

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСКУССТВЕННЫХ СЛАБО ОТРАЖАЮЩИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПИРАЛЕЙ ПРИ ПРЕЛОМЛЕНИИ И ПОГЛОЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

И.В. Семченко¹, С.А. Хахомов¹, А.Л. Самофалов¹, С.А. Третьяков²

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

²Университет Аалто, электротехнический факультет, Финляндия

ADVANTAGES OF ARTIFICIAL LOW-REFLECTING STRUCTURES BASED ON THE OPTIMAL HELICES AT THE REFRACTION AND ABSORPTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES

I.V. Semchenko¹, S.A. Khakhomov¹, A.L. Samofalov¹, S.A. Tretyakov²

¹F. Scorina Gomel State University, Gomel, Belarus

²Aalto University School of Electrical Engineering, Finland

Проведено аналитическое исследование преломляющих и поглощающих свойств образца искусственной среды, состоящей из оптимальных спиралей с равными диэлектрическими и магнитными проницаемостями. На основе полученных результатов показано значительное преимущество такой среды по сравнению с «чистыми» диэлектриками и магнетиками.

Ключевые слова: композитные среды, киральность, спиральный элемент, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость.

The analytical study of refractive and absorbing properties of a sample of the artificial medium consisting of the optimal helices with equal permittivity and permeability has been carried out. Significant advantage of this medium in comparison with «pure» dielectric and magnetic materials was shown on the basis of the obtained results.

Keywords: composite materials, chirality, helical element, permittivity, permeability.

Введение

При характеристике сред, у которых числовые значения диэлектрической и магнитной проницаемости одинаковы, традиционно основное внимание уделяется отсутствию отражения электромагнитных волн на поверхности среды. Дополнительным стимулом для изучения этой проблемы стало создание новых искусственных анизотропных структур – метаматериалов, проявляющих особые свойства, которыми не обладают естественные среды [1]. Искусственные структуры с равными диэлектрической и магнитной проницаемостями могут быть созданы на основе металлических спиралей оптимальной формы. В результате исследований, проведенных в настоящей работе, показано, что представляющие научный и практический интерес свойства таких систем не ограничиваются аномально слабым отражением электромагнитных волн на границе с окружающим воздухом. Рассматриваемые структуры имеют входной импеданс, близкий к волновому импедансу свободного пространства, но это не единственное их достоинство. В статье обосновано, что среды, для которых $\varepsilon = \mu$, имеют преимущества перед обычными диэлектриками и магнетиками, обусловленные более сильным преломлением и поглощением электромагнитных волн. Эти свойства искусственных сред

могут быть использованы при создании поглотителей волн сверхвысокой частоты (СВЧ волн).

В работе [2] на примере образца, разработанного авторским коллективом из Института физики полупроводников Сибирского отделения РАН, проведено численное моделирование киральных свойств искусственной анизотропной структуры, образованной из микроспиралей. Показано, что такая искусственно созданная периодическая структура может проявлять значительные киральные свойства в терагерцовом диапазоне. Получены аналитические выражения для вычисления диэлектрической и магнитной проницаемостей, а также киральной восприимчивости структуры, отличающейся существенной гиротропией. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов. Сделан вывод об удовлетворительном описании свойств искусственной структуры с большой киральностью на основе предложенной модели.

1 Моделирование

Для теоретического описания частотной зависимости диэлектрических, магнитных и киральных свойств искусственной структуры в СВЧ диапазоне (вблизи главного резонанса) нами использована модель Лоренца – Друде. При этом учтены следующие факторы: скин-эффект,

ослабление напряженности падающей электромагнитной волны внутри металлической спирали, неоднородное распределение электрического тока по спирали.

Зависимость диэлектрической ε и магнитной μ проницаемости от частоты для среды с сильными киральными свойствами имеет вид [2]:

$$\varepsilon = 1 + \frac{1}{A\varepsilon_0} \frac{\omega_0^2 - \omega^2 - j\omega\tilde{A}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\tilde{A}^2} \left(1 + \frac{q\omega r^2}{2} \sqrt{\varepsilon_0\mu_0\kappa} \right),$$

$$\mu = 1 + \frac{1}{A} \mu_0 B^2 \frac{\omega_0^2 - \omega^2 - j\omega\tilde{A}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\tilde{A}^2} \left(1 + \frac{q\omega r^2}{2} \sqrt{\varepsilon_0\mu_0\kappa} \right),$$

где

$$\kappa = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} B \frac{\omega_0^2 - \omega^2 - j\omega\tilde{A}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\tilde{A}^2},$$

$$\frac{1}{A} = \frac{2N e^2}{\pi m_e} \frac{\tau}{r^2 q^2 + 1}, \quad B = \frac{r^2 q}{2} \omega,$$

$$\tilde{A} = \frac{\rho N_0 N_s e^2}{m_e}, \quad N = N_0 N_s N_h V_h, \quad V_h = \pi r_0^2 L,$$

$$\tau = j \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{\rho}{\pi \cdot r^2 S_{np} \sin \alpha} 2\alpha_{me}, \quad N_s = \frac{2\Delta}{r_0},$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}}, \quad j = \sqrt{-1}.$$

Величина κ является невозмущенным значением параметра киральности, вычисленным в первом приближении, с учетом уравнения связи $\mathbf{V} = \mu_0 \mathbf{H}$; e – модуль заряда электрона, m_e – масса электрона, r – радиус спирали, q – удельное кручение спирали, ω – циклическая частота падающего излучения, ω_0 – резонансная частота, ρ – удельное сопротивление металла, N_0 – концентрация электронов проводимости в металле, N_s – объемная доля скин-слоя в спирали, r_0 – радиус проволоки, N_h – концентрация спиралей, V_h – объем проволоки, из которого изготовлена одна спираль, τ – коэффициент ослабления падающего поля внутри металла, S_{np} – площадь сечения проводника, α – угол подъема спирали; α_{me} – магнитоэлектрическая восприимчивость, содержащаяся в материальных уравнениях для отдельной спирали:

$$\mathbf{p} = \varepsilon_0 \alpha_{ee} \mathbf{E} - j \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \alpha_{em} \mathbf{H},$$

$$\mathbf{m} = \alpha_{mm} \mathbf{H} + j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \alpha_{me} \mathbf{E}.$$

Здесь α_{ee} и α_{mm} – тензоры диэлектрической и магнитной восприимчивости спирали; $\alpha_{em} = \alpha_{me}^T$ – псевдотензор, характеризующий киральные свойства спирали; ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; символом T

обозначена операция транспонирования. При записи этих выражений полагается, что электрическое и магнитное поле являются монохроматическими, и зависимость их напряженности от времени описывается функцией $\exp(j\omega t)$, как принято в радиофизике [2].

Оптимальные параметры спиралей определены нами в работах [3], [4]. В частности, для электромагнитного поля с длиной волны, равной 10 см, оптимальными являются спирали с параметрами:

$$N_g = 1, \quad r = 7,73 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \alpha = 13,65^\circ, \quad L = 0,05 \text{ м},$$

$$H = 0,012 \text{ м}, \quad d = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

где N_g – число витков спирали, r – радиус витка, α – угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали, L – длина медной проволоки, свитой в спираль (соответствует условию главного частотного резонанса), H – высота спирали (в рассматриваемых условиях она равна шагу спирали), d – диаметр проволоки.

В работах [5], [6] нами проведены экспериментальные исследования поляризационных свойств искусственного образца, состоящего из оптимальных одновитковых спиралей с углом подъема $13,65^\circ$. В настоящей работе проведено исследование преломляющих и поглощающих свойств такой же искусственной структуры.

2 Обсуждение результатов

Для определения зависимости диэлектрической ε и магнитной μ проницаемости данного образца от частоты необходимо предварительно определить магнитоэлектрическую восприимчивость α_{me} отдельной спирали.

В работе [6] для образца среды, состоящей из парных взаимно ортогональных спиралей оптимальных параметров, на основании экспериментальных результатов получена зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости от частоты. При использовании в первом приближении эмпирического значения параметра киральности образца $\kappa = -0,42 + j \cdot 0,42$ нами получено достаточно точное соответствие аналитической зависимости, представленной на рисунке 2.1 сплошной кривой и экспериментальной зависимости («точечная» кривая), полученной в [6]. Смещение графиков друг относительно друга вдоль шкалы частот, возможно, обусловлено замедлением электромагнитных волн в рассматриваемой среде.

В рассматриваемых условиях коэффициент ослабления падающего поля внутри металла $\tau = -2,329 \cdot 10^{-5} - j \cdot 2,329 \cdot 10^{-5}$, толщина скин-слоя на резонансной частоте составляет $N_s = 4,754 \cdot 10^{-5}$ м.

С учётом полученных значений параметров κ и τ построим частотные зависимости действительной (рисунок 2.2) и мнимой (рисунок 2.3) части диэлектрической, магнитной проницаемостей и показателя преломления для образца,

состоящего из одновитковых парных спиралей с углом подъема $13,65^\circ$.

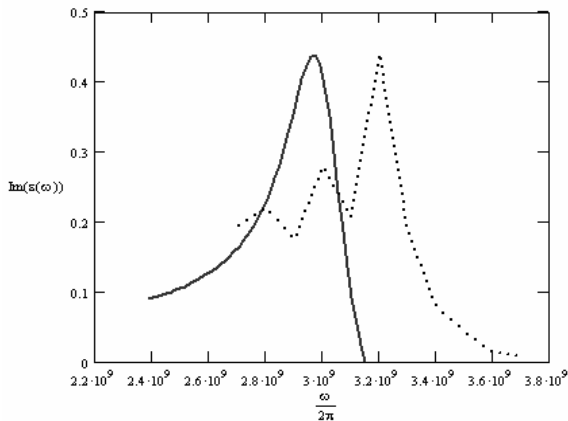


Рисунок 2.1 – Зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости от частоты (... экспериментальная зависимость, — аналитическая зависимость)

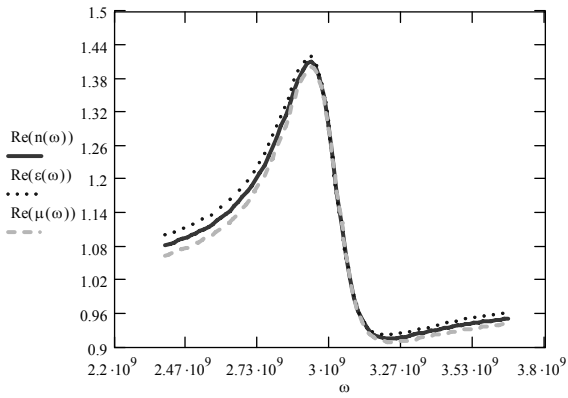


Рисунок 2.2 – Частотная зависимость действительной части диэлектрической $Re(\epsilon(\omega))$, магнитной $Re(\mu(\omega))$ проницаемостей и показателя преломления $Re(n(\omega))$.

Образец среды из одновитковых парных спиралей с углом подъема $13,65^\circ$

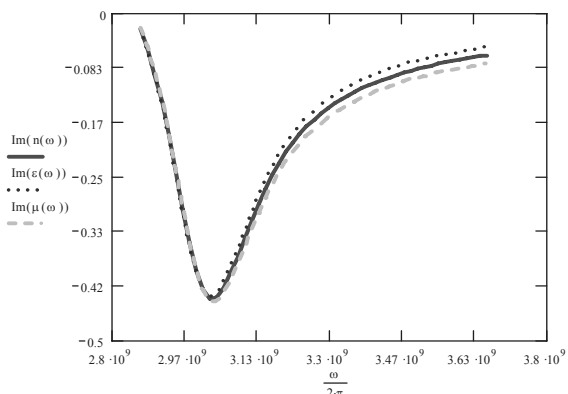


Рисунок 2.3 – Графики частотной зависимости мнимой части диэлектрической $Im(\epsilon(\omega))$, магнитной $Im(\mu(\omega))$ проницаемостей и показателя преломления $Im(n(\omega))$.

Образец среды из одновитковых парных спиралей с углом подъема $13,65^\circ$

На рисунках 2.2 и 2.3 видно, что для образца, состоящего из оптимальных спиралей, равенство значений диэлектрической и магнитной проницаемостей имеет место при резонансной частоте ($3 \cdot 10^9$ ГГц). При частотах, близких к резонансной, значения диэлектрической и магнитной проницаемостей очень мало различаются.

В целях сравнения преломляющих свойств исследуемого в настоящей работе искусственно-го образца, состоящего из одновитковых парных спиралей с углом подъема $13,65^\circ$, с преломляющими свойствами «чистых» диэлектриков ($\mu = 1$) и «чистых» магнетиков ($\epsilon = 1$) на рисунке 2.4 для них приведены частотные зависимости действительной части показателя преломления.

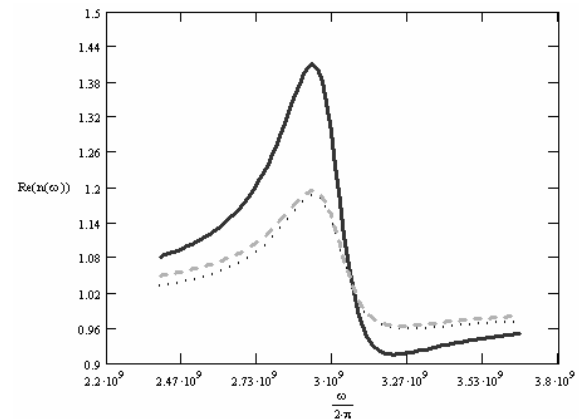


Рисунок 2.4 – Частотная зависимость действительной части показателя преломления искусственной среды (сплошная кривая), «чистого» диэлектрика (штриховая кривая), «чистого» магнетика («точечная» кривая)

На рисунке 2.4 видно, что искусственная среда, состоящая из оптимальных спиралей, значительно превосходит «чистые» диэлектрики и магнетики по преломляющим свойствам.

В области нормальной дисперсии максимальное значение действительной части показателя преломления искусственной среды равно 1,41 (при частоте 2,93 ГГц), у «чистых» диэлектриков оно не превышает 1,194 (на 15,3% меньше, чем у искусственного образца), у «чистых» магнетиков – 1,186 (на 15,9% меньше, чем у искусственного образца).

В области аномальной дисперсии искусственной среды (3,21 ГГц) минимальное значение действительной части показателя преломления равно 0,914. На этой же частоте у «чистых» диэлектриков оно равно 0,964 (отличие от единицы, взятое по модулю, на 58% меньше, чем у искусственного образца), у «чистых» магнетиков – 0,959 (отличие от единицы, взятое по модулю, на 52% меньше, чем у искусственного образца).

Для сравнения поглощающих свойств образца искусственной среды с поглощающими свойствами «чистых» диэлектриков и магнетиков воспользуемся частотными зависимостями

мнимой части показателя преломления искусственной среды, «чистого» диэлектрика и «чистого» магнетика, приведенными на рисунке 2.5.

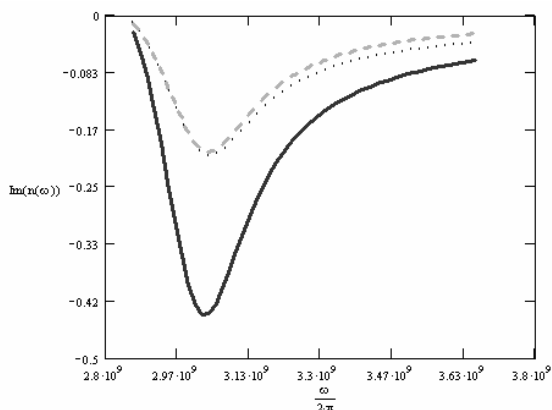


Рисунок 2.5 – Графики частотной зависимости мнимой части показателя преломления искусственной среды (сплошная кривая), «чистого» диэлектрика (штриховая кривая), «чистого» магнетика («точечная» кривая)

Анализируя зависимости, изображённые на рисунке 2.5, видим, что искусственная среда, состоящая из оптимальных спиралей, в значительно большей степени поглощает излучение, чем «чистые» диэлектрики и магнетики. Это свойство искусственной структуры может быть использовано при создании поглотителей излучения СВЧ диапазона.

Вблизи резонансной частоты искусственной среды (3,02 ГГц) максимальное значение модуля мнимой части показателя преломления равно 0,435; у «чистых» диэлектриков оно равно 0,196 (то есть в 2,22 раза меньше, чем у искусственного образца), у «чистых» магнетиков – 0,199 (что в 2,18 раза меньше, чем у искусственного образца).

Заключение

С использованием аналитических выражений, полученных для диэлектрической и магнитной проницаемости в работе [2], проведено моделирование преломляющих и поглощающих

свойств образца искусственной среды, состоящей из оптимальных спиралей, с равными значениями диэлектрической и магнитной проницаемости. Показано значительное преимущество образца искусственной среды по сравнению с «чистыми» диэлектриками и магнетиками по абсорбционным и рефракционным свойствам в отношении СВЧ излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bianisotropic materials optimized for strong interactions with electromagnetic fields* / S.A. Tretyakov // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 2. – Р. 49–51.
2. *Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью* / И.В. Семченко [и др.] // Кристаллография. – 2011. – Т. 56, № 3. – С. 404–411.
3. *Исследование поляризации электромагнитного излучения, рассеянного на металлической спирали* / И.В. Семченко [и др.] // Лазерная и оптико-электронная техника. – 2002. – Вып. 7. – С. 84–91.
4. *Преобразование поляризации электромагнитных волн спиральными излучателями* / И.В. Семченко [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 8. – С. 917–922.
5. *Оптимальная форма спирали: равенство диэлектрических, магнитных и киральных свойств* / И.В. Семченко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – Т. 2, № 5. – С. 30–36.
6. *Helices of optimal shape for nonreflecting covering* / I.V. Semchenko [et al.] // The European Physical Journal. Applied Physics. – 2010. – Vol. 49. – P. 33002.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований – проект № Ф11МС-005.

Поступила в редакцию 01.11.11.