

И.В. Семченко, С.А. Хахомов, М.А. Подалов, А.Л. Самофалов
УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТРЕХМЕРНОГО ОМЕГА-СТРУКТУРИРОВАННОГО
МЕТАМАТЕРИАЛА НА ПОДЛОЖКЕ
В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

Введение

Целью настоящей работы является получение нового 3D-метаматериала на основе омега-элементов, проявляющего широ-

кополосное преобразование поляризации отражённой волны в ТГц диапазоне. Метаматериал представляет собой две параллельные омега-структурированные метаповерхности, разделённые подложкой из полимерной пленки.

Ранее были проведены аналитические расчеты, компьютерное моделирование и экспериментальные исследования омега-структурированной метаповерхности, то есть двумерного массива оптимальных омега-элементов. Расположение омега-включений в массиве является достаточно плотным, что позволяет исключить дифракционное отражение волн и рассматривать массив как метаповерхность с усреднёнными параметрами. Исходя из условия полуволнового резонанса при активации омега-элементов найдены их оптимальные параметры, а также требуемое расстояние между элементами на метаповерхности [1-8].

1. Граничные условия моделирования

В настоящей работе проведено параметрическое моделирование 3D- метаматериала, образованного двумя параллельными метаповерхностями на общей полимерной подложке, в ТГц диапазоне.

Толщина подложки, то есть расстояние между метаповерхностями, изменялась в диапазоне от 50 до 550 мкм с шагом 50 мкм. Рассматривался вариант геометрии метаматериала, когда плечи омега-элементов на обеих поверхностях параллельны друг другу, витки омега-элементов лежат на одной оси (рисунок 1).

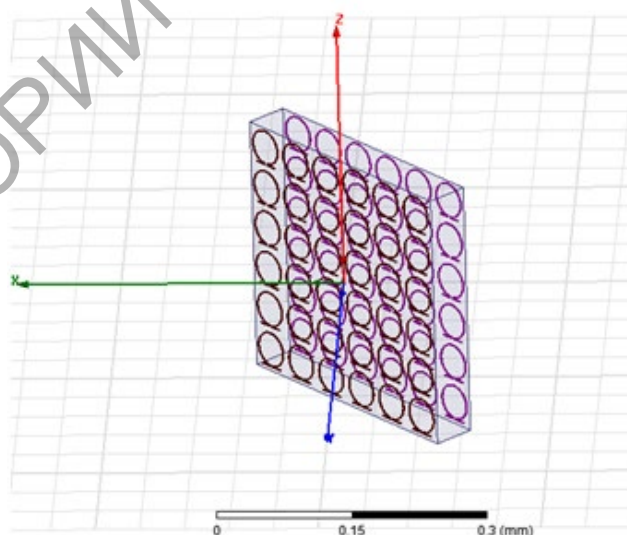


Рисунок 1 – Геометрия 3D-метаматериала, расстояние между омега-элементами на метаповерхности равно 50 мкм

В качестве материала подложки выбирался полиэтилен, полипропилен или фторопласт (политетрафторэтилен).

2. Моделирование метаматериала в ТГц диапазоне

Метаповерхности состоят из проводящих омега-элементов с оптимальными параметрами, рассчитанными для резонансной частоты 1 ТГц. Каждая из метаповерхностей образована 36 омега-элементами, в результате весь трехмерный омега-структурированный метаматериал состоит из 72 элементов.

С целью поиска оптимальной геометрии омега-ячеек проведено моделирование их поляризационных свойств по отношению к отражённой волне методом конечных элементов. В качестве материала омега-элементов выбрана медь. Между элементами омега-ячейки находится полимерная подложка, весь трехмерный метаматериал расположен в вакууме.

Рассматривались два случая ориентации вектора напряжённости электрического поля падающей электромагнитной волны: в первом случае вектор \vec{E} падающей волны колеблется параллельно плечам омега-элементов, во втором случае – перпендикулярно плечам. В обоих случаях волновой вектор падающей волны \vec{k} пронизывает плоскость витка омега-элемента под углом 45 градусов к оси витка элемента (рисунок 2).

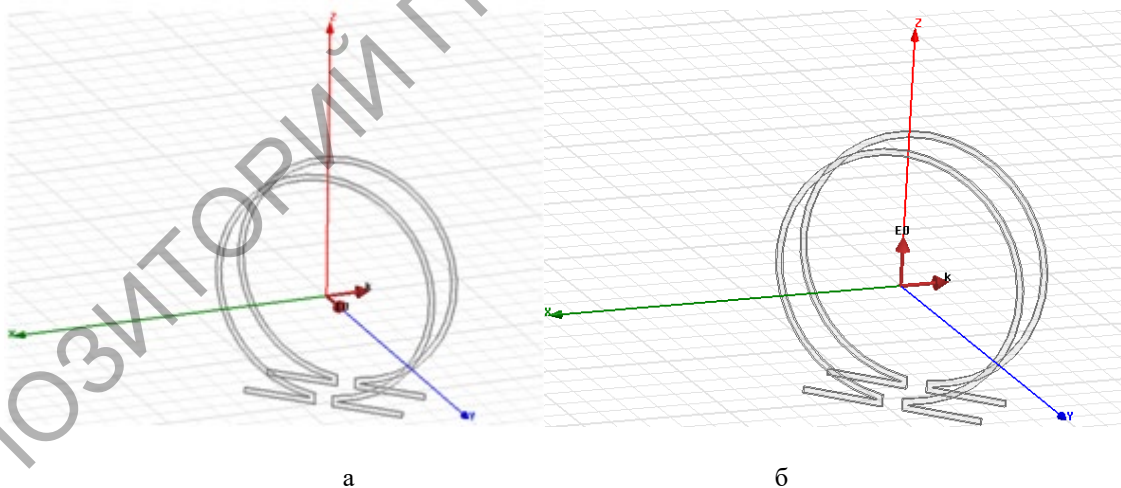


Рисунок 2 – Ориентация векторов \vec{k} и \vec{E} падающей волны относительно элементов метаматериала: а) вектор \vec{E} параллелен плечам элементов; б) вектор \vec{E} ортогонален плечам элементов

Для метаповерхностей, в силу плотного расположения их элементов, расстояние между которыми существенно меньше длины волны,

может быть применён закон отражения света. Следовательно, отражённая электромагнитная волна распространялась под углом 45 градусов к оси омега-элементов (то есть если падающая электромагнитная волна распространялась вдоль оси X, то отражённая – вдоль оси Y).

Модель исследовалась в частотном диапазоне 0,1 – 1,7 ТГц, содержащем проектируемую резонансную частоту, шаг моделирования был равен 0.05 ТГц.

3. Результаты моделирования

По итогам моделирования выяснилось, что наилучшими поляризационными характеристиками по отношению к отражённой волне обладает омега-структурированный метаматериал с толщиной подложки 150 мкм для всех типов материалов подложки. Все исследуемые образцы с толщиной подложки 150 мкм продемонстрировали очень высокие значения коэффициента эллиптичности отражённой волны, близкие к единице. При ориентации вектора \vec{E} падающей волны параллельно плечам омега-элементов, из исследуемых образцов максимальные коэффициенты эллиптичности, равные 0,9964 и 0,997, показали метаматериалы с подложкой из полиэтилена на частоте 0.9 ТГц (рисунок 3а) и фторопласта на частоте 1 ТГц (рисунок 3б), что соответствует аналитическим расчетам.

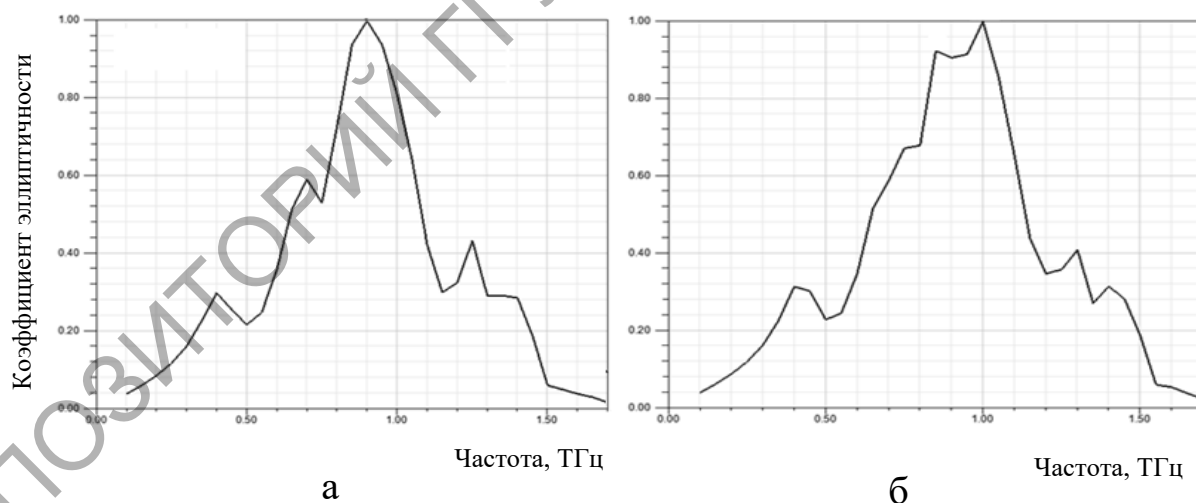


Рисунок 3 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отражённой волны для метаматериалов с толщиной подложки 150 мкм, при ориентации вектора \vec{E} падающей волны параллельно плечам омега-элементов: для подложки из полиэтилена (а) и фторопласта (б)

Моделирование второго случая ориентации вектора напряжённости электрического поля падающей электромагнитной волны, то есть

ортогонально плечам омега-элементов, также показало значимые результаты для полимерной подложки толщиной 150 мкм. Наблюдалась широкая полоса максимума коэффициента эллиптичности отражённой волны со значениями 0,95-0,97 в диапазоне частот 0,7-0,9 ТГц для всех исследуемых материалов подложки. Максимальное значение коэффициента эллиптичности, равное 0,9725, показал метаматериал с подложкой из полиэтилена на частоте 0,9 ТГц (рисунок 4).

При колебаниях вектора \vec{E} падающей волны вдоль плеч омега-элементов происходит возбуждение электрического тока в первую очередь в этих плечах, что приводит к созданию в элементах электрических дипольных моментов и неразрывно связанных с ними магнитных моментов. В случае колебаний вектора \vec{E} падающей волны ортогонально плечам омега-элементов, метаматериал, главным образом, активируется магнитным полем падающей волны, и в первую очередь возбуждается электрический ток в петлях, то есть в омега-элементах возникают магнитные моменты и не отделимые от них электрические дипольные моменты. В обоих случаях электрический дипольный момент и магнитный момент омега-элемента являются одинаково значимыми для формирования циркулярно поляризованной отражённой волны, поскольку омега-элементы имеют предварительно рассчитанные оптимальные параметры. Длина металлизированной дорожки омега-элемента составляет половину длины волны падающего электромагнитного излучения, что удовлетворяет условию главного резонанса при активации омега-элемента.

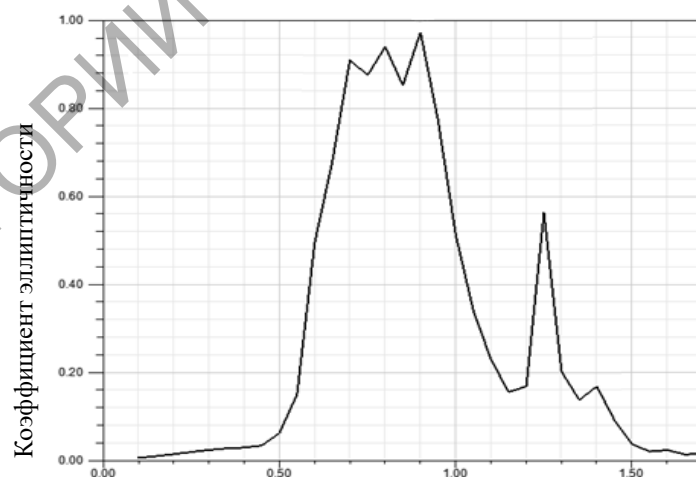


Рисунок 4 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отражённой волны для полиэтиленовой подложки метаматериала толщиной 150 мкм, при ориентации вектора \vec{E} падающей волны ортогонально плечам омега-элементов

Выводы

Анализ результатов параметрического моделирования трехмерного омега-структурированного метаматериала показал, что наиболее оптимальная толщина подложки для получения циркулярно-поляризованной отражённой электромагнитной волны в широком диапазоне частот равна 150 мкм. Лучшим материалом подложки, на которую нанесены две метаповерхности, является полиэтилен, не только в силу поляризационных свойств метаматериала, но и из-за доступности, дешевизны и более высокой адгезии, чем у фторопласта. В то же время, 3D-метаматериал на базе омега-элементов на фторопластовой подложке проявляет более широкополосные поляризационные свойства в отношении отражённой электромагнитной волны вблизи расчётной частоты.

Работа выполнена в рамках задания на 2018 год ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» № ГР 20161018 (тема М16-71)

Литература

1. Сонгсонг, Цянь. Параметрическое моделирование оптимальных омега-элементов, обеспечивающих преобразование поляризации СВЧ волны метаповерхностью / Цянь Сонгсонг, М.А. Подалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2014. – №6 (87). – С. 215–220.
2. Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators / A. Balmakou [et al.] // Optics Letters.– 2015. – Vol. 40, № 9. – P. 2084–2087.
3. The effective optimal parameters of metamaterial on the base of omega-elements I.V Semchenko [et al.] // Ryszard Jablonski, Roman Szewczyk. Editors. Recent Global Research and Education: Technological challenges. Proceedings of the 15th International Conference on Global Research and Education. Inter-Academia/ Springer. – 2016. – P. 3–9.
4. Semchenko, I. Omega-structured substrate-supported metamaterial for the transformation of wave polarization in THz frequency range / I. Semchenko, S. Khakhomov, A. Samofalov, M. Podalov // 16th International Conference on Global Research and Education, Inter-Academia 2017, Book of Abstracts: Iasi, Romania, 25 – 28 September 2017. – P. 11.
5. Absorptive weakly reflective metamaterial based on optimal rectangular omegas / I. Semchenko [et al.] // 11th International Congress on Engineered Material Platforms for Novel Wave Phenomena, Metamaterials 2017: Proceedings, Marseille, France, Aug. 28th-Sept. 2nd, 2017. – P. 867–869.

6. Omega-Structured Substrate-Supported Metamaterial for the Transformation of Wave Polarization in THz Frequency Range / Igor Semchenko [et al.] // Recent Advances in Technology Research and Education / Ed. by Dumitru Luca, Lucel Sirghi, Claudiu Costin, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 660, Springer. – 2017. – P. 73–80.

7. The effective optimal parameters of metamaterial on the base of omega-elements / I.V. Semchenko [et al.] // Recent Global Research and Education: Technological Challenges / Ed. by Ryszard Jablonski and Roman Szewczyk, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 519, Springer. – 2017. – P. 3–9.

8. Проектирование, формирование и экспериментальное исследование гибких металл-полимерных высокопоглощающих неотражающих покрытий на основе трёхмерных элементов для СВЧ и ТГц диапазона / И.В. Семченко [и др.] // VI Конгресс физиков Беларуси, Минск, Беларусь, 20 – 23 ноября 2017 г.: Сборник научных трудов / Институт физики НАН Беларуси, редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Институт физики НАН Беларуси, 2017. – С. 164–165.