

Преобразование поляризации при отражении СВЧ волны от плоской двухслойной структуры на основе омега-элементов оптимальной формы

М.А. ПОДАЛОВ, И.В. СЕМЧЕНКО

Создана плоская двухслойная структура на основе омега-элементов оптимальной формы. Рассчитано оптимальное расстояние между слоями. Экспериментально исследовано преобразование поляризации электромагнитной волны при отражении СВЧ излучения от плоской двухслойной решетки. Полученная искусственная структура обладает поляризационными характеристиками, превосходящими характеристики плоских двумерных однослойных решеток, образованных оптимальными омега-элементами. Показано, что такие структуры могут применяться для создания преобразователей поляризации в определенном диапазоне электромагнитных волн.

Ключевые слова: омега-элемент, метаматериал, СВЧ излучение, преобразователь поляризации, двухслойная структура.

Flat bilayer structure is created on the basis of the optimum form omega-elements. The optimal distance between the layers is calculated. The experimental research of the transformation of polarization of an electromagnetic wave by reflection of microwave radiation from a flat two-layer lattice is carried. The obtained artificial structure possess polarization characteristics exceeding the performance of flat two-dimensional single layered lattices formed of optimal omega-elements. It is shown that such structures can be applied to creation of converter of polarization in certain range of electromagnetic waves.

Keywords: omega-element, metamaterial, microwave radiation, converter of polarization, bilayer structure.

За последние 20 лет было проведено большое количество исследований гиротропных свойств искусственных композитных сред в микроволновом диапазоне, созданных на основе спиральных и омега-элементов [1]–[8].

Задачей нашей работы является исследование взаимодействия электромагнитного излучения микроволнового диапазона с плоской двухслойной решеткой, состоящей из омега-элементов с предварительно рассчитанными оптимальными параметрами [9]. Целью является демонстрация того, что такие структуры могут иметь большое число потенциальных применений, в частности, они могут использоваться для преобразования поляризации электромагнитных волн микроволнового диапазона, например, получения циркулярно-поляризованной волны.

В способе, рассмотренном в данной работе, преобразование поляризации электромагнитной волны из линейной в круговую происходит вне зависимости от ориентации плоскости линейной поляризации падающей электромагнитной волны при заданном направлении распространения падающей волны.

Формирование циркулярно-поляризованной волны происходит благодаря излучению связанных между собой электрического дипольного момента и магнитного момента каждого омега-элемента, которые дают равные по абсолютной величине вклады в отраженную волну. Преимущество использования плоской двухслойной омега-структуры для получения циркулярно-поляризованной волны заключается в простоте изготовления и масштабирования. Омега-структура является плоской, следовательно, производить её можно, например, методом травления на печатной плате, практически в любом доступном масштабе.

Схема проведения эксперимента на отражение электромагнитной волны от плоской двумерной решетки, состоящей из упорядоченных омега-элементов, подробно описана нами ранее [10], [11]. Плечи омега-элементов лежат перпендикулярно к плоскости колебания вектора напряжённости электрического поля падающей волны. В этом случае омега-элементы активируются магнитным полем падающей волны. Плоскость образца расположена под углом $\alpha = 45^\circ$ к волновому вектору падающей волны. С целью уменьшения отражения от стен

и создания условий, приближающихся к условиям «свободного пространства», исследования проводятся в безэховой камере.

Ранее была установлена оптимальная форма омега-элемента на основе анализа возбуждаемых в нем электромагнитных колебаний. При этом были рассмотрены три модели распределения тока в омега-элементе [9]–[11]. Найденные оптимальные параметры омега-элемента используются в данной работе. Изготовлена плоская периодическая двухслойная решетка на основе омега-элементов с оптимальными параметрами. Осуществлен эксперимент по преобразованию линейно-поляризованной СВЧ волны в циркулярную.

При расчетах мы использовали модель гармонического тока, в рамках которой выражения для p и m являются приближенными.

В то же время условие, когда электрический дипольный момент и магнитный момент омега-включения дают одинаковые по абсолютной величине вклады в излучаемую электромагнитную волну, выполняется точно, поскольку величины p и m взаимозависимы (рисунок 1).

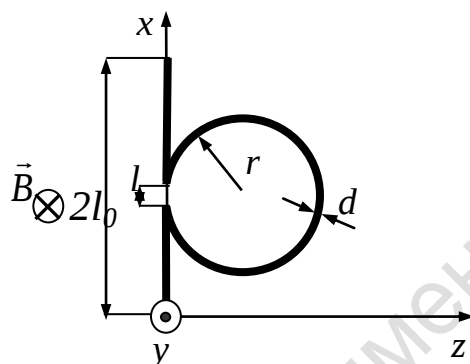


Рисунок 1 – Омега-элемент в поле падающей электромагнитной волны

Это условие имеет вид:

$$\left| p_x^{(1)} + p_x^{(2)} \right| = \frac{|m_y|}{c}. \quad (1)$$

Характеристики электромагнитного излучения, рассеянного на омега-элементе, зависят от соотношения геометрических размеров элемента и длины волны. В случае, когда линейные геометрические размеры омега-элемента меньше длины волны, можно применить дипольное приближение теории излучения [9].

Для создания плоской двухслойной решетки на основе омега-элементов оптимальной формы, способных эффективно преобразовывать поляризацию волны, следует вычислить геометрические параметры омега-структуры.

Для вычисления оптимальных геометрических параметров двухслойной плоской решетки использовалось условие Брэгга-Вульфа, при котором имеет место максимум отражения волны

$$2d \cdot \sin \phi = m\lambda. \quad (2)$$

Здесь d – межплоскостное расстояние; ϕ – угол скольжения, т. е. угол между отражающей плоскостью и падающим лучом; λ – длина волны электромагнитного излучения и m – так называемый порядок отражения, т. е. положительное целое число. Из (2) получаем

$$d = \frac{m\lambda}{2 \sin \phi}, \quad (3)$$

отсюда при $m = 1$ следует

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \phi}. \quad (4)$$

Если угол падения электромагнитной волны равен

$$\phi = \frac{\pi}{4}, \quad (5)$$

тогда

$$\sin \phi = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (6)$$

Откуда легко найти искомое d в случае резонансной длины волны $\lambda = 10$ см:

$$d = \frac{\lambda}{\sqrt{2}} \approx 7.07 \tilde{m}. \quad (7)$$

Для проверки теоретических расчетов был изготовлен экспериментальный образец плоской двухслойной решетки на основе радиопрозрачного материала (пенопласта), содержащий металлические (медные) омега-элементы с ранее рассчитанными оптимальными параметрами:

$$r = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, L = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, d = 0,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}, l = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}, l_0 = 9,29 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где r – радиус витка; L – длина проволоки, из которой изготовлен омега-элемент; d – диаметр медной проволоки; l – расстояние между плечами; l_0 – длина плеча. Внешний вид образца показан на рисунках 2 и 3.

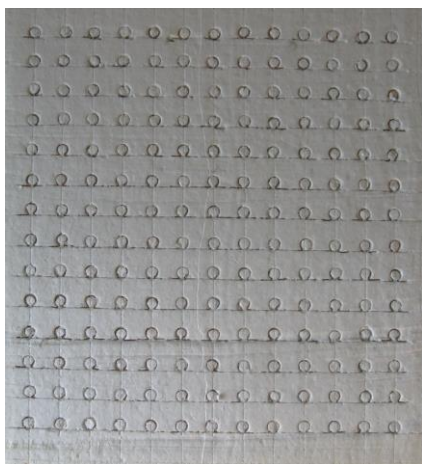


Рисунок 2 – Общий вид плоской двухслойной омега-структуры



Рисунок 3 – Вид сбоку плоской двухслойной омега-структуры

Предварительно был изготовлен специальный шаблон, с помощью которого были получены омега-элементы. Таким образом, была достигнута повторяемость формы и размеров омега-элементов.

Для измерения поляризационной характеристики в работе применяется метод, основанный на использовании антенны с линейной поляризацией поля (рупорная антенна).

В работе проведены исследования коэффициента эллиптичности электромагнитной волны, отраженной от образца двухслойной решетки, в зависимости от частоты подающего излучения. Измерения выполнялись в частотном интервале 2.6 ... 3.9 ГГц.

Коэффициент эллиптичности K отраженной волны вычислялся из поляризационной диаграммы как результат извлечения квадратного корня из отношения минимального и максимального значения уровня сигнала, которые определялись по показаниям индикатора приемника.

Результаты исследования приведены на рисунке 4.

В результате проведенных экспериментов в безэховой камере была получена зависимость коэффициента эллиптичности K отраженной волны от частоты падающей волны. Вектор напряженности электрического поля колеблется перпендикулярно плечам омега-элементов, при этом омега-элементы расположены в плоскости образца с двух сторон радиопрозрачного материала, образуя двухслойную омега-структуру из 364 включений (образец

№ 2). Результаты исследования приведены в сравнении с экспериментальным исследованием поляризационной селективности плоской двумерной однослойной решетки, образованной 182 омега-элементами с оптимальной формой (образец № 1) [9]. В образце № 1 вектор напряжённости электрического поля также колеблется перпендикулярно плечам омега-элементов.

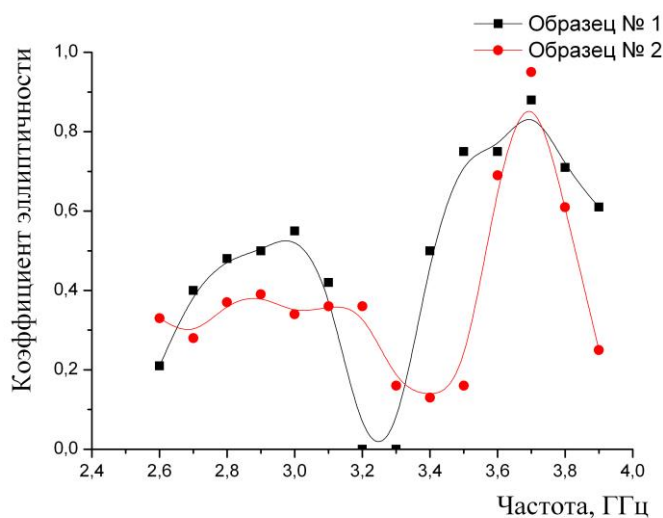


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента эллиптичности K отражённой волны от частоты падающей волны для образцов № 1 и № 2

Как видно из графика (рисунок 4), коэффициент эллиптичности достигает значения $K = 0.88$ на частоте 3.7 ГГц для первого образца, для второго образца $K = 0.95$ на частоте 3.7 ГГц. Кривые зависимостей имеют практически одинаковую форму вдали от резонансной частоты. Для двухслойной структуры резонанс наблюдается в более узкой полосе частот. Это свойство объясняется взаимодействием волны с обоими слоями омега-элементов. При удалении от резонансной частоты коэффициент эллиптичности уменьшается. Данный эффект объясняется нарушением условия главного резонанса, для которого рассчитаны оптимальные параметры омега-элементов.

На основе проведённых исследований можно сделать заключение о том, что в зависимости от параметров омега-элементов искусственные двухслойные структуры на основе омега-включений оптимальной формы могут проявлять различные свойства и соответственно использоваться для преобразования поляризации электромагнитных волн микроволнового диапазона, в частности, для получения циркулярно-поляризованной волны.

Литература

1. Advances in Complex Electromagnetic Materials / A. Priou [et al.] // Kluwer Academic Publishers, 1997. – Vol. 28. – P. 32–37.
2. Serdyukov, A.N. Electromagnetics of bi-anisotropic materials : theory and applications / A.N. Serdyukov, I.V. Semchenko, S.A. Tretyakov, A. Sihvola // Amsterdam : Gordon and Breach Science Publishers, 2001. – P. 308–321.
3. Whites, K.W. Composite uniaxial bianisotropic chiral materials characterization : comparison of predicted and measured scattering / K.W. Whites, C.Y. Chang // J. Electromagn. Waves Applic. – 1997. – Vol. 11. – P. 371–394.
4. Tretyakov, S.A. Influence of chiral shapes of individual inclusions on the absorption in chiral composite coatings / S.A. Tretyakov, A.A. Sochava, C.R. Simovski // Electromagnetics. – 1996. – Vol. 16. – P. 113–127.
5. Cloete, J.H. The role of chirality in synthetic microwave absorbers / J.H. Cloete, M. Bingle, D.B. Davidson // Proc. Int. Conf. Electromagnetics in Advanced Application. – 1999. – P. 55–58.

6. Tretyakov, S.A. Proposed composite material for nonreflecting shields and antenna radomes / S.A. Tretyakov, A.A. Sochava // *Electron. Lett.* – 1993. – Vol. 29. – P. 1048–1049.
7. Семченко, И.В. Использование парных спиралей оптимальной формы для создания слабоотражающих покрытий в СВЧ диапазоне / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // *Проблемы физики, математики и техники.* – 2009. – № 1. – С. 33–39.
8. Семченко, И.В. Создание и экспериментальное исследование слабо отражающих структур на основе Ω -элементов оптимальной формы / И.В. Семченко, М.А. Подалов, А.Н. Годлевская // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.* – 2011. – № 6. – С. 118–124.
9. Подалов, М.А. Оптимальная форма омега-включений для метаматериалов / М.А. Подалов, И.В. Семченко // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.* – 2009. – № 4, ч. 2. – С. 172–176.
10. Семченко, И.В. Получение циркулярно-поляризованной отраженной СВЧ волны с помощью плоской периодической структуры на основе омега-элементов / И.В. Семченко, М.А. Подалов // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.* – 2006. – № 6, ч. 2. – С. 40–43.
11. Семченко, И.В. Излучение циркулярно-поляризованных СВЧ волн плоской периодической структурой из Ω -элементов / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, М.А. Подалов, С.А. Третьяков // *Радиотехника и электроника.* – 2007. – Т. 52, № 9. – С. 1084–1088.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 19.10.12