

УДК 621.396

СОЗДАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D ПЕЧАТИ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОКРЫВАЮЩИХ ОБЪЕКТЫ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

А.П. Балмаков¹, Д.В. Слепенков¹, С.А. Хахомов¹,
И.В. Семченко¹, Д. Ванг², В. Сонг³

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Университет Цзяннань, Уси

³Пекинский технический институт

CREATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF METASURFACE MODELS COVERING COMPLEX OBJECTS USING 3D PRINTING AND MILLING

A.P. Balmakou¹, D.V. Slepiankou¹, S.A. Khakhomov¹,
I.V. Semchenko¹, J. Wang², W. Song³

¹Francisk Skorina Gomel State University

²Jiangnan University, Wuxi

³Beijing Institute of Technology

В работе представлены результаты разработок, выполненных с использованием программ автоматизированного проектирования, аддитивных средств производства, таких как 3D принтеры, а также оборудования с числовым программным управлением. Изготовлены и экспериментально исследованы образцы метаповерхностей для экранизации металлических или металлизированных объектов сложной формы и уменьшения отражения излучения от них.

Ключевые слова: элементарная ячейка, элемент метаповерхности, омега элемент, электрическая проводимость, преобразование поляризации излучения, безэховая камера, коэффициент поглощения излучения.

The paper presents the results of developments carried out using computer-aided design programs, additive manufacturing tools such as 3D printers, and numerical control equipment. Samples of metasurfaces were made and experimentally investigated for screening metal or metallized objects of complex shape and reducing the reflection of radiation from them.

Keywords: unit cell, metasurface element, omega element, electrical conductivity, transformation of radiation polarization, anechoic chamber, radiation absorption coefficient.

Введение

Объектом исследования в данной работе являются композиционные металл-диэлектрические двумерные периодические структуры с определенной топологией поверхности и электродинамическими параметрами, спроектированные таким образом, что способны взаимодействовать с электромагнитным излучением не типичным для природных материалов образом, приводя к изменению характеристик этого излучения.

Целью данной работы является установление закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения микроволнового диапазона с метаповерхностями с целью эффективного изменения электродинамических параметров излучения, исследование различных типов метаповерхностей для достижения расчетных электродинамических характеристик, направленных на эффективное отражение, поглощение, пропускание, преобразование электромагнитного излучения, взаимодействующего со структурой метаповерхности, нахождение необходимых параметров структуры метаповерхности для согласования импеданса метаповерхности с импедансом

свободного пространства, уменьшения коэффициента отражения, а также изготовление экспериментальных образцов метаповерхностей и рассмотрение возможности разработки новых типов электродинамических материалов, основанных на концепции исследуемых метаповерхностей, например, идеальных поглотителей электромагнитного излучения, преобразователей поляризации излучения и др.

Для достижения поставленных целей в работе использованы методы компьютерного моделирования, вариационный и топологический анализ моделей, компьютерное автоматизированное 3D проектирование, экспериментальное исследование комплексных коэффициентов передачи и отражения (S_{21} , S_{11} параметров), а также коэффициента поглощения излучения.

1 Создание трехмерных моделей метаповерхностей

С целью создания слабоотражающих тонких поглощающих метаповерхностей для уменьшения отражения микроволнового излучения от металлических / металлизированных объектов

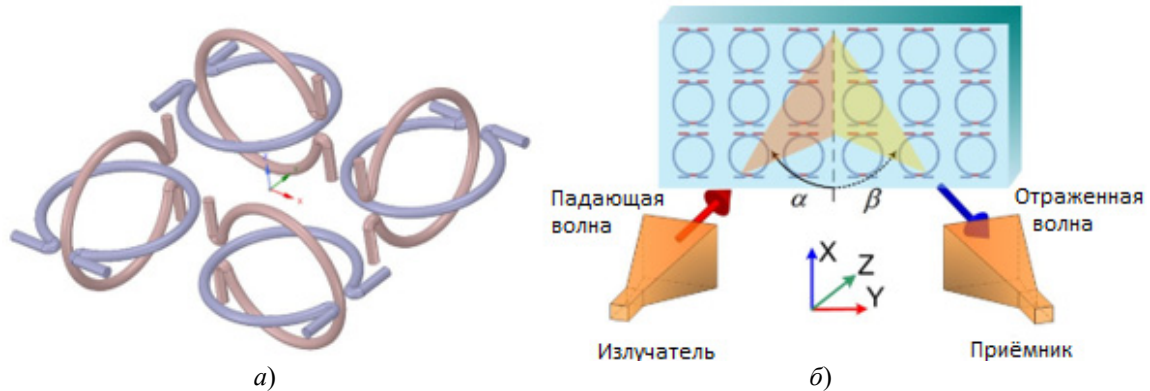


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение элементарной ячейки метаматериала и схема проведения эксперимента

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

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 1.1, а) и частичного поглощения излучения и преобразования поляризации отраженного сигнала (рисунок 1.1, б).

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 $\lambda_{\text{res}} = 100$ мм, соответствующую частоте 3 ГГц, соответственно длина элемента

$$L = \lambda_{\text{res}} / 2 = 50 \text{ мм, а его радиус } R = \frac{\sqrt{2}-1}{2\pi} = 6,6 \text{ мм,}$$

диаметр сечения $d = 1$ мм, длина желобка

$$l = 1,5 \text{ мм, длина плеча } a = \frac{L - 2\pi R + l}{2} = 5 \text{ мм}$$

(рисунок 1.2), а также расстояние между соседними омега элементами, лежащими в одной плоскости, в пределах одной элементарной ячейки $t = 20$ мм и расстояния между соседними элементарными ячейками $P = 40$ мм для метаповерхности, показанной на рисунке 1.1, а) и межслойный интервал $I = 2$ мм для метаповерхности, показанной на рисунке 1.1 б).

При создании экспериментального образца метаповерхности, показанной на рисунке 1.1, 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 1.3, а именно смещение взаимно ортогональных омега элементов в пределах элементарной ячейки ближе к ее центру, а также изменение формы омега элемента на прямоугольную. 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 1.4.

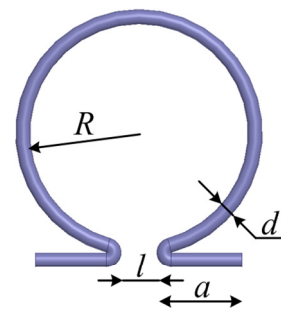


Рисунок 1.2 – Геометрические параметры омега элемента, ответственные за эффективную отражательную и поглощательную способность метаповерхности, а также свойство преобразования поляризации излучения

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.

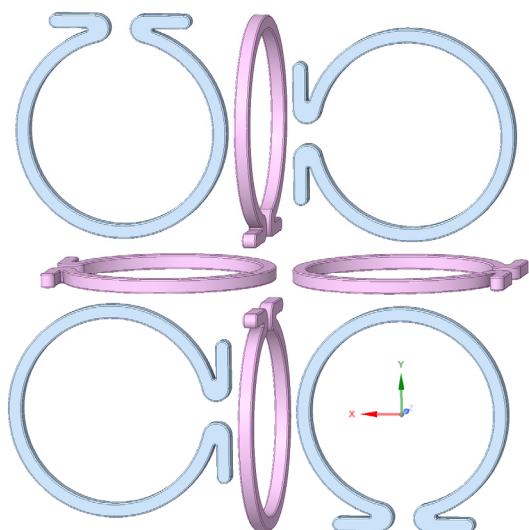


Рисунок 1.3 – Альтернативная модель элементарной ячейки метаповерхности поглотителя излучения

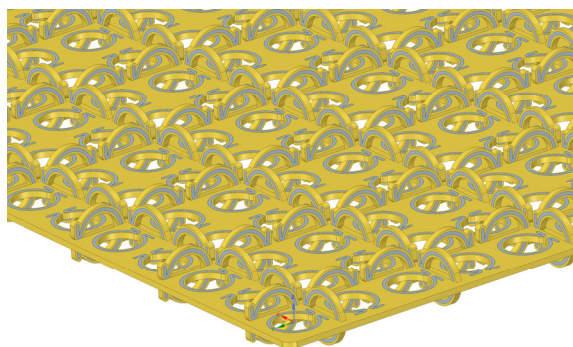


Рисунок 1.4 – Модель метаповерхности с учетом подложки и элементов крепления, для составления управляющей программы для 3D принтеров и оборудования с ЧПУ

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:

1) 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;

2) 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.;

3) фрезерная обработка позволила получить более ровную и однородную подложку;

4) омега элементы, напечатанные пластиком FLEX-conductive, не способны обеспечить расчетную электропроводимость, контролировать величину которой возможно в незначительных пределах лишь заменой на другой проводящий пластик;

5) 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 1.5, 1.6, которые соответствуют ранее исследуемым электродинамическим моделям. При изготовлении метаповерхности-поглотителя излучения, показанной на рисунке 1.5, в качестве каркаса для формовки и крепления омега элементов использовалась 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). 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 1.6, 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.

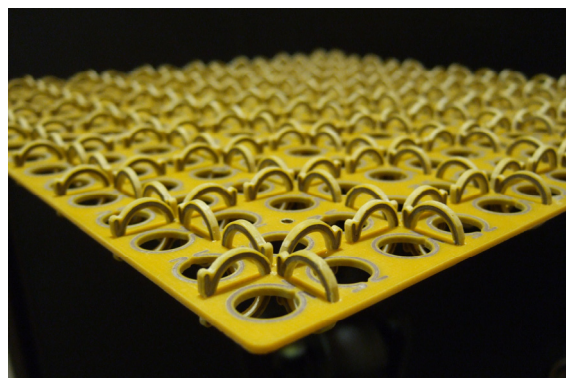


Рисунок 1.5 – Изготовленный экспериментальный образец метаповерхности для сильного поглощения излучения

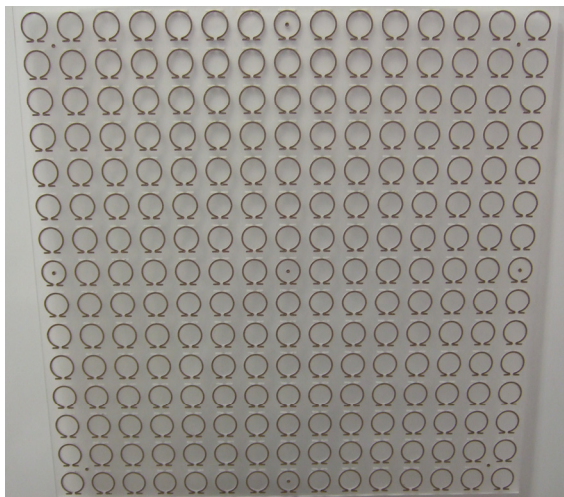


Рисунок 1.6 – Изготовленный экспериментальный образец метаповерхности для частичного поглощения излучения, а также преобразования поляризации отраженного излучения

2 Экспериментальное исследование характеристик созданных поглощающих метаповерхностей в безэховой камере

Экспериментальные исследования слабоотражающих тонких поглощающих электромагнитное излучение метаповерхностей проводились в модернизированной безэховой камере лаборатории «Физики волновых процессов» ГГУ им. Ф. Скорины размерами 4,5 x 11,4 x 3,1 м и уровнем безэховости в цилиндрической области $D = 30$ см по горизонтальной оси симметрии камеры порядка -40 дБ. Камера электродинамически изолирована от внешних электромагнитных воздействий клеткой Фарадея с толщиной листовой стали 0,8 мм. Внутренние поверхности камеры покрыты поглотителем микроволнового излучения «ТОРА-25» (для покрытия поверхности входной двери использовался поглотитель «ТОРА-9»), который представляет собой диэлектрический радиопоглощающий материал пирамидального типа (рисунок 2.1) в виде панелей из эластичного пенополиуретана с углеродным наполнителем, предназначенный для поглощения излучения и, тем самым, предотвращения его отражения от металлических стенок клетки Фарадея, обеспечивая рабочий диапазон измерений 1–37,5 ГГц с коэффициентом отражения $-25 \div -50$ дБ соответственно.

Безэховая камера оснащена современным измерительным оборудованием, состоящим из векторного анализатора цепей (ВАЦ) PicoVNA 106, аппаратно-программного комплекса (АПК) для проведения радиочастотных измерений антенн в дальней зоне ЮСТ FarField, осциллографов Hantek DSO-1062B, 2D72, современных вычислительных компьютеров, антенн П6-23А, П6-126, паяльной станции и др.

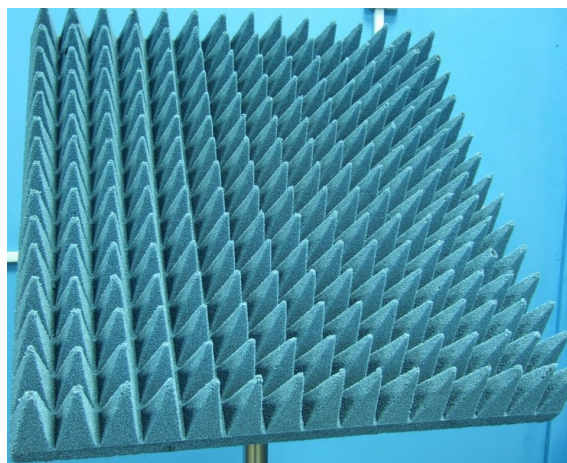
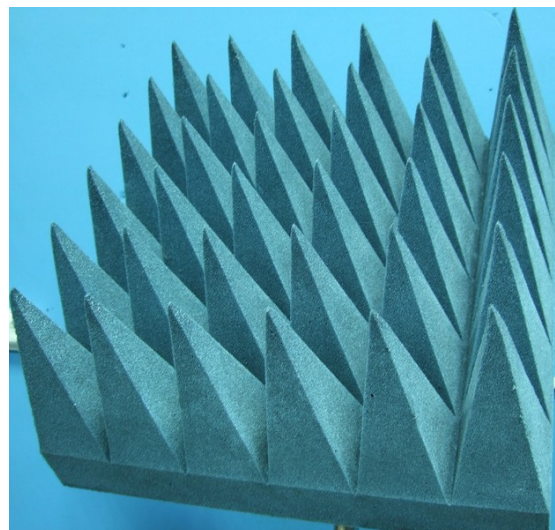
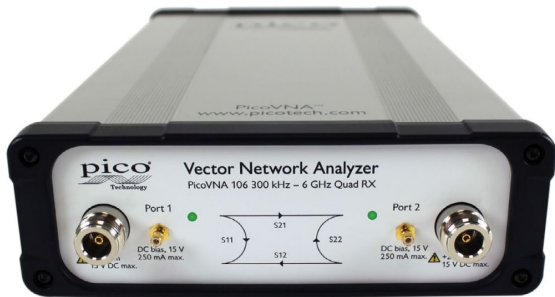


Рисунок 2.1 – Внешний вид поглотителя микроволнового излучения «ТОРА-25» и «ТОРА-9»

ВАЦ PicoVNA 106 (рисунок 2.2, а) позволяет проводить высокоточные измерения электродинамических характеристик антенн, метаматериалов, метаповерхностей и других радиоэлектронных устройств посредством регистрации комплексных коэффициентов передачи и отражения (S -параметров) устройств как в безэховой камере, так и на открытом пространстве, обеспечивая при этом частотный диапазон измерений от 300 кГц до 6 ГГц при динамическом диапазоне до -118 дБ. ВАЦ PicoVNA 106 обладает двумя высокочастотными портами типа N(f) для подключения передающих и приемных антенн. Для калибровки ВАЦ используется калибратор: TA345 SOLT-STD-F Standard 6 GHz SMA(f), подключаемый к портам ВАЦ посредством фазостабильных кабелей TA336 Standard 6 GHz Nmm-SMAm (рисунок 2.2, б).

АПК для измерения характеристик антенн ЮСТ FarField оснащается автоматизированным опорно-поворотным устройством (ОПУ) второго типа с установленной на него антенной П6-126 для измерения диаграмм направленности



а)



б)

Рисунок 2.2 – Измерительное оборудование
а) ВАЦ PicoVNA 106, б) Калибраторы и фазостабильные кабели для калибровки ВАЦ PicoVNA 106

амплитудных, фазовых, поляризационных характеристик антенн и новых типов материалов с использованием векторного анализатора цепей PicoVNA 106, а также дополнительным оборудованием для проведения исследований, включая портативный компьютер с операционной системой Windows-10, высокочастотные антенные кабели SMAm-SMAm 1-18 ГГц, лабораторный блок питания MCH K3010DN, осциллографическое оборудование Hantek DSO-1062B, 2D72, переходники для антенн П6-23Ф Nm-SMAf, Nm-SMAm, Nf-SMAf, Nf-SMAm и др. АПК ЮСТ FarField имеет отдельный блок управления ОПУ-2 с соответствующим программным обеспечением для Windows-10, показанный на рисунке 2.3, предназначенный для автоматизированного измерения поворотным методом электромагнитных параметров новых композитных материалов (трехмерных метаматериалов и двумерных метаповерхностей), а также новых типов антенн в безэховой камере, характеристик их направленности. При этом данный комплекс позволяет одновременно измерять амплитудные и фазовые диаграммы направленности, а также коэффициент усиления, поляризационные характеристики, рассчитывать частотные зависимости уровня боковых лепестков, направления и ширины главного максимума диаграммы направленности, координат фазового центра антенны.

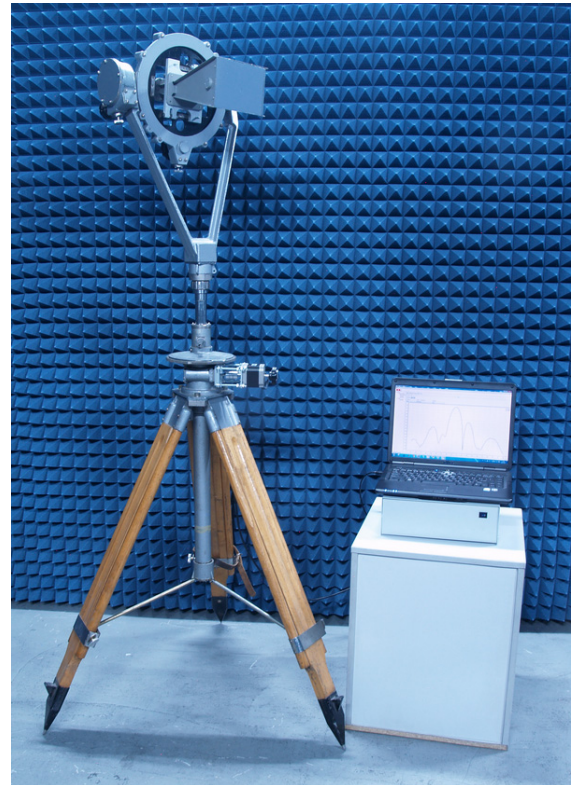


Рисунок 2.3 – Блок управления АПК ЮСТ FarField с портативным компьютером, а также ОПУ-2 с антенной П6-126

Разработанные и изготовленные образцы метаповерхностей экспериментально исследовались в безэховой камере с целью определения комплексных коэффициентов передачи и отражения (S_{21} , S_{11} параметров) с последующим расчетом коэффициента поглощения в операционном диапазоне частот ВАЦ PicoVNA 106 для двух случаев: а) излучение падает по нормали к метаповерхности (рисунок 2.4), б) излучение падает под углом 30° к метаповерхности, как это показано на рисунке 2.5. При этом рассматривались случаи TE и TM моды поляризации падающего линейно-поляризованного излучения.

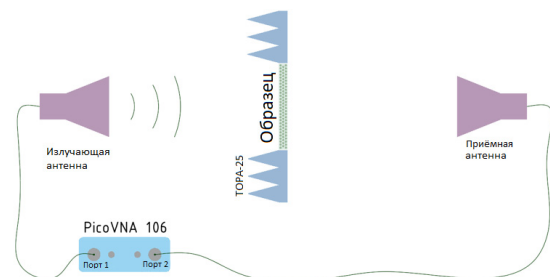


Рисунок 2.4 – Схема проведения экспериментальных исследований по измерению коэффициента поглощения излучения экспериментальным образцом метаповерхности при падении излучения по нормали к метаповерхности

Для генерации и регистрации излучения указанных мод поляризации использовались две широкополосные рупорные антенны П6-23А (рисунок 2.6, а). Данная антенна относится к типу рупорно-линзовых антенн со стандартным волновым сопротивлением 50Ω , коаксиальным разъемом N-типа и предназначена для:

- измерения плотности потока энергии,
- создания электромагнитного поля с заданной плотностью,
- измерения параметров антенн различных типов,
- измерения параметров электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств,
- мониторинга электромагнитной обстановки и пеленгации источников электромагнитного излучения совместно с приёмными устройствами.

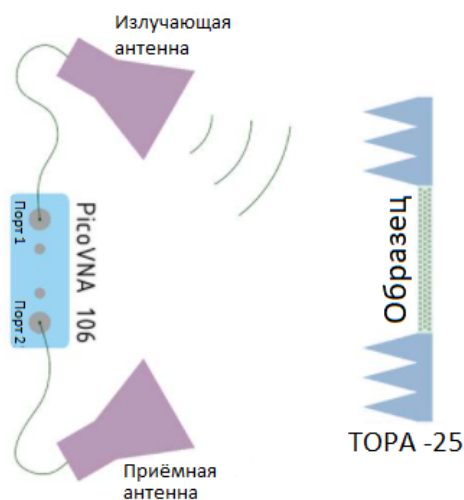


Рисунок 2.5 – Схема проведения экспериментальных исследований по измерению коэффициента поглощения излучения экспериментальным образцом метаповерхности при падении излучения под углом 30° к нормали образца

Технические характеристики антенны П6-23А:

- диапазон частот 1–12 ГГц;
- коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) $< 1,5$;
- эффективная площадь не менее 150 см^2 ;
- ВЧ-разъем 50 Ом N-типа ($7 / 3,04 \text{ мм}$);
- погрешность измерений не более 20% ;
- поляризация линейная.

Используемые антенны П6-23А комплектовались треногами (ОПУ) второго типа (рисунок 2.6, б), а именно «Тренога УШЯИ.468539.002 (ОПУ-2)», обеспечивая ориентацию по азимуту, углу места, поляризации и высоте в соответствующих диапазонах:

- углы поворота по азимуту от 0° до 360° с отсчетом $0,1^\circ$;
- угол поворота по углу места от -30° до $+90^\circ$ с отсчетом $0,1^\circ$;

- угол поворота плоскости поляризации от -95° до $+95^\circ$ с отсчетом $0,1^\circ$;
- высота установки оси механизма ориентации ($1,35\text{--}2,5$) м;
- шаг плавной регулировки высоты оси механизма ориентации $0,25$ м.

Расстояние между рупорными антеннами при измерении коэффициента прохождения излучения составляло 5 м, при этом образец располагался на равноудаленном расстоянии от излучающей и приемной антенн на специальной диэлектрической вертикальной плоской стойке-держателе, покрытой поглотителем «ТОРА-25» с проемом под установку образца, как показано на рисунке 2.7.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Комплект ОПУ с рупорной антенной

- а) широкополосная рупорная антенна П6-23А;
- б) опорно-поворотное устройство «Тренога УШЯИ.468539.002 (ОПУ-2)» для базирования антенны П6-23А

Передающая рупорная антенна подключалась к первому порту ВАЦ коаксиальным кабелем 50 Ом для генерации квазиплоской волны с необходимой линейной поляризацией TE или TM. Прошедшая волна регистрировалась приемной рупорной антенной, соединенной с вторым портом ВАЦ. Регистрация комплексных коэффициентов передачи и отражения (S_{21} , S_{11} параметров) осуществлялась ВАЦ в диапазоне частот от 0,3 до 6 ГГц со скоростью 5500 измерений в секунду.

При проведении экспериментальных исследований выполнялся ряд референтных измерений S параметров. В случае нормального падения излучения (рисунок 2.4), замерялся комплексный коэффициент отражения излучения (S_{11}), когда экспериментальный образец был извлечен из стойки-держателя и образовавшийся проем был заполнен металлическим гладким листом, размеры которого были идентичны размерам исследуемого образца. Металлический лист очень хорошо отражает падающее на него микроволновое излучение, поэтому предполагается, что в этом случае излучение от передающей антенны полностью отражалось от металлического листа, позволяя тем самым получить референтный максимальный отраженный сигнал в исследуемом диапазоне частот.

В случае падения излучения под углом коэффициент отражения излучения от экспериментального образца измерялся по схеме, показанной на рисунке 2.5. При этом также проводились предварительные референтные измерения S параметров, а именно, замерялся комплексный коэффициент отражения (S_{11}) от гладкого металлического листа, установленного в проем стойки-держателя, размеры которого были идентичны размерам исследуемого образца. Предполагается, что все падающее излучение полностью отражается от него под тем же углом, под которым падает, таким образом позволяя измерить максимальный референтный уровень отраженного под углом сигнала в исследуемом диапазоне частот.

Референтный коэффициент прохождения (S_{21}) для случаев как нормального падения, так и падения под углом проводился по схеме, показанной на рисунке 2.4. При этом экспериментальный образец был извлечен из стойки-держателя и излучение могло беспрепятственно проходить через образовавшийся проем, площадь которого равнялась площади образца, таким образом позволяя регистрировать референтный максимальный прошедший сигнал в исследуемом диапазоне частот.

После получения всех необходимых экспериментальных референтных данных измерений S -параметров были извлечены комплексные коэффициенты передачи и отражения для экспериментального образца в операционном диапазоне частот ВАЦ PicoVNA 106.

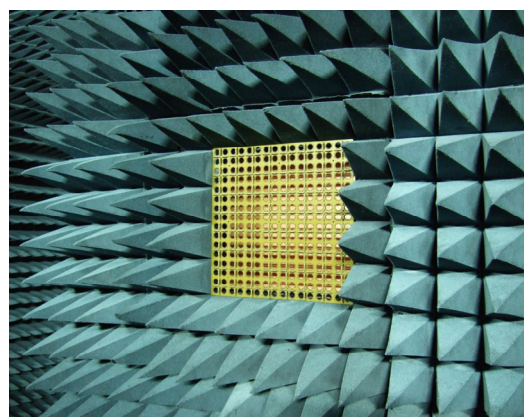


Рисунок 2.7 – Размещение экспериментального образца в безэховой камере на специальной диэлектрической стойке-держателе, покрытой поглотителем микроволнового излучения «ТОРА-25»

Коэффициент поглощения A излучения экспериментальным образцом рассчитывался по полученным данным измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения, посредством расчета коэффициентов прохождения T и отражения R , а именно, $A = 1 - T - R = 1 - |t^2| - |r^2|$ [5], [6]. Результаты данных расчетов проиллюстрированы на рисунке 2.8 для случая нормального падения излучения на образец и на рисунке 2.9 для случая падения излучения под углом 30° .

Пиковые значения поглощения излучения образцом оказались ниже рассчитываемых на этапе проектирования значений, что может быть объяснено отличием материальных параметров металлического порошка меди, используемого при формовке омега элементов [1]–[4], а также материальных параметров подложки, на которой они располагались, от тех, которые были заложены при расчетах и моделировании из-за наличия посторонних примесей, окислов или других факторов.

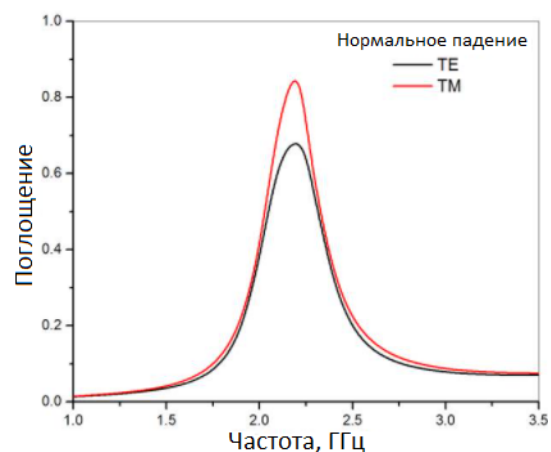


Рисунок 2.8 – Коэффициент поглощения излучения образцом при нормальном падении

При исследовании коэффициента отражения излучения от образца по схеме, изображенной на рисунке 2.5, можно заметить, что размещение образца в плоскости стойки-держателя не совсем удачное, т. к. при этом наблюдаются серьезные ограничения по выбору интервала углов падения излучения на образец, связанные с довольно большой высотой пирамид поглотителя «ТОРА-25», которые начинают затенять падающее и отраженное излучение при углах порядка 30° и более. Поэтому экспериментальные исследования по наклонному падению были ограничены данной величиной угла падения, при этом, как можно видеть из рисунков 2.8 и 2.9, спектр поглощения образцом в этом случае оказался практически не отличающимся от спектра при нормальном падении.

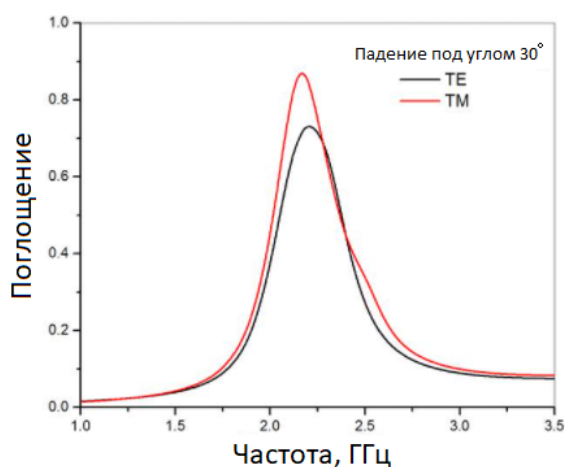


Рисунок 2.9 – Коэффициент поглощения излучения образцом при падении под углом 30°

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, исключая 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.

Подробно описаны условия проведения эксперимента, характеристики используемого оборудования, методика измерения и расчета коэффициентов поглощения излучения опытным

образцом метаповерхности. Приведенные результаты находятся в соответствии с функциональными возможностями разрабатываемого поглотителя излучения, однако были замечены отклонения от расчетной частоты и высоты пика поглощения, которые, по всей видимости, связаны с различием реальных материальных параметров порошка меди и стеклотекстолита от тех, которые были заложены на стадии моделирования.

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, селективных по частоте и поляризации отражателей, преобразователей поляризации излучения [7]–[10].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators* / A. Balmakou, M. Podalov, S. Khakhomov, D. Stavenga, I. Semchenko // *Opt. Lett.* – 2015. – Vol. 40, № 9. – P. 2084–2087.
2. *Designing of ultra-thin electromagnetic sensor using omega-particles* / A. Balmakou, S. Khakhomov, I. Semchenko, D. Stavenga, J. Wang // *Proc. of Chinese-Belarusian Workshop (Nanjing)*. – Nanning, China. – 2019. – P. 9–10.
3. *Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of Ω elements* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, M.A. Podalov, S.A. Tretyakov // *J. Commun. Technol. Electron.* – 2007. – Vol. 52, № 9. – P. 1002–1005.
4. *Design and Creation of Metal-Polymer Absorbing Metamaterials Using the Vacuum-Plasma Technologies* / I. Semchenko, S. Khakhomov, A. Samofalov, I. Faniayeu, D. Slepiankou, V. Solodukha, A. Pyatlitski, N. Kovalchuk, A. Goncharenko, G. Sinitsyn // In: Laukaitis G. (eds) *Recent Advances in Technology Research and Education. INTER-ACADEMIA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems.* – Springer. – 2019. – Vol. 53. – P. 105–112.
5. *Broadband reflectionless metasheets: Frequency-selective transmission and perfect absorption* / V.S. Asadchy, I.A. Faniayeu, Y. Ra'di, S.A. Khakhomov, I.V. Semchenko, S.A. Tretyakov // *Phys. Rev. X.* – 2015. – Vol. 5, № 3. – P. 031005.
6. *Planar Broadband Huygens' Metasurfaces for Wave Manipulations* / F.S. Cuesta, I.A. Faniayeu, V.S. Asadchy, S.A. Tretyakov // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2018. – Vol. 66, № 12. – P. 7117.
7. *Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур* / С. Цянь, В.А. Банный, А.Л. Самофалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов // *Проблемы физики, математики и техники.* – 2014. – № 4 (21). – С. 40–45.

8. *Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola // *Electromagnetics*. – 2001. – Vol. 21, № 5. – P. 401–414.

9. *Semchenko, I.V.* Artificial uniaxial bianisotropic media at oblique incidence of electromagnetic waves / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // *Electromagnetics*. – 2002. – Vol. 22, № 1. – P. 71–84.

10. *Stored and absorbed energy of fields in lossy chiral single-component metamaterials* / I. Semchenko, A. Balmakou, S. Khakhomov, S. Tretyakov // *Physical Review B*. – 2018. – Vol. 97, № 1. – С. 014432.

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

Поступила в редакцию 14.04.2021.