

2. Light control with Weyl semimetals / C. Guo [et al.] // eLight. – 2023. – Vol. 3, № 1. – P. 2.
3. Tunable magnetless optical isolation with twisted Weyl semimetals / V. A. Chistyakov [et al.] // Nanophotonics. – 2023. – Vol. 12, № 16. – P. 3333–3340.
4. Novitsky, A. V. Matrix approach for light scattering by bianisotropic cylindrical particles / A. V. Novitsky // J. Phys.: Condens. Matter. – 2007. – Т. 19, № 8. – С. 086213.
5. Novitsky, A. V. Operator matrices for describing guiding propagation in circular bianisotropic fibres / A. V. Novitsky, L. M. Barkovsky // J. Phys. A: Math. Gen. – 2005. – Т. 38, № 2. – С. 391–404.

**С. А. Хахомов¹, А. Л. Самофалов¹, И. А. Фаняев¹, И. В. Семченко²,
А. В. Ляхнович³, А. А. Ковалёв¹, П. В. Сомов¹, А. Ю. Кравченко⁴,
Хуэй Чу⁵, Мэнмэн Ли⁵, Даши Динг⁵**

¹ Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь,

² Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
г. Минск, Республика Беларусь,

³ Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

⁴ Белорусский научно-исследовательский и проектный институт нефти,
г. Гомель, Республика Беларусь,

⁵ Нанкинский университет науки и технологии,
г. Нанкин, Китайская Народная Республика

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ И МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ БИАНИЗОТРОПНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СВЧ И ТГц ВОЛН

Введение. Электродинамика метаматериалов как относительно молодая область науки открыла огромные возможности по манипулированию электромагнитными волнами в значительном частотном спектре, начиная от высоких частот и заканчивая видимым излучением. Использование метаматериалов дает возможности для реализации различных функциональных способностей: маскировка объектов, визуализация, идеальное поглощение, отрицательное преломление [1–2], генерация вихревых пучков [3], аномальное преломление и отражение [4], уменьшение эффективной площади рассеяния [5], фокусировка [6] и многое другое.

Многие исследователи с помощью сверхтонких конструкций стремятся реализовать эффективное управление распространением электромагнитных волн. Портативные устройства с высокоинтегрированными функциями становятся одним из наиболее предпочтительных направлений современной техники.

1. Моделирование и эксперимент. В данной работе в качестве примера многофункционального устройства предлагается каскадный метаматериал для манипуляции электромагнитными волнами СВЧ диапазона. Для этого использован комплект двух тонких метаповерхностей на основе планарных спиралей для манипуляции электромагнитными волнами, в которых одновременно обеспечивается различное, независимое преобразование волн на различных частотах.

В качестве киральных включений метаповерхностей рассматриваются планарные металлические спирали с осями, ориентированными в плоскости метаповерхности.

Планарные спирали представляют собой металлические полоски по обе стороны печатной платы, соединённые путём металлизации отверстий в диэлектрической подложке.

Рассчитаны и спроектированы параметры планарных спиралей и их расположение в ячейке, обеспечивающие входное сопротивление метаповерхности, равное импедансу свободного пространства, в достаточно широком диапазоне частот, включающем в себя рабочие частоты всех метаповерхностей. Это свойство обеспечивает независимое и взаимно не препятствующее функционирование всех метаповерхностей в каскаде. Подобная конструкция достаточно легко реализуется с помощью технологий изготовления печатных плат.

Предварительно спроектированы, изготовлены и экспериментально исследованы отдельные функциональные метаповерхности: отражающий кросс-поляризатор [7], пропускающий кросс-поляризатор [8], не отражающий поглотитель [9].

Для демонстрации независимости работы уже оптимизированных нами двух разных по функционалу метаповерхностей – это отражающий кросс-поляризатор, поворачивающий плоскость поляризации отраженной волны на резонансной частоте на угол, близкий к 90° , и пропускающий кросс-поляризатор, проведено компьютерное моделирование работы обоих устройств, при их близком друг от друга расположении. На рисунке 1 показано взаимное расположение двух метаповерхностей с двумя различными функциями. Расстояние между метаповерхностями составляет 10 мм.

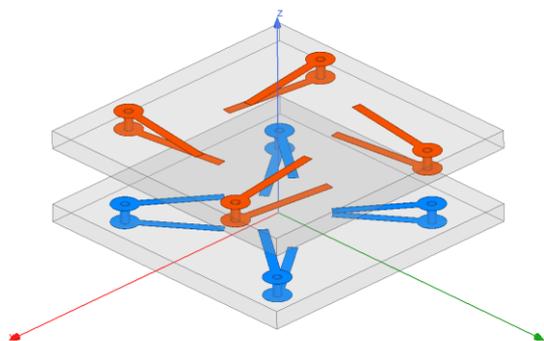


Рисунок 1 – Модель двух близко расположенных метаповерхностей как преобразователя волн на различных частотах с двумя различными функциями

На рисунке 2 приведены графики частотной зависимости коэффициентов отражения (R), прохождения (T) и поглощения (A) для каскада из двух метаповерхностей с двумя различными функциями.

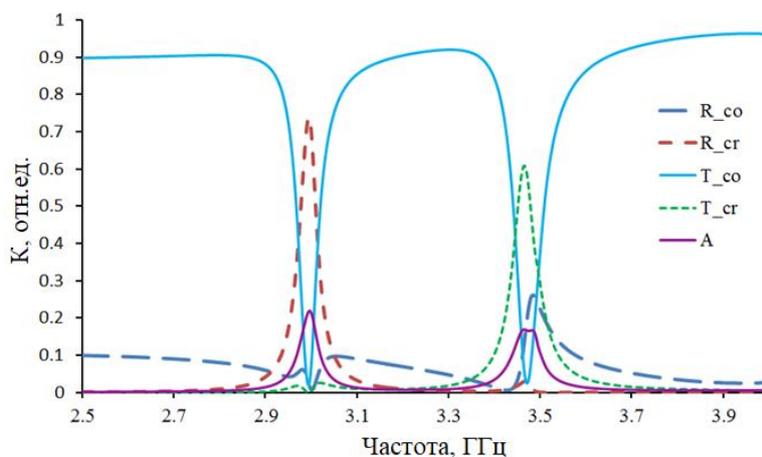


Рисунок 2 – Графики частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения (R_{co}) и прохождения (T_{co}), коэффициентов кросс-поляризованного отражения (R_{cr}) и прохождения (T_{cr}) и коэффициента поглощения на подложке Arlon AD255C

Из графиков видно, что обе метаповерхности с разными, заложенными нами функциями, работают на разных частотах и не оказывают существенного взаимного влияния на работу друг друга.

Коэффициент кросс-прохождения (T_{cr}) на частоте, близкой к 3,5 ГГц, получился чуть ниже вследствие того, что данный слой находился вторым по отношению к падающей волне. Часть волны незначительно поглотилась первым слоем.

Для проведения экспериментальных исследований с использованием технологии РСВ изготовлены экспериментальные образцы в соответствии с рассчитанными параметрами: кросс-поляризационного отражателя и метаповерхности для осуществления кросс-поляризационного прохождения падающих волн, которые объединены в каскад. С данным каскадом в научной лаборатории электромагнитных метаматериалов Нанкинского университета науки и технологии (Нанкин, Китай) проведены экспериментальные исследования (рисунок 3).

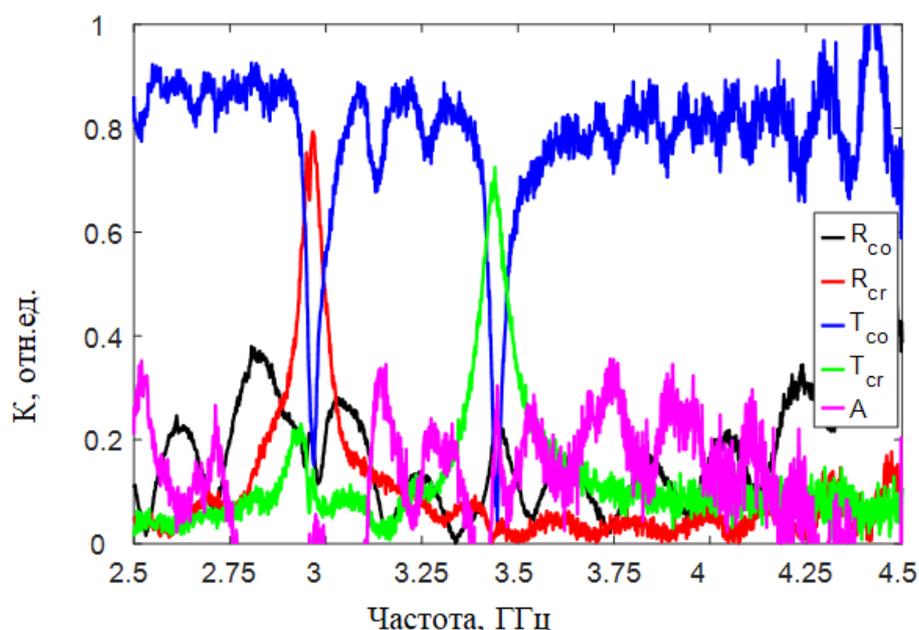


Рисунок 3 – Результаты экспериментальных исследований каскада из двух метаповерхностей с двумя различными функциями

Анализ результатов исследования каскада метаповерхностей на основе одновитковых планарных спиралей доказывает возможность использования каскада таких метаповерхностей с волновым импедансом свободного пространства для одновременного выполнения нескольких функциональных задач. Продемонстрировано независимое и взаимно совместимое преобразование волн на различных частотах.

Моделирование показывает, что с помощью аналогичного каскада метаповерхностей может быть осуществлена манипуляция ТГц волнами. Для этого параметры планарных спиралей должны быть заранее оптимизированы в совокупности с подложкой для достижения резонанса в ТГц диапазоне.

Необходимо отметить, что электромагнитные свойства метаматериалов и метаповерхностей, состоящих из объемных гладких спиральных элементов, интенсивно исследовались на протяжении последних десятилетий [10–14].

Заключение. Представленный каскадный метаматериал обладает узкой частотной избирательностью, широкой радиопрозрачностью вне резонансной частоты и конструктивной простотой при его реализации.

Подобные структуры могут найти широкое применение при развязке антенн и антенных решеток, в устройствах по частотно-селективному манипулированию СВЧ волнами и многих других приложениях.

Работа выполнена в рамках реализации проектов БРФФИ Ф22КИТГ-021, Ф23КИ-027, Ф24КИТГ-005.

Литература

1. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D. R. Smith [et al.] // *Physical review letters*. – 2000. – Т. 84, №. 18. – P. 4184.
2. Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах / И. В. Семченко, С. А. Хахомов. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 279 с.
3. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction / N. Yu [et al.] // *Science*. – 2011. – Т. 334, №. 6054. – P. 333–337.
4. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas / X. Ni [et al.] // *Science*. – 2012. – Т. 335, №. 6067. – P. 427–427.
5. Wideband radar cross section reduction using two-dimensional phase gradient metasurfaces / Y. Li [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Т. 104, №. 22. – P. 221110.
6. Flat metasurfaces to focus electromagnetic waves in reflection geometry / X. Li [et al.] // *Optics letters*. – 2012. – Т. 37, №. 23. – P. 4940–4942.
7. Расчет параметров метаматериала для получения кросс-поляризационного полного отражения при отсутствии прохождения и поглощения электромагнитных волн / С. А. Хахомов [и др.] // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. – 2023. – № 3 (138). – С. 106–110.
8. Метаповерхность с функцией пропускающего кросс-поляризатора на основе одновитковых планарных спиралей / И. А. Фаняев [и др.] // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. – 2023. – № 6 (141). – С. 117–122.
9. Метаповерхность на основе одновитковых планарных спиралей со свойством не отражающего поглотителя в СВЧ диапазоне / И. А. Фаняев [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2024. – № 3 (60). – С. 38–43.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.