{l^2}{\alpha_{ee}}, \quad (6)$$

$$\frac{x+jy}{C} = \frac{S^2 \mu^2 \omega^2}{\alpha_{mm}}, \quad (7)$$

$$\frac{x+jy}{C} = j \frac{\mu \omega l S}{\alpha_{em}}. \quad (8)$$

Из (6) и (7) следует, что:

$$\frac{l^2}{\alpha_{ee}} = \frac{S^2 \mu^2 \omega^2}{\alpha_{mm}}. \quad (9)$$

А из (9) и (8) получим:

$$\frac{l}{\alpha_{ee}} = j \frac{\mu \omega S}{\alpha_{em}}. \quad (10)$$

Из 9 следует:

$$\frac{l}{S} = \mu \omega \sqrt{\alpha_{ee}/\alpha_{mm}}. \quad (11)$$

Для определения электрофизических параметров R , L , C спиралевидной структуры воспользуемся соотношениями (6) – (8). Параметр R определяется из классического соотношения $R = \rho l/S$ (ρ – удельное сопротивление материала спирали) [5]. Учитывая выражение (11), получаем:

$$R = \rho \mu \omega \sqrt{\alpha_{ee}/\alpha_{mm}}. \quad (12)$$

Из соотношения (6) и (7) следует:

$$C = \frac{\alpha_{ee}}{l^2 + \omega^2 L \alpha_{ee} + j \omega R \alpha_{ee}}, \quad (13)$$

$$L = \frac{\alpha_{mm} - C(\mu^2 \omega^2 S^2 + j \omega R \alpha_{mm})}{\omega^2 C \alpha_{mm}}, \quad (14)$$

Анализируя соотношения (13) – (14) получаем зависимость $C = f(\alpha_{ee})$ и $L = f(\alpha_{mm})$

Следовательно, соотношения (12) – (14) являются основополагающими для определения электрофизических параметров спиралей (лево- и правозакрученных), входящих в качестве киральных включений в состав метаматериала [6, 7].

Таким образом, алгоритм расчета данной проводящей структуры можно осуществлять следующим образом: определив коэффициенты поляризуемости спирали α_{ee} и α_{mm} , сразу можно определить активное сопротивление R , оставшиеся параметры L , C можно вычислить методом подбора [8-10], задавая рабочую частоту и используя предложенные уравнения.

Предложенный алгоритм также может быть модифицирован методами подстановки.

Литература

1. Sihvola A., Lindell I., Oksanen M., Hujanen F. Broadband Microwave Measurements and Analysis of Artificial Chiral Materials// Electronics letters. Vol. 6, No 2, 1990. pp. 378-383.
2. Наумова Е.В., Принц В.Я., Голод С.В. Киральные метаматериалы терагерцового диапазона на основе спиралей из металл-полупроводниковых нанопленок. // Автометрия. 2009. т. 45, № 4. С.12 - 18.
3. Sarychev A.K., “Optical Metamaterials with Zero Loss and Plasmonic Nanolasers,” in “Complex Photonic Media”, Ed. Noginov M.A., Dewar G., McCall M.W., Zheludev N.I., SPIE Press, 2009.
4. Осипов О.В., Почепцов А.О., Юрасов В.И. Киральный метаматериал для частотно-селективной концентрации энергии сверхвысокочастотного излучения. // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 4. С. 76-82.



5. Osipov, V.A., Panferova T. A. Approximate Boundary Conditions for Thin Chiral Layers with Curvilinear Surfaces // Journal of Communications Technology and Electronics. - 2010. - V. 55(5). - P. 532–534.
6. Суркаев А.Л., Кумыш М.М., Усачев В.И., Сухова Т.А., Светличная В.Б., Матвеева Т.А., Мустафина Д.А., Ребро И.В., Рахманкулова Г.А. Исследование микроразмерных металлических структур, полученных методом электрического взрыва проводников // Инженерный вестник Дона, 2019, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2019/5869/.
7. Насыбуллин А.Р., Сиразов А.Ф. Комплексированный метод измерения диэлектрической проницаемости в НЧ и СВЧ диапазонах // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5075/.
8. Шевченко В.В. Геометрооптическая теория плоской линзы из кирального метаматериала // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 6. С. 696 - 700.
9. Фисанов В.В. Инварианты изотропной киральной среды // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, № 9. С. 1089 - 1091.
10. Jin Y., He S. Focusing by a slab of chiral medium // Opt. Express. – 2005. Vol. 13, № 13. pp. 4974 - 4979.

References

1. Sihvola A., Lindell I., Oksanen M., Hujanen F. Electronics letters. Vol. 6, № 2, 1990. pp. 378-383.
 2. Naumova E.V., Princ V.YA., Golod S.V. Avtometriya. 2009. t. 45, № 4. pp.12 - 18.
 3. Sarychev A.K., “Optical Metamaterials with Zero Loss and Plasmonic Nanolasers,” in “Complex Photonic Media”, Ed. Noginov M.A., Dewar G., McCall M.W., Zheludev N.I., SPIE Press, 2009.
 4. Osipov O.V., Pochepcov A.O., YUrasov V.I. Infokommunikacionnye tekhnologii. 2014. Т. 12. № 4. pp. 76-82.
-



5. Osipov, V.A., Panferova T. A. Journal of Communications Technology and Electronics. 2010. V. 55(5). pp. 532–534.
6. Surkaev A.L., Kumysh M.M., Usachev V.I., Suhova T.A., Svetlichnaya V.B., Matveeva T.A., Mustafina D.A., Rebro I.V., Rahmankulova G.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2019/5869/.
7. Nasybullin A.R., Sirazov A.F. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5075/.
8. Shevchenko V.V. Radiotekhnika i elektronika. 2009. T. 54, № 6. pp. 696 - 700.
9. Fisanov V.V. Radiotekhnika i elektronika. 2007. T. 52, № 9. pp. 1089 - 1091.
10. Jin Y., He S. Opt. Express. 2005. Vol. 13, № 13. pp. 4974 - 4979.