

МЕТАПОВЕРХНОСТЬ НА ОСНОВЕ ОДНОВИТКОВЫХ ПЛАНАРНЫХ СПИРАЛЕЙ СО СВОЙСТВОМ НЕ ОТРАЖАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

И.А. Фаняев¹, А.Л. Самофалов¹, И.В. Семченко²,
С.А. Хахомов¹, А.Ю. Кравченко^{1,3}, Мэнмэн Ли⁴

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск

³Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти, Гомель

⁴Нанкинский университет науки и технологии

METASURFACE BASED ON SINGLE-TURN PLANAR SPIRALS WITH NON-REFLECTIVE ABSORBER PROPERTY IN THE MICROWAVE RANGE

I.A. Faniayeu¹, A.L. Samofalov¹, I.V. Semchenko²,
S.A. Khakhomov¹, A.Y. Kravchenko^{1,3}, Mengmeng Li⁴

¹Francisk Skorina Gomel State University

²SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk

³Belarusian Scientific Research and Design Institute of Oil, Gomel

⁴Nanjing University of Science and Technology

Аннотация. Проведен теоретический расчет, моделирование и экспериментальное исследование метаповерхности на основе одновитковых планарных спиралей для получения максимального поглощения при отсутствии отражения электромагнитной волны в СВЧ диапазоне. Расчет структурных параметров поглощающего метаматериала проведен для двух стеклотекстолитов – Arlon AD255C и Taconic TLY. Результаты исследований подтвердили возможность использования предложенной структуры в качестве не отражающего поглотителя электромагнитных волн.

Ключевые слова: метаповерхность, поглощение, планарная спираль, СВЧ диапазон.

Для цитирования: Метаповерхность на основе одновитковых планарных спиралей со свойством не отражающего поглотителя в СВЧ диапазоне / И.А. Фаняев, А.Л. Самофалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Ю. Кравченко, Мэнмэн Ли // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 3 (60). – С. 38–43. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_3_60_38. – EDN: DDYWPW

Abstract. The theoretical calculation, modelling and experimental study of the metasurface based on single-turn planar spirals for obtaining maximum absorption in the absence of electromagnetic wave reflection in the microwave range have been carried out. The calculation of the structural parameters of the absorbing metamaterial was carried out for two glass-textolites – Arlon AD255C and Taconic TLY. The results of the studies confirmed the possibility of using the proposed structure as a non-reflective absorber of electromagnetic waves.

Keywords: metasurface, absorption, planar spiral, microwave range.

For citation: Metasurface based on single-turn planar spirals with non-reflective absorber property in the microwave range / I.A. Faniayeu, A.L. Samofalov, I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.Y. Kravchenko, Mengmeng Li // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 3 (60). – P. 38–43. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_3_60_38 (in Russian). – EDN: DDYWPW

Введение

Эффективным, или совершенным поглотителем можно считать метаповерхность, способную полностью поглощать падающие на нее СВЧ волны, при этом коэффициенты отражения и прохождения такого устройства на резонансной частоте должны равняться нулю.

Для получения полного поглощения в метаматериале или на метаповерхности необходимо получить эквивалентный электромагнитный

отклик ячейки такой искусственной структуры. При этом коэффициенты отражения и прохождения вблизи резонансной частоты должны равняться нулю, т. е. метаповерхность должна не пропускать и не отражать электромагнитные волны в рассматриваемом диапазоне частот. Достичь желаемых свойств позволяет баланс электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаповерхности. В качестве элемента метаповерхности мы

рассматриваем одновитковую планарную спираль. Под действием падающей плоской электромагнитной волны в такой одновитковой планарной спирали индуцируются дипольные моменты, которые можно выразить через компоненты тензоров электрических, магнитных, электромагнитных и магнитоэлектрических поляризуемостей. Равные по абсолютной величине амплитуды этих поляризуемостей означают сбалансированный отклик от такого микрорезонатора. Данная методика подробно описана в работах [1]–[2]. В статье [3] в качестве элемента метаповерхности предложена планарная спираль, состоящая из двух витков. В статьях [4]–[6] исследованы метаповерхности на основе двухвитковых планарных спиралей, обладающие свойствами поглотителя и преобразователя поляризации СВЧ волн, не испытывающих отражение. В отличие от двухвитковой планарной спирали, рассматриваемая нами в данной статье одновитковая спираль содержит меньшее число элементов (полосок и отверстий на печатной плате), что приводит к упрощению и удешевлению изготовления метаповерхности в рамках технологий печатных плат.

Необходимо отметить, что электромагнитные свойства метаматериалов и метаповерхностей, состоящих из объемных гладких спиральных элементов, интенсивно исследовались на протяжении последних десятилетий [7]–[14].

1 Теоретические сведения

Рассмотрим уравнения, описывающие отражённые и прошедшие поля в случае эффективного поглотителя падающих электромагнитных волн на резонансной частоте. Расположение и количество планарных спиралей для реализации метаповерхностью функции поглощения может быть найдено, если предварительно определена требуемая ориентация электрического и магнитного дипольных моментов в элементарной ячейке. Для достижения полного поглощения падающей волны компоненты отраженных и прошедших полей должны удовлетворять условиям:

$$E_r^x = 0, E_t^x = 0, E_r^y = 0, E_t^y = 0. \quad (1.1)$$

Не нарушая общности подхода, рассмотрим линейно поляризованную падающую волну, вектор E которой колеблется, например, вдоль оси ox , при этом поля падающей волны имеют вид

$$\vec{E}_{inc} = E_0 \vec{x}_0, \vec{H}_{inc} = -\frac{E_0}{\eta_0} \vec{y}_0, \quad (1.2)$$

где E_0 – амплитуда волны, η_0 – импеданс свободного пространства. Тогда компоненты отраженного $E_r^{x,y}$ и прошедшего $E_t^{x,y}$ полей могут быть найдены из уравнений:

$$E_r^x = -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_x - \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \quad (1.3)$$

$$E_t^x = E_0 - \frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_x + \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \quad (1.4)$$

$$E_r^y = -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_y + \frac{1}{c} \hat{m}_x \right), \quad (1.5)$$

$$E_t^y = -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_y - \frac{1}{c} \hat{m}_x \right). \quad (1.6)$$

Здесь \hat{p}_x и \hat{p}_y , \hat{m}_x и \hat{m}_y – компоненты электрического и магнитного дипольных моментов элементарной ячейки метаповерхности, S – площадь этой ячейки, c – скорость света в вакууме, ω – угловая частота волны, j – мнимая единица.

Подставив условие (1.1) в (1.3)–(1.6), можно получить конечные условия для отсутствия пропускания и отражения волны с любой поляризацией, основанные на электрических и магнитных дипольных моментах элементарной ячейки метаповерхности, которые записываются следующим образом:

$$0 = -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_x - \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \quad (1.7)$$

$$0 = E_0 - \frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_x + \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \quad (1.8)$$

$$0 = -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_y + \frac{1}{c} \hat{m}_x \right), \quad (1.9)$$

$$0 = -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_y - \frac{1}{c} \hat{m}_x \right). \quad (1.10)$$

Отсюда следует, что

$$\hat{p}_x = \frac{1}{c} \hat{m}_y, \quad (1.11)$$

$$\frac{2SE_0}{j\omega\eta_0} = \hat{p}_x + \frac{1}{c} \hat{m}_y, \quad (1.12)$$

$$\hat{p}_y = -\frac{1}{c} \hat{m}_x, \quad (1.13)$$

$$\hat{p}_y = \frac{1}{c} \hat{m}_x. \quad (1.14)$$

Подставляя уравнение (1.11) в (1.12) и (1.13) в (1.14), получаем конечные условия

$$\hat{p}_x = \frac{1}{c} \hat{m}_y = -j \frac{SE_0}{\omega\eta_0}, \quad (1.15)$$

$$\hat{p}_y = \frac{1}{c} \hat{m}_x = 0. \quad (1.16)$$

Из этих условий следует, что x -составляющая электрического момента элементарной ячейки метаповерхности должна быть равна y -составляющей магнитного момента, а остальные компоненты должны быть равны нулю. Полученные условия (1.15) и (1.16) показывают необходимую ориентацию и значения составляющих электрического и магнитного дипольных моментов отдельных планарных спиралей. Данное условие может быть выполнено при использовании в каждой ячейке двух ортогональных

левозакрученных планарных спиралей и двух ортогональных правозакрученных планарных спиралей со сбалансированными моментами.

2 Оптимизация параметров метаповерхности на основе одновитковых планарных спиралей с функцией не отражающего поглотителя в СВЧ диапазоне

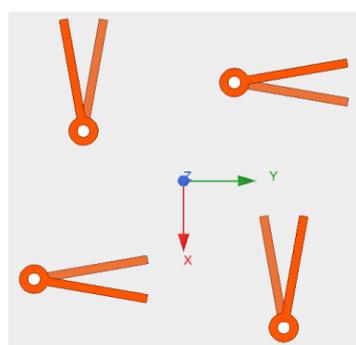
Путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов проведена оптимизация параметров метаповерхности на основе одновитковых планарных спиралей с функцией не отражающего поглотителя для получения максимальной эффективности на резонансной частоте в СВЧ диапазоне.

Численный расчет структурных параметров одновитковой планарной спирали и всего не отражающего поглотителя проведен с учетом технических возможностей технологий изготовления печатных плат. В качестве диэлектрика рассмотрены два материала с относительно невысокой стоимостью и соответствующими нашим расчетам относительной диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь: Arlon AD255C и Taconic TLY.

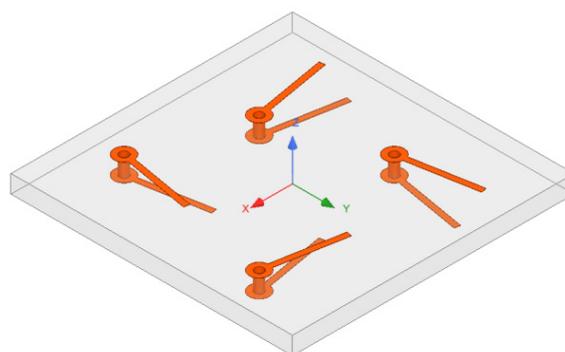
На рисунке 2.1 показан вариант расположения планарных одновитковых спиралей в элементарной ячейке не отражающего поглотителя в соответствии с приведенными теоретическими расчетами.

Изменяя параметры элементарной ячейки, добились равенства как действительных, так и мнимых частей компонент электрического и магнитного дипольного моментов на резонансной частоте, то есть сбалансированности моментов исследуемой ячейки.

Таким образом, в процессе оптимизации получены численные параметры метаматериала, состоящего из одновитковых планарных спиралей на подложках Arlon AD255C и Taconic TLY, обладающего функцией не отражающего поглотителя на резонансной частоте 4 ГГц.



а) вид сверху



б) вид в 3D

Рисунок 2.1 – Вариант расположения планарных одновитковых спиралей в элементарной ячейке не отражающего поглотителя

Численные значения оптимизированных параметров приведены в таблице 2.1. Здесь β – угол между металлическими полосками на двух сторонах печатной платы, a – длина полоски, измеряемая от центра отверстия в плате, r – радиус отверстия с металлизированными стенками, w – ширина металлической полоски, l – расстояние между планарными спиралями в ячейке.

Таблица 2.1 – Значения параметров не отражающего поглотителя в СВЧ диапазоне на различных подложках

Параметр	β , град	a , мм	r , мм	w , мм	l , мм
Расположение планарных одновитковых спиралей на Arlon AD255C	20	13,8	0,75	1	12
Расположение планарных одновитковых спиралей на Taconic TLY	18,3	14,55	0,75	1	12,2

На рисунке 2.2 приведены графики частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения (R_{co}) и прохождения (T_{co}), коэффициентов кросс-поляризованного отражения (R_{cr}) и прохождения (T_{cr}), поглощения (A) для рассматриваемых метаматериалов.

Анализ графиков на рисунке 2.2 показывает, что для диэлектрика Arlon AD255C коэффициент поглощения (A) принимает значения, близкие к 0,7 на резонансной частоте, равной 4 ГГц, а для Taconic TLY – близкие к 0,63, при этом в первом случае коэффициенты со-поляризованного (R_{co}) и кросс-поляризованного отражения (R_{cr}) не превышают 6%, во втором случае коэффициент со-поляризованного отражения (R_{co}) равен нулю, а кросс-поляризованного отражения (R_{cr}) – 13%. Таким образом, суммарный коэффициент отражения для двух поляризаций отражённой волны для обоих материалов не превышает 13%.

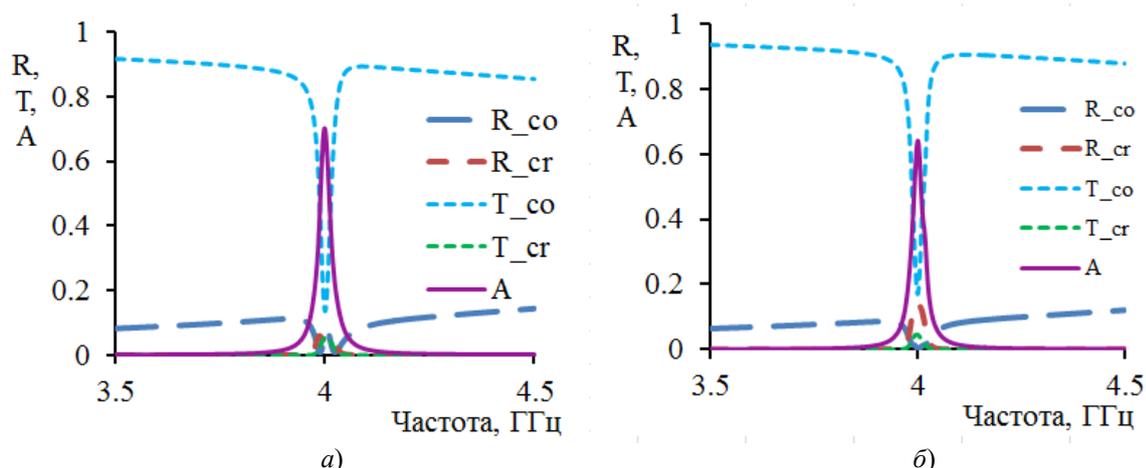


Рисунок 2.2 – Графики частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения (R_{co}) и прохождения (T_{co}), коэффициентов кросс-поляризованного отражения (R_{cr}) и прохождения (T_{cr}), коэффициента поглощения (A) не отражающего поглотителя в случае медных полосок на подложке Arlon AD255C (а) и Taconic TLY (б)

Полные значения коэффициентов отражения (R), прохождения (T) и поглощения (A) выражены следующим образом:

$$R = R_{co} + R_{cr}, T = T_{co} + T_{cr},$$

$$A = 1 - R_{co} - R_{cr} - T_{co} - T_{cr}.$$

В результате проведенной оптимизации было установлено, что для получения максимальной эффективности поглощения необходимо располагать спирали на метаповерхности под прямым углом относительно друг друга, а также иметь четко обозначенные одинаковые координаты расположения спиралей относительно центра элементарной ячейки размером 50 мм. Добиться более высоких показателей поглощения не позволяют конструктивные особенности. В

частности, одновитковая планарная спираль имеет не параллельные электрический и магнитный дипольные моменты, из-за чего коэффициенты со-поляризованного и кросс-поляризованного отражения и аналогичные коэффициенты прохождения имеют различные значения.

3 Экспериментальное исследование

Для проведения экспериментальных исследований с использованием технологии РСВ на подложке Arlon AD255C изготовлен экспериментальный образец метаповерхности на основе одновитковых планарных спиралей с функцией не отражающего поглотителя (рисунок 3.1).

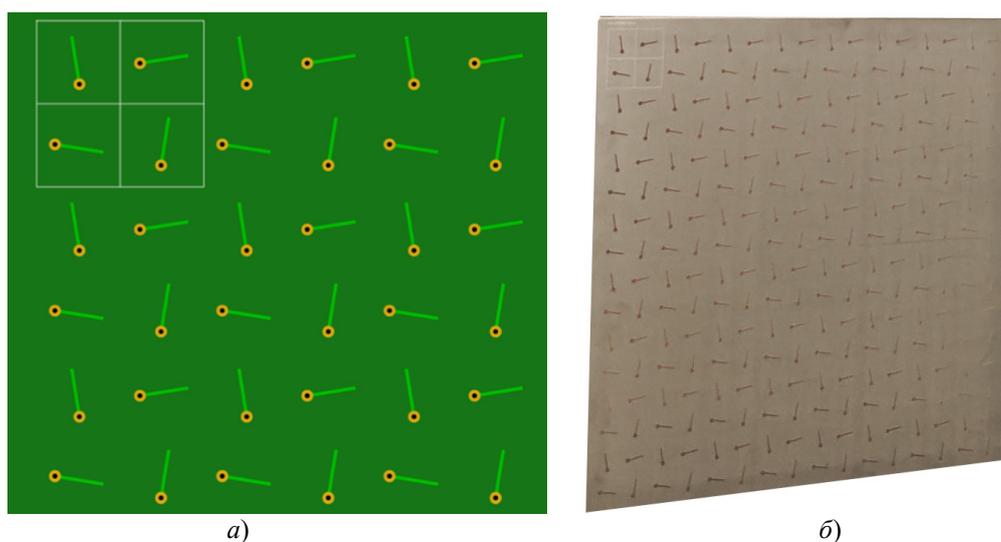


Рисунок 3.1 – Чертеж платы в формате РСВ (а) и фото экспериментального образца (б) метаповерхности на основе одновитковых планарных спиралей с функцией не отражающего поглотителя на подложке Arlon AD255C

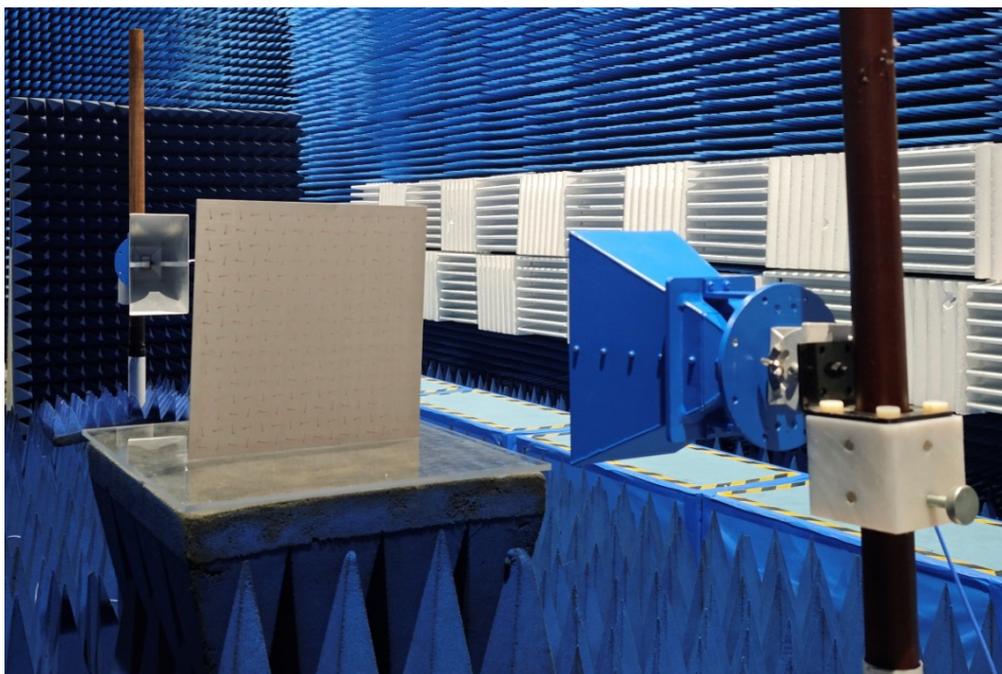


Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка для исследования спроектированной и созданной метаповерхности на отражение и прохождение

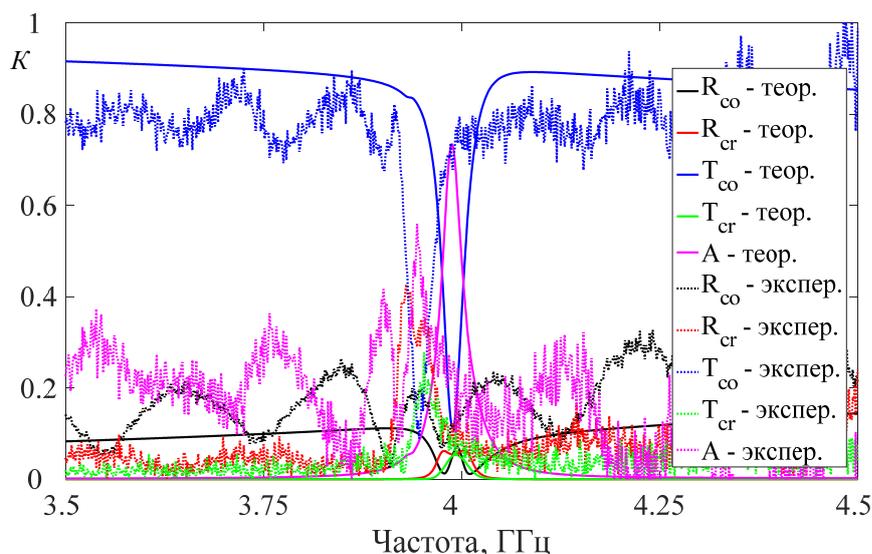


Рисунок 3.3 – Результаты экспериментальных исследований и их сравнение с результатами численного моделирования не отражающего поглотителя на подложке Arlon AD255C

С изготовленным образцом проведены экспериментальные исследования в безэховой камере научной лаборатории электромагнитных метаматериалов Нанкинского университета науки и технологии (Нанкин, КНР) (рисунок 3.2).

Результаты экспериментальных исследований и их сравнение с результатами численного моделирования не отражающего поглотителя на подложке Arlon AD255C приведены на рисунке 3.3.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента показывает высокую степень

соответствия полученных результатов. При этом экспериментально полученные значения резонансной частоты и максимума поглощения меньше теоретически рассчитанных значений, что обусловлено не точным соответствием значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь реального диэлектрика Arlon AD255C его усреднённым параметрам, заданным при моделировании, а также погрешностью при изготовлении экспериментального образца.

Заключение

Проведена оптимизация с использованием метода конечных элементов, одновитковых планарных спиралей и их расположения в ячейке метаповерхности для получения максимального поглощения при отсутствии отражения СВЧ волн. В отличие от ранее рассмотренной двухвитковой планарной спирали, предлагаемая в данной статье одновитковая спираль содержит меньшее число элементов (полосок и отверстий на печатной плате), что приводит к упрощению и удешевлению изготовления метаповерхности в рамках технологий печатных плат. Расчет структурных параметров поглощающей метаповерхности проведен с учетом технических возможностей технологий изготовления печатных плат. В качестве диэлектрической подложки платы в СВЧ диапазоне рассмотрены два материала – Arlon AD255C и Taconic TLY.

По результатам моделирования изготовлены экспериментальные образцы метаповерхностей на основе одновитковых планарных спиралей и проведены экспериментальные исследования. Результаты исследования подтверждают эффективность использования предложенной метаповерхности в качестве не отражающего поглотителя на резонансной частоте, равной 4 ГГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Generalized constitutive relations for meta materials based on the quasi-static Lorentz theory* / A. Ishimaru [et al.] // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2003. – Vol. 51 – P. 2550–2557.
2. *Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer* / V.S. Asadchy [et al.] // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. – 2014. – Vol. 12, № 4. – P. 298–304.
3. *Planar broadband Huygens' metasurfaces for wave manipulations* / F.S. Cuesta [et. al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66 (12). – P. 7117–7127.
4. *Проектирование, изготовление и экспериментальное исследование метаматериалов на основе планарных спиралей для фильтрации поляризованного излучения в СВЧ диапазоне* / А.Ю. Кравченко [и др.] // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2021. – № 6 (129). – С. 140–146.
5. *Метаматериал на основе планарных спиралей как преобразователь поляризации электромагнитных волн* / И.В. Семченко [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2022. – Т. 58, № 1. – С. 110–119.
6. *Проектирование метаматериалов на основе планарных спиралей в СВЧ диапазоне* / И.В. Семченко, А.Ю. Кравченко, А.Л. Самофалов, И.А. Фаняев // Известия Гомельского

государственного университета имени Ф. Скорины. – 2020. – № 3 (120). – С. 154–160.

7. *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.

8. *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.

9. *Semchenko, I.V. Polarization Plane Rotation of Electromagnetic Waves by the Artificial Periodic Structure with One-Turn Helical Elements* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // Electromagnetics. – 2006. – Vol. 26, № 3-4. – P. 219–233.

10. *Optimal Shape of Spiral: Equality of Dielectric, Magnetic and Chiral Properties* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov, S.A. Tretyakov // Proceedings of META'08, NATO Advanced Research Workshop, Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies 7–10 May, 2008, Marrakesh. – Morocco, 2008. – P. 71–80

11. *Semchenko, I.V. Helices of optimal shape for nonreflecting covering* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A. L. Samofalov // The European Physical Journal. Applied Physics. – 2010. – Vol. 49, № 3. – P. 33002-p1 – 33002-p5.

12. *Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур* / Цянь Сонгсонг, В.А. Банный, А.Л. Самофалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 4 (21). – С. 40–45.

13. *Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterial-substrate system with compensated chirality* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, V.S. Asadchy, S.V. Golod, E.V. Naumova, V.Ya. Prinz, A.M. Goncharenko, G.V. Sinitsyn, A.V. Lyakhnovich, V.L. Malevich // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121. – P. 015108-1 – 015108-8.

14. *Семченко, И.В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах: монография* / И.В. Семченко, С.А. Хахомов. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 279 с.

Работа выполнена в рамках проектов БРФФИ Ф22КИТГ-021 и Ф23КИ-027.

Поступила в редакцию 22.05.2024.

Информация об авторах

Фаняев Иван Александрович – к.т.н., доцент
Самофалов Андрей Леонидович – к.ф.-м.н., доцент
Семченко Игорь Валентинович – д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси
Хахомов Сергей Анатольевич – д.ф.-м.н., доцент
Кравченко Александр Юрьевич – инженер
Мэнмэн Ли – доктор инженерии, профессор