

**А. П. Балмаков¹, Д. В. Слепенков¹, С. А. Хахомов¹,
И. В. Семченко¹, Д. Ванг²**

¹ УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

² Университет Цзяннань, Уси, Китай

СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОКРЫВАЮЩИХ ОБЪЕКТЫ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D ПЕЧАТИ

Введение

С целью создания слабоотражающих тонких поглощающих метаповерхностей для уменьшения отражения микроволнового излучения от металлических/металлизированных объектов сложной формы предложено использование метаповерхностей с компенсированной киральностью без металлического слоя у основания, содержащих элементарные элементы омегаобразной формы [1–4]. Была разработана компьютерная модель метаповерхности и проведены численные исследования по определению формы и размеров метаповерхности, по результатам которых были предложены два типа метаповерхностей для сильного поглощения излучения (рисунок 1(а)) и частичного поглощения излучения и преобразования поляризации отраженного сигнала (рисунок 1(б)).

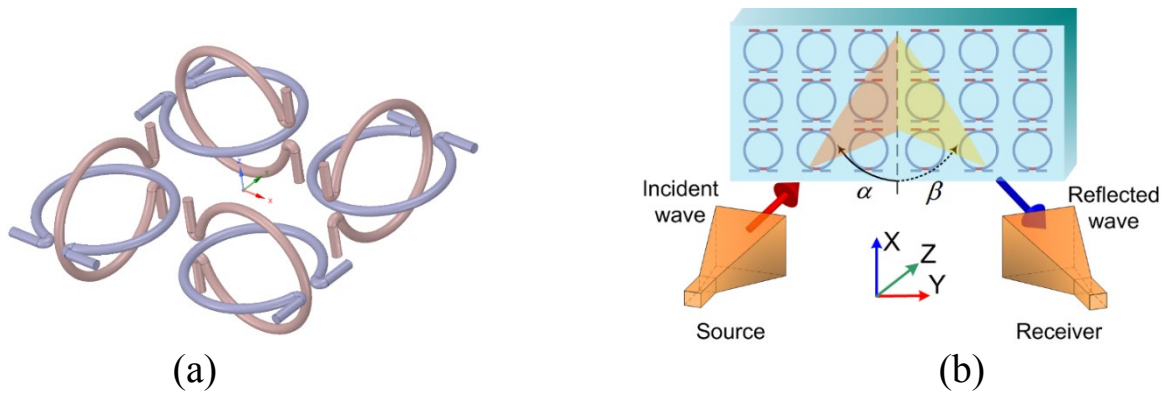


Рисунок 1 – (а) модель элементарной ячейки метаповерхности, проектируемой для существенного ослабления излучения, взаимодействующего с металлическими или металлизированными объектами сложной топологии поверхности; (b) схематическое изображение модели метаповерхности на основе омега элементов, расположенных в двух плоскопараллельных слоях. Показана схема проведения экспериментальных исследований по измерению отраженного сигнала

1. Создание трехмерных моделей метаповерхностей

Вариационный анализ исследуемых структур, проведенный с целью определения параметров метаповерхностей, способствующих максимальному ослаблению отраженного излучения, позволил определить оптимальные параметры метаповерхности, а также параметры элемента метаповерхности. Метаповерхность проектировалась на резонансную длину волны возбуждения $\lambda_{\text{res}}=100\text{мм}$, соответствующую частоте 3ГГц, соответственно длина омега элемента $L=\lambda_{\text{res}}/2=50\text{мм}$, а его радиус $R(\sqrt{2}-1)/2\pi=6,6\text{мм}$, диаметр сечения $d=1\text{мм}$, длина желобка $l=1,5\text{мм}$, длина плеча $a=(L-2\pi R+l)/2=5\text{мм}$ (см. рисунок 2 (а)), а также расстояние между соседними омега элементами, лежащими в одной плоскости, в пределах одной элементарной ячейки $t=20\text{мм}$ и расстояния между соседними элементарными ячейками $P=40\text{мм}$ для метаповерхности, показанной на рисунке 1 (а) и межслойный интервал $I=2\text{мм}$ для метаповерхности, показанной на рисунке 1 (b).

При создании экспериментального образца метаповерхности, показанной на рисунке 1 (а), методами аддитивных 3D технологий была произведена коррекция модели в среде SpaceClaim & Design Spark Mechanical, учитывающая особенности и возможности производственного процесса, как показано на рисунке 2 (b), а именно смещение взаимно ортогональных омега элементов в пределах элементарной ячейки ближе к ее центру, а также изменение формы омега элемента на прямоугольную.

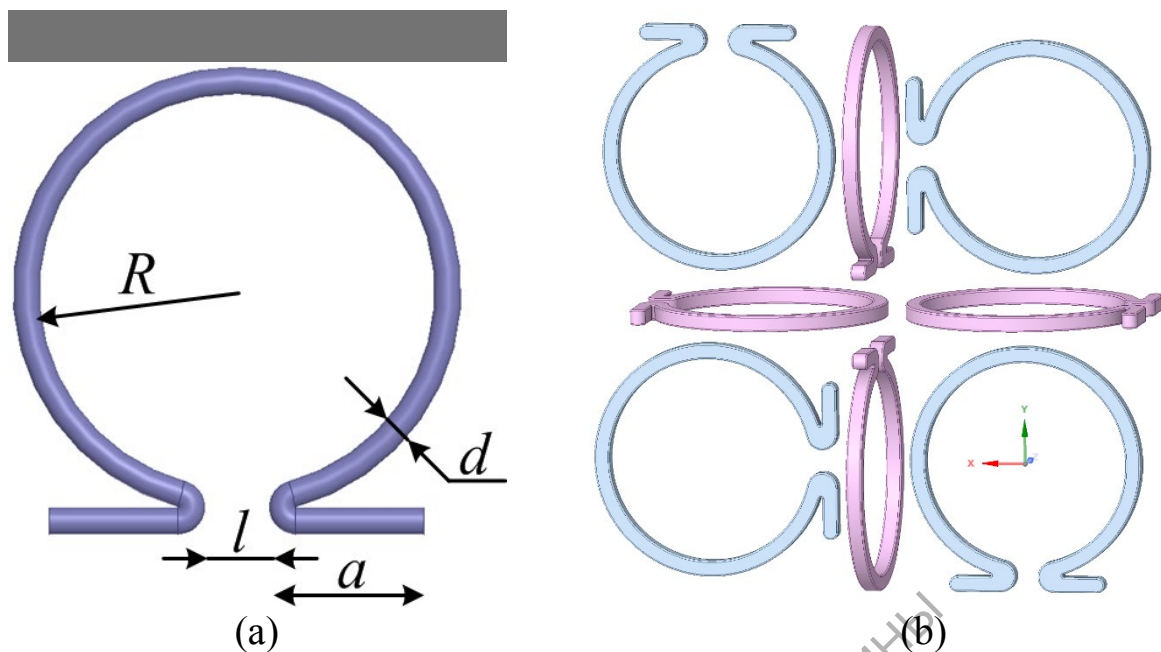


Рисунок 2 – (а) геометрические параметры омега элемента, ответственные за эффективную отражательную и поглощательную способность метаповерхности, а также свойство преобразования поляризации излучения; (б) альтернативная модель элементарной ячейки метаповерхности поглотителя излучения

Данные незначительные изменения элементарной ячейки позволили составить полноценную модель метаповерхности, содержащую подложку, а также элементы фиксации отдельных элементов и всего образца, как показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Модель метаповерхности с учетом подложки и элементов крепления, для составления управляющей программы для 3D принтеров и оборудования с ЧПУ

Разработанная 3D модель импортировалась в слайсер Cura 4.6.2 (или 15.04.06) для составления программ печати 3D принтером (Anycubic 4MaxPro или Anycubic Predator). Подложка для данной метаповерхности изготавливалась из пластика типа PLA, PET-G, а омега элементы – из проводящего пластика FLEX-conductive. В качестве альтернативы 3D модель также импортировалась в среду Vectric Aspire для составления управляющей программы обработки и изготовления подложки образца на фрезерном станке с ЧПУ Cutter HD (CNC-Technology) под управлением Mach 3. Второй вариант изготовления – фрезерная обработка – оказался более предпочтительным по следующим причинам: (а) он позволил создать подложку больших размеров без необходимости состыковок 3D напечатанных частей подложки, вызванной ограниченной рабочей зоной печати 3D принтеров в сравнении с рабочей зоной фрезера; (б) фрезерная обработка дает возможность использования большего количества материалов в качестве подложки для метаповерхности, не ограничиваясь только специализированным пластиком, а позволяет использовать, например, стеклотекстолиты, акриловое стекло, монолитный поликарбонат, вспененный пластик, дерево и др.; (в) фрезерная обработка позволила получить более ровную и однородную подложку; (г) омега элементы, напечатанные пластиком FLEX-conductive, не способны обеспечить расчетную электропроводимость, контролировать величину которой возможно в незначительных пределах лишь заменой на другой проводящий пластик; (д) при фрезеровке в качестве альтернативы 3D печати использовался метод формовки омега элементов из металлических порошков по заданному шаблону в подложке метаповерхности, что позволяет регулировать проводимость отдельных элементов метаповерхности, смешивая различные металлические порошки в различных концентрациях. Для формовки использовались металлические мелкодисперсные порошки меди, при этом акриловый наполнитель использовался в качестве фиксирующего компонента.

Были изготовлены два опытных образца, показанные на рисунках 4, 5, которые соответствуют ранее исследуемым электродинамическим моделям.

При изготовлении метаповерхности-поглотителя излучения, показанной на рисунке 4, в качестве каркаса для формовки и крепления омега элементов использовался стеклотекстолит FR-4 (диэлектрическая проницаемость на частоте 1 МГц порядка 5, тангенс угла потерь на этой же частоте порядка 0,025, поверхностное сопротивление порядка 10^5 МОм, объемное сопротивление порядка 10^5 МОм).

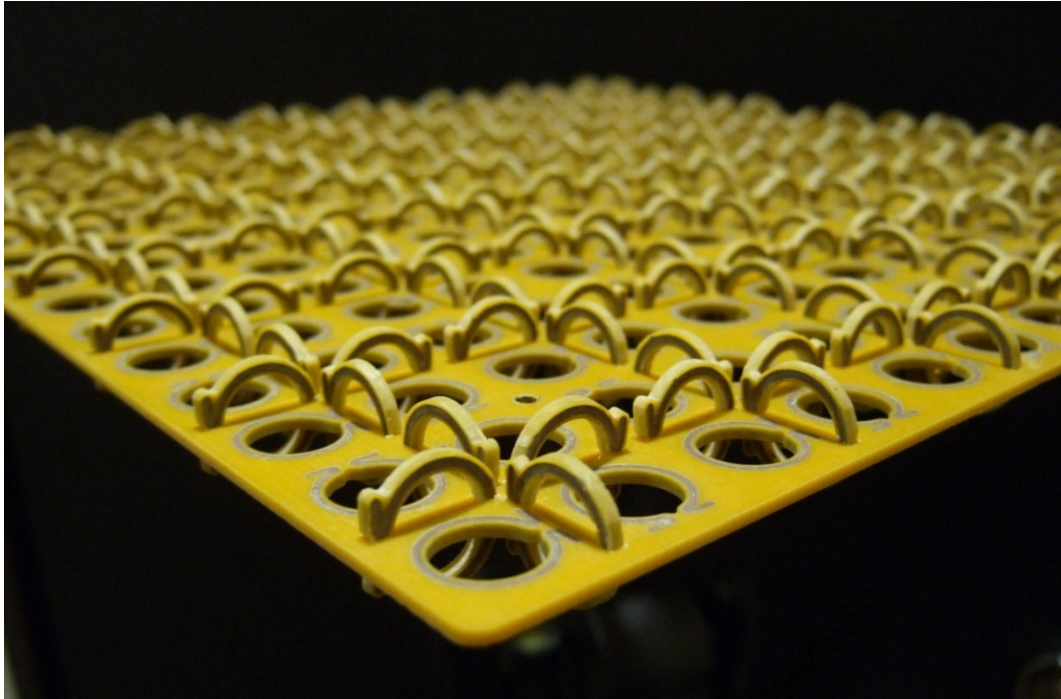


Рисунок 4 – Изготовленный экспериментальный образец метаповерхности для сильного поглощения излучения

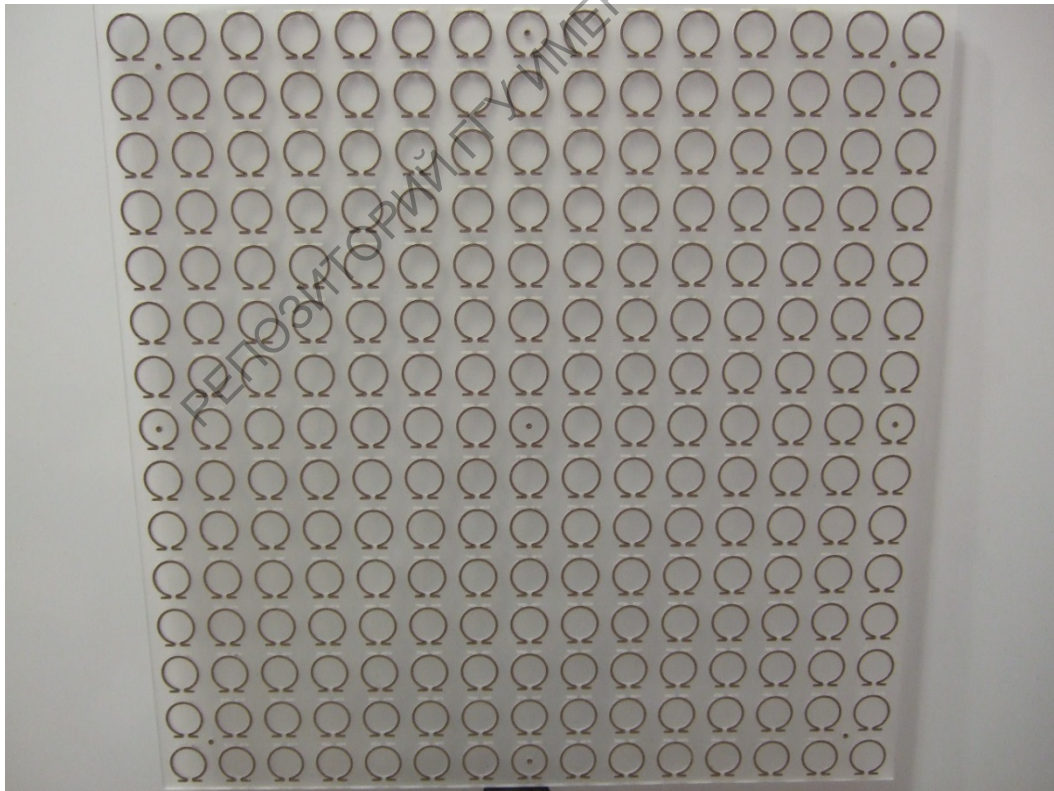


Рисунок 5 – Изготовленный экспериментальный образец метаповерхности для частичного поглощения излучения, а также преобразования поляризации отраженного излучения

Стоит отметить, что толщина полученного образца существенно меньше резонансной длины волны, а именно: $2R=13,2\text{мм}\approx\lambda_{\text{res}}/7$. При изготовлении двухслойного образца на рисунке 5, в качестве подложки использовалось акриловое стекло (диэлектрическая проницаемость на частоте 1 МГц порядка 3,5; удельное сопротивление порядка 10^{13} Ом·см). Мелкодисперсный порошок меди использовался в качестве наполнителя для изготовления проводящих омега элементов, при этом использовался акриловый герметик для фиксации.

Заключение

Разработаны несколько экспериментальных образцов метаповерхностей с целью экранизации металлических или металлизированных объектов сложной формы и уменьшения отражения излучения от них. Одна из моделей хорошо подходит для умеренного ослабления падающего сигнала и преобразования поляризации отраженного, тогда как более сложная – для сильного поглощения падающего излучения, исключающего как отраженный, так и прошедший сигналы. Было предложено использование металлических порошков для получения омега элементов заданной формы и проводимости методом формовки. Использование современных программ автоматизированного проектирования, а также аддитивных средств производства (3D принтеры, оборудование с числовым программным управлением) позволило изготовить образцы с высокой точностью, необходимой для проведения исследований.

Результаты данного исследования могут быть использованы при проектировании устройств и материалов для экранирования металлических или металлизированных объектов сложной формы, разработке прерывателей оптоволоконных систем, индикаторов инфракрасного излучения, а также устройств пространственной модуляции инфракрасного излучения.

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, договоры № Ф19КИТГ–017, № Ф20ПТИ–007.

Литература

1. Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators. / A. P. Balmakou [et al.] // Opt. Lett. – 2015. – Vol. 40. – P. 2084-2087.
2. Designing of ultra-thin electromagnetic sensor using omega-

particles / A. P. Balamakou [et al.] // Proc. of Chinese-Belarusian Workshop (Nanjing). – 2019. – P. 9–10.

3. Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of omega elements / I. V. Semchenko [et al.] // J. Commun. Technol. Electron. – 2007. – Vol. 52. – P. 1002–1005.

4. Design and Creation of Metal-Polymer Absorbing Metamaterials Using the Vacuum-Plasma Technologies. In: Laukaitis G. (eds) Recent Advances in Technology Research and Education / I. V. Semchenko [et al.] // INTER-ACADEMIA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2019. – Vol. 53. – P. 105-112.