

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 537.86,621.396

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-1-110-119>

Поступила в редакцию 16.11.2021

Received 16.11.2021

**И. В. Семченко, А. Ю. Кравченко, А. Л. Самофалов, С. А. Хахомов**

*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Республика Беларусь*

## **МЕТАМАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНЫХ СПИРАЛЕЙ КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН**

**Аннотация.** Проведено проектирование и моделирование метаповерхности, позволяющей преобразовать падающую линейно поляризованную электромагнитную волну в прошедшую волну с эллиптической поляризацией, близкой к циркулярной. При этом коэффициент отражения волны близок к нулю на резонансной частоте, поскольку метаповерхность аналогична свободному пространству по своему волновому сопротивлению. Резонансными элементами метаповерхности (метаатомами) являются двухвитковые планарные спирали, обладающие сбалансированными диэлектрическими и магнитными свойствами. Такие спирали проявляют кардинально различные свойства по отношению к волнам с правой и левой циркулярной поляризацией. Метаповерхность как преобразователь поляризации обладает сильными хиральными свойствами, поскольку содержит планарные спирали только одного направления закручивания, и может быть изготовлена в рамках технологий печатных плат.

**Ключевые слова:** метаматериал, метаповерхность, циркулярная поляризация электромагнитной волны, планарная спираль, печатные платы

**Для цитирования.** Метаматериал на основе планарных спиралей как преобразователь поляризации электромагнитных волн / И. В. Семченко [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2022. – Т. 58, № 1. – С. 110–119. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-1-110-119>

**Igor V. Semchenko, Aleksandr Y. Kravchenko, Andrey L. Samofalov, Sergei A. Khakhomov**

*Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus*

## **A METAMATERIAL BASED ON PLANAR SPIRALS AS A ELECTROMAGNETIC WAVES POLARIZATION CONVERTER**

**Abstract.** The design and modeling of a metasurface is carried out, which makes it possible to transform an incident linearly polarized electromagnetic wave into a transmitted wave with elliptical polarization close to circular. At the same time, the reflection coefficient of the wave is close to zero at the resonant frequency, since the metasurface is similar to the free space in its wave resistance. The resonant elements of the meta-surface (meta-atoms) are two-turn planar spirals with balanced dielectric and magnetic properties. Such spirals exhibit radically different properties with respect to waves with right and left circular polarization. The metasurface as a polarization converter has strong chiral properties, since it contains planar spirals of only one direction of twisting, and can be manufactured within the framework of printed circuit board technologies.

**Keywords:** metamaterial, metasurface, circular polarization of electromagnetic wave, planar spiral, printed circuit boards

**For citation.** Semchenko I. V., Kravchenko A. Y., Samofalov A. L., Khakhomov S. A. A metamaterial based on planar spirals as a electromagnetic waves polarization converter. *Vesti Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizyka-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2022, vol. 58, no 1, pp. 110–119 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-1-110-119>

**Введение.** Метаматериалы и метаповерхности, в силу их заранее спроектированных уникальных электромагнитных свойств, в течение последних 15 лет являются объектом активных исследований. Эти искусственные структуры могут служить основой многофункциональных устройств для управления электромагнитными волнами микроволнового, терагерцового и оптического диапазонов, в частности, для преобразования поляризации волн [1–5].

Если рассматривать метаматериалы в более давней ретроспективе, то здесь получили логическое продолжение исследования белорусских ученых Ф. И. Федорова, Б. В. Бокутя, А. Н. Сердюкова [6, 7] и их учеников. Эти исследования создали основу белорусской научной школы кристаллооптики и были посвящены сначала естественным гиротропным кристаллам, а затем искусственным бианизотропным структурам, проявляющим одинаково значимые диэлектрические и магнитные свойства.

В частности, в [8] опубликованы результаты исследования поглощающей, но при этом слабо отражающей метаповерхности, созданной с помощью технологий печатных плат и проявляющей резонансные свойства на частоте около 2,5 ГГц. Показано, что спроектированная и изготовленная метаповерхность имеет одновременно одинаково значимые диэлектрические и магнитные свойства в поле падающей СВЧ-волны. Следовательно, изготовленная искусственная структура может быть охарактеризована как бианизотропная и имеющая волновое сопротивление, близкое к импедансу свободного пространства. В результате полученная метаповерхность имеет низкий коэффициент отражения и позволяет поглощать до 88 % энергии падающей электромагнитной волны вблизи резонансной частоты.

Разработанная метаповерхность фактически представляет собой двустороннюю печатную плату, элементами которой являются двухвитковые планарные спирали, форма которых, как и структуры на их основе, были предложены в [2]. Каждая такая спираль состоит из четырех металлических полосок, расположенных на двух сторонах печатной платы (по две полоски на каждой стороне), и трех соединительных металлизированных отверстий. Длина спирали в выпрямленном состоянии приблизительно равна половине длины волны электромагнитного поля, что обеспечивает резонансное возбуждение электрического тока в спирали. В то же время размеры спирали в свернутом состоянии, которое имеет место в печатной плате, значительно уступают длине волны, что дает возможность рассматривать каждую спираль как малую бианизотропную частицу, поляризуемую как электрическим, так и магнитным полем. Метод вычисления поляризуемостей таких частиц был предложен в статье [9]. Важная задача заключается в определении оптимальной формы планарной спирали, при которой создаваемый метаматериал имеет равные значения относительной диэлектрической и магнитной проницаемости. Несмотря на малую толщину печатной платы, каждая спираль является трехмерным объектом, что позволяет магнитному полю падающей волны пронизывать витки спирали и возбуждать в ней ток. Одновременно электрическое поле падающей волны создает ток в металлических полосках на двух сторонах платы, следовательно, во всей спирали. Хотя печатная плата фактически состоит из трех слоев – двух проводящих поверхностей и подложки, ее полная толщина является очень малой по сравнению с длиной волны. Кроме того, имеется только один слой планарных спиралей, что позволяет рассматривать искусственную структуру как метаповерхность. Поэтому в данной работе мы в равной мере используем термин «метаматериал», чтобы отметить его слоистую структуру, и термин «метаповерхность», чтобы указать на ее относительно малую толщину.

В настоящей статье показано, что на основе двухвитковых планарных спиралей может быть создана метаповерхность, позволяющая преобразовать падающую линейно поляризованную СВЧ-волну в прошедшую волну с эллиптической поляризацией, близкой к циркулярной. Предложенный ранее поглотитель СВЧ-волн состоит из одинакового числа право- и левосторонних спиралей, т. е. хиральные свойства в нем компенсированы. В отличие от поглотителя волн, преобразователь поляризации должен содержать планарные спирали только одного направления закручивания, т. е. обладать хиральными свойствами [10]. По сравнению с работой [10] в данной статье достигнуто более высокое значение коэффициента эллиптичности прошедшей волны, близкое к значению для циркулярно поляризованной волны.

**Теоретический расчет и моделирование.** Каждая планарная спираль является бианизотропной частицей и обладает одновременно диэлектрическими, магнитными и хиральными свойствами. Следовательно, ее поведение в электромагнитном поле можно описать с помощью уравнений связи [11, 12]:

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \alpha_{ee} \vec{E} - j \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \alpha_{em} \vec{H}, \quad \vec{m} = \alpha_{mm} \vec{H} + j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \alpha_{me} \vec{E}, \quad (1)$$

где  $\vec{p}$  и  $\vec{m}$  – электрический дипольный момент и магнитный дипольный момент планарной спирали;  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  – векторы напряженности электрического и магнитного поля волны;  $\alpha_{ee}$  и  $\alpha_{mm}$  – тензоры диэлектрической и магнитной восприимчивости;  $\alpha_{em}$  и  $\alpha_{me}$  – псевдотензоры второго ранга, характеризующие хиральные свойства спирали;  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная по-

стоянные соответственно;  $j$  – мнимая единица (здесь мы используем запись полей в форме  $\exp(j\omega t)$ , как принято в радиофизике). Термин «псевдотензор» означает, что его компоненты ведут себя по-другому при инверсии осей системы координат по сравнению с компонентами тензора. Из принципа симметрии кинетических коэффициентов следует, что выполняется следующее соотношение:

$$\alpha_{em} = \alpha_{me}^T, \quad (2)$$

где  $T$  означает транспонирование тензора. Псевдотензор  $\alpha_{em}$  имеет только действительные компоненты для непоглощающей спирали. Кроме того, компоненты псевдотензора  $\alpha_{em}$  имеют размерность  $\text{м}^{-3}$ , в итоге параметр хиральности, характеризующий метаматериал в целом, является безразмерным.

Можно получить условие излучения спиралью циркулярно поляризованной волны, распространяющейся ортогонально оси спирали:

$$|p_y| = \frac{1}{c} |m_y|, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме, ось  $y$  направлена вдоль оси спирали. Это условие показывает, что спираль имеет оптимальные параметры, ее также можно назвать сбалансированной, поскольку в ней возникают одинаково значимые дипольные моменты: электрический и магнитный.

Использование соотношения (3) приводит к результату [13–16]

$$\alpha_{ee}^{(22)} = \alpha_{mm}^{(22)}, \quad \alpha_{ee}^{(22)} = \pm \alpha_{em}^{(22)}, \quad (4)$$

где  $\alpha^{(ik)}$  – компоненты рассматриваемых тензоров и псевдотензоров,  $i, k = 1, 2$ , знак «+» соответствует спирали с правосторонним закручиванием, знак «–» – левосторонней спирали.

Соотношения (4) показывают, что спирали с найденными оптимальными параметрами проявляют в равной мере диэлектрические, магнитные и хиральные свойства. Другими словами, спирали с оптимальными параметрами характеризуются тремя равными восприимчивостями для полей, направленных вдоль оси спирали: диэлектрической, магнитной и хиральной. Если первые две восприимчивости считаются общепринятыми характеристиками частиц, то хиральная восприимчивость вводится только для 3D-объектов, которые отличаются от своего зеркального изображения, например, для спиралей, размеры которых малы по сравнению с длиной волны электромагнитного поля. Такие трехмерные объекты называются хиральными, или киральными (этот термин произошел от греческого слова «рука»). Можно сказать, что хиральная восприимчивость характеризует зеркальную несимметричность трехмерной частицы. Хиральная восприимчивость показывает, насколько большой электрический дипольный момент может создаваться в спирали под действием магнитного поля (см. первое уравнение в (1)). В то же время, согласно второму уравнению в (1), хиральная восприимчивость демонстрирует, насколько большой магнитный дипольный момент может создаваться в этой же спирали под действием электрического поля.

Соотношение (3) между абсолютными значениями электрического дипольного момента и магнитного дипольного момента обеспечивает излучение спиралью циркулярно поляризованной волны строго определенного знака. Для излучаемой волны вектор напряженности электрического поля образует в пространстве винтовую линию с направлением закручивания, противоположным относительно самой излучающей спирали. Такая поляризационная селективность спирали имеет место не только в отношении излучаемых волн, но и в случае воздействия падающих циркулярно поляризованных волн. Спираль сильно взаимодействует с циркулярно поляризованной волной, вектор поля которой закручен в пространстве противоположно самой спирали. И напротив, спираль является прозрачной для циркулярно поляризованной волны, вектор поля которой закручен в пространстве в одинаковом направлении с самой спиралью. Здесь прозрачность спирали понимается как отсутствие ее взаимодействия с волной, т. е. как невозможность

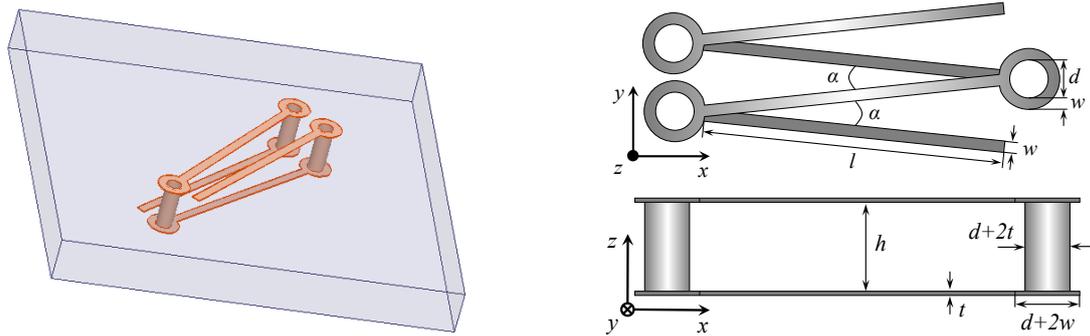


Рис. 1. Модель двухвитковой планарной спирали:  $l$  – длина полоски планарной спирали на одной стороне печатной платы;  $h$  – толщина печатной платы;  $d + 2w$  – диаметр проводящего круга на поверхности подложки;  $d$  – диаметр сквозного отверстия в печатной плате;  $w$  – ширина металлической полоски;  $t$  – толщина медной фольги;  $\alpha$  – угол между проводящими полосками

Fig. 1. A model of a two-turn planar spiral:  $l$  is the length of the planar spiral strip on one side of the printed circuit board;  $h$  is the thickness of the printed circuit board;  $d + 2w$  is the diameter of the conductive circle on the substrate surface;  $d$  is the diameter of the through hole in the printed circuit board;  $w$  is the width of the metal strip,  $t$  is the thickness of the copper foil;  $\alpha$  is the angle between the conductive strips

индуцирования токов. Известно, что электрические токи могут создаваться в спирали под действием как электрического поля, так и магнитного поля волны. Если волна циркулярно поляризована, а спираль имеет оптимальную форму, при которой выполняются соотношения (3) и (4), то электрические токи, возбуждаемые электрическим и магнитным полями волны, либо взаимно усиливаются (при сильном взаимодействии спирали и волны), либо взаимно погашаются (при прозрачности спирали) в зависимости от знака поляризации волны.

Указанное свойство поляризационной селективности спирали по отношению к циркулярно поляризованным волнам различного знака может быть использовано при создании преобразователя поляризации электромагнитной волны от линейного вида к циркулярному. С этой целью необходимо создать метаматериал на основе сбалансированных планарных спиралей, удовлетворяющих условиям (2), (3) и имеющих только одно направление закручивания. При этом материал спиралей должен иметь достаточно высокое удельное электрическое сопротивление, чтобы было обеспечено поглощение циркулярно поляризованной волны одного знака. Одновременно требуется, чтобы подложка метаматериала имела слабые диэлектрические и поглощательные свойства, чтобы не нарушить баланс диэлектрических и магнитных свойств метаматериала в целом.

Свойства хиральной среды могут быть описаны следующими материальными уравнениями [6, 7, 11, 17–19]:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} - j\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \kappa \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + j\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \kappa \vec{E}, \quad (5)$$

где  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость,  $\kappa$  – параметр хиральности среды. Эти соотношения также справедливы для метаматериала, образованного планарными спиралями. В идеале для метаматериала необходимо достичь выполнения соотношения

$$\epsilon_r = \mu_r = 1 + \kappa, \quad (6)$$

которое означает баланс диэлектрических, магнитных и хиральных свойств метаматериала.

Исследуемая ячейка метаматериала состоит из правозакрученных двухвитковых планарных спиралей, представленных на рис. 1 и 2.

В результате оптимизации найдены следующие параметры планарной спирали:  $l = 7,8$  мм,  $w = 0,15$  мм,  $d = 0,24$  мм,  $h = 2,93$  мм,  $t = 35$  мкм,  $\alpha = 13,9^\circ$ .

Параметры спирали подбираются таким образом, чтобы для них выполнялось условие главного частотного резонанса, определяемого по формуле

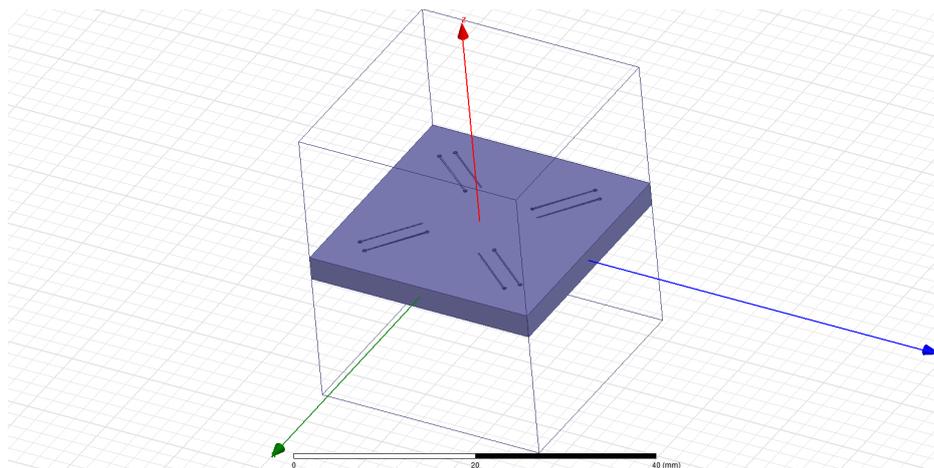


Рис. 2. Элементарная ячейка метаповерхности, состоящая из четырех двухвитковых планарных спиралей с правосторонним закручиванием

Fig. 2. An elementary metasurface cell consisting of four two-turn planar spirals with right-hand twisting

$$4l + 3h \approx \frac{c}{2\nu\sqrt{\varepsilon_s\mu_s}}, \quad (7)$$

где  $\nu$  – частота электромагнитной волны,  $\varepsilon_s$  и  $\mu_s$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости подложки. Резонанс такой структуры наблюдается на частоте около 2,1 ГГц.

Для нахождения угла поворота главной оси эллипса поляризации и эллиптичности прошедшей волны использовались следующие соотношения [2]:

$$\theta = \frac{1}{2} [\arg(T_{RCP}) - \arg(T_{LCP})], \quad (8)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{|T_{RCP}|^2 - |T_{LCP}|^2}{|T_{RCP}|^2 + |T_{LCP}|^2} \right), \quad (9)$$

где  $T_{RCP} = T_{co} + jT_{cr}$  и  $T_{LCP} = T_{co} - jT_{cr}$  – амплитудные коэффициенты прохождения право- и левоциркулярно поляризованных волн соответственно, частотная зависимость этих коэффициентов пояснена в следующем абзаце;  $j$  – мнимая единица;  $T_{co}$  и  $T_{cr}$  – амплитудные коэффициенты прохождения для волн, имеющих параллельную и поперечную поляризацию относительно падающей волны.

Амплитудные коэффициенты прохождения право- и левоциркулярно поляризованных волн  $T_{RCP}$  и  $T_{LCP}$  не имеют простой аналитической частотной зависимости, которую можно было бы выразить в виде формулы. В то же время можно качественно объяснить зависимость этих коэффициентов от частоты электромагнитной волны, исходя из физических соображений. При заранее спроектированном слабом отражении СВЧ-волн от искусственной структуры прохождение электромагнитной волны через метаматериал значительно уменьшается по сравнению с падающей волной вследствие ее поглощения в метаматериале, точнее, в металлических элементах планарных спиралей. Материал используемой подложки имеет низкое значение диэлектрических потерь, т. е. малую величину мнимой части диэлектрической проницаемости, поэтому поглощение СВЧ-волны происходит именно в металлических планарных спиралях.

Рассматриваемый метаматериал состоит из спиралей только одного направления закручивания, в нашем случае – правостороннего, при этом спирали имеют заранее рассчитанные оптимальные параметры. Такие спирали сильно взаимодействуют с циркулярно поляризованной волной только одного знака, которую в радиофизике принято называть правоциркулярно поля-

ризованной (имеющей правую круговую поляризацию). Для наблюдателя, смотрящего вслед такой волне, ее электрический вектор вращается с течением времени по часовой стрелке. При этом для фиксированного момента времени электрический вектор такой волны закручен в пространстве в направлении, противоположном кручению спирали, и эта пространственная картина не зависит от положения наблюдателя. Коэффициент прохождения для такой волны, сильно поглощаемой спиралями, является малым (в идеальном случае – стремящимся к нулю). С другой стороны, для волны с противоположным знаком поляризации – левациркулярно поляризованной, не взаимодействующей со спиралями и слабо поглощаемой диэлектрической подложкой, коэффициент прохождения имеет большое значение (в идеальном случае – стремящееся к единице). Такое различное поведение коэффициентов прохождения для циркулярно поляризованных волн имеет место вблизи резонансной частоты, когда селективное взаимодействие волн со спиралями проявляется наиболее сильно. Это селективное преимущественное поглощение право- или левациркулярно поляризованных волн в метаматериале со спиралями оптимальной формы приводит к эллиптической поляризации прошедшей волны (в идеальном случае – циркулярной) и повороту главной оси ее эллипса поляризации.

Угол  $\theta$  представляет собой угол между главной осью эллипса поляризации прошедшей волны и плоскостью поляризации падающей волны, а эллиптичность  $\psi$  характеризует поляризационное состояние прошедшей волны и изменяется в диапазоне от  $0^\circ$  для линейно поляризованной волны до  $\pm 45^\circ$  для циркулярно поляризованной волны.

При моделировании в качестве подложки рассмотрен двусторонний стеклотекстолит FR4 с толщиной ядра  $h = 2,93$  мм и медной фольгой толщиной  $t = 35$  мкм (относительная диэлектрическая проницаемость равна 4,5 и тангенс угла потерь равен 0,021).

На основе проведенного моделирования можно сделать следующие выводы.

1. На резонансной частоте 2,12 ГГц найденная структура способна пропускать до 49 % падающего излучения (рис. 3). При этом коэффициент отражения равен 5,75 %, а коэффициент поглощения – 45,4 %. Эти величины следуют из анализа полученных частотных зависимостей коэффициентов прохождения, поглощения и отражения волны, приведенных на рис. 3.

2. Эллиптичность прошедшей волны вблизи резонанса принимает значение  $\psi = 37,3^\circ$ , что соответствует эллиптически поляризованной волне, близкой к циркулярно-поляризованной, а угол поворота главной оси ее эллипса поляризации равен  $\theta = -3,8^\circ$  (рис. 4). Если перейти к другому определению коэффициента эллиптичности, используемому в эллипсометрии [20], то для прошедшей волны отношение главных осей эллипса поляризации равно 0,76.

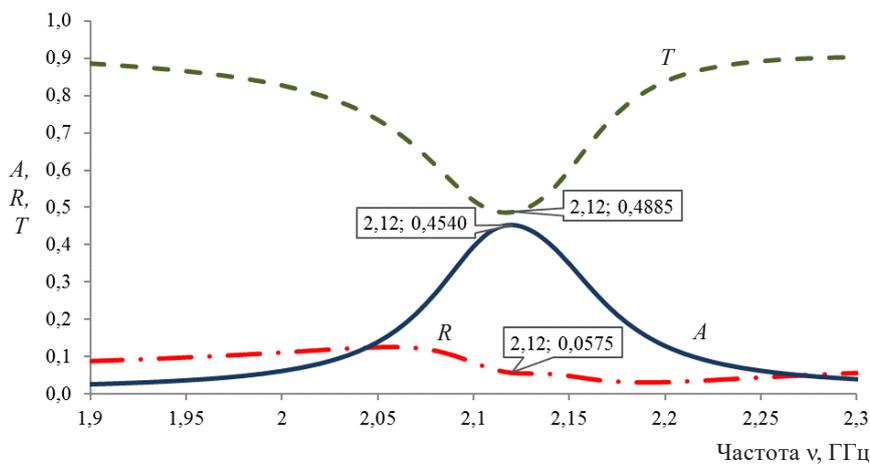


Рис. 3. Зависимость коэффициентов поглощения ( $A$ ), отражения ( $R$ ) и прохождения ( $T$ ) СВЧ-волны от ее частоты, рассчитанных для интенсивности волны

Fig. 3. The dependence of the absorption ( $A$ ), reflection ( $R$ ) and transmission ( $T$ ) coefficients of the microwave wave on its frequency, calculated for the intensity of the wave

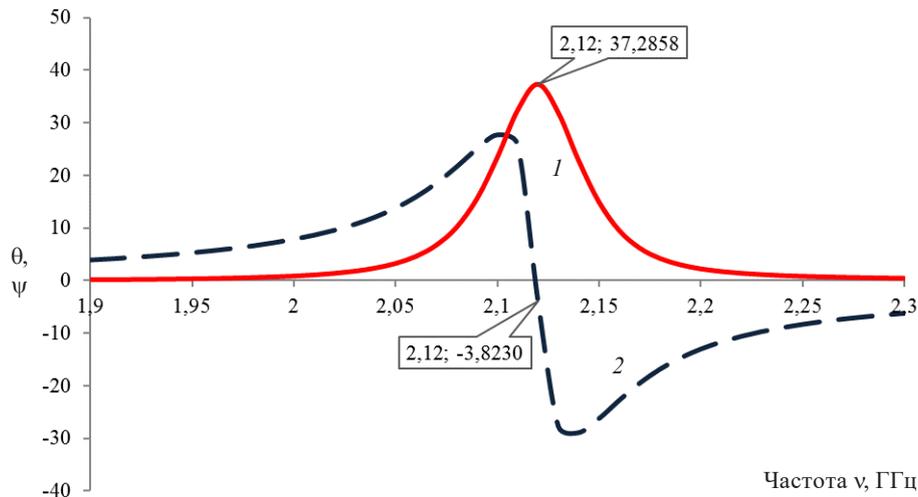


Рис. 4. Зависимости эллиптичности  $\psi$  прошедшей волны (кривая 1) и угла поворота главной оси эллипса поляризации  $\theta$  (кривая 2) от частоты, рассчитанные по формулам (9) и (8) соответственно

Fig. 4. The dependence of the ellipticity of the transmitted wave  $\psi$  (curve 1) and the angle of rotation of the main axis of the polarization ellipse  $\theta$  (curve 2) on the frequency calculated by formulas (9) and (8)

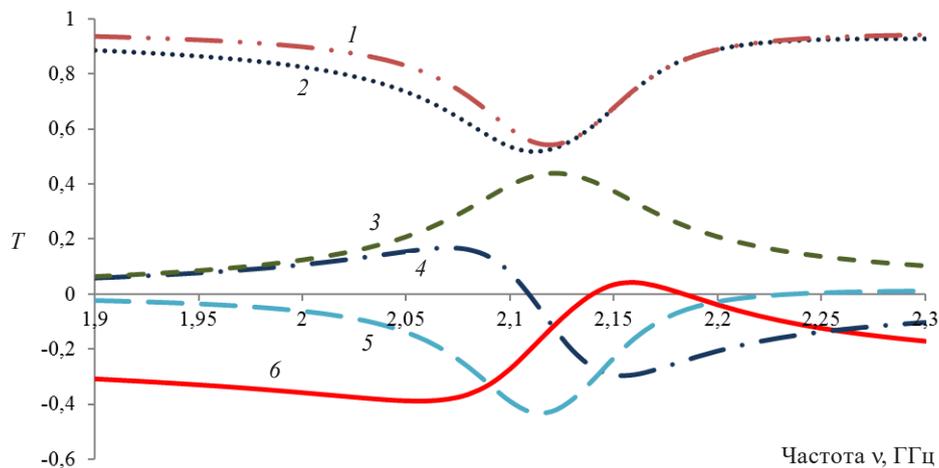


Рис. 5. Зависимость действительных и мнимых частей линейных компонент прошедшей волны от частоты при единичной амплитуде падающей волны: 1 –  $|T_{co}|$ ; 2 –  $\text{Re}(T_{co})$ ; 3 –  $|T_{cr}|$ ; 4 –  $\text{Re}(T_{cr})$ ; 5 –  $\text{Im}(T_{cr})$ ; 6 –  $\text{Im}(T_{co})$

Fig. 5. The dependence of the real and imaginary parts of the linear components of the transmitted wave on the frequency at a unit amplitude of the incident wave: 1 –  $|T_{co}|$ ; 2 –  $\text{Re}(T_{co})$ ; 3 –  $|T_{cr}|$ ; 4 –  $\text{Re}(T_{cr})$ ; 5 –  $\text{Im}(T_{cr})$ ; 6 –  $\text{Im}(T_{co})$

Из рис. 4 следует, что частотные зависимости эллиптичности  $\psi$  прошедшей волны и угла поворота главной оси ее эллипса поляризации  $\theta$  имеют выраженный резонансный характер, который связан с селективным преобладающим поглощением электромагнитной волны с правой круговой поляризацией (этот эффект кратко объяснен после формул (8) и (9)).

3. На рис. 5 показаны действительные и мнимые части линейных компонент прошедшей волны, параллельных и перпендикулярных вектору поля падающей волны. Анализ рисунка подтверждает, что прошедшая волна является эллиптически поляризованной, близкой к волне с круговой поляризацией.

На рис. 6 представлена фотография изготовленного метаматериала, состоящего из парных планарных спиралей (с право- и левосторонним закручиванием), который был ранее смоделирован нами для эффективного поглощения электромагнитных волн на резонансной частоте в СВЧ-диапазоне. Основой данного метаматериала является двусторонний стеклотекстолит FR4, процесс изготовления такого образца базируется на использовании технологий печатных плат. Этот

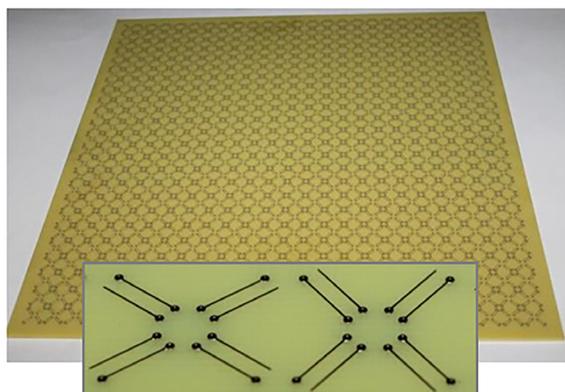


Рис. 6. Фотография метаматериала с компенсированной хиральностью – поглотителя электромагнитных волн в СВЧ-диапазоне

Fig. 6. A photo of a metamaterial with compensated chirality – an electromagnetic wave absorber in the microwave range

метаматериал является прототипом описанной в работе структуры. Его хиральные свойства компенсированы, поскольку он содержит правые и левые планарные спирали в равной концентрации. Если использовать только правые или только левые планарные спирали с геометрическими параметрами, рассчитанными в настоящей работе, то можно получить образец метаматериала – эффективного преобразователя поляризации прошедшей волны.

**Заключение.** В настоящей статье посредством моделирования исследована метаповерхность, позволяющая преобразовать падающую линейно поляризованную СВЧ-волну в прошедшую волну с эллиптической поляризацией, близкой к циркулярной. В качестве микрорезонаторов, играющих для метаповерхности роль метаатомов, используются двухвитковые планарные спирали, которые обладают заранее спроектированным сбалансированным поведением по отношению к электрическому и магнитному полям падающей волны. Это позволяет достичь двух свойств для метаповерхности в целом. Во-первых, коэффициент отражения является малым и составляет 5,75 % для волны резонансной частоты. Такое слабое отражение обусловлено приблизительным равенством волнового сопротивления метаповерхности и импеданса свободного пространства. Во-вторых, метаповерхность поглощает преимущественно циркулярно поляризованную волну только с одним знаком поляризации. Данное свойство вызвано селективностью спиралей по отношению к правым и левым циркулярно поляризованным волнам. Коэффициент пропускания на резонансной частоте составляет 49 %, а коэффициент эллиптичности прошедшей волны достигает значения 0,76. Более высокие значения коэффициента эллиптичности могут быть получены при использовании в качестве подложки более прозрачных диэлектриков, например, материала Rogers. В отличие от предложенного ранее поглотителя волн, преобразователь поляризации должен содержать планарные спирали только одного направления закручивания, т. е. обладать хиральными свойствами. Рассмотренная метаповерхность может быть изготовлена в рамках технологий печатных плат. После применения метода электродинамического подобия и соответствующего масштабирования элементов метаповерхности полученные результаты могут быть использованы для преобразования поляризации электромагнитных волн других частотных диапазонов, в частности, терагерцовых волн.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Опто- и СВЧ-электроника».

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the State Research Program “Photonics and Electronics for Innovation”, Subprogram “Opto- and Microwave Electronics”.

#### Список использованных источников

1. Asadchy, V. Bianisotropic metasurfaces: physics and applications / V. Asadchy, A. Díaz-Rubio, S. Tretyakov // *Nanophotonics* 2018. – 2018. – Vol. 7, № 6. – P. 1069-1094. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0132>

2. 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2869256>
3. Niemi, T. Synthesis of Polarization Transformers / T. Niemi, A. O. Karilainen, S. A. Tretyakov // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2013. – Vol. 61, № 6. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2252136>
4. Achieving wide-band linear-to-circular polarization conversion using ultra-thin bilayered metasurfaces / Y. Li [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2015. – Vol. 117, № 4. – P. 04451. <https://doi.org/10.1063/1.4906220>
5. Metallic Helix Array as a Broadband Wave Plate / C. Wu [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2011. – Vol. 107, № 17. – P. 177401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.177401>
6. Федоров, Ф. И. Теория гиротропии / Ф. И. Федоров. – Минск: Наука и техника, 1976. – 456 с.
7. Бокуть, Б. В. К феноменологической теории естественной оптической активности / Б. В. Бокуть, А. Н. Сердюков // *Журн. эксперим. и теор. физики*. – 1971. – Т. 61, № 5. – С. 1808–1813.
8. Проектирование метаматериалов на основе планарных спиралей в СВЧ-диапазоне / И. В. Семченко [и др.] // *Изв. Гомел. гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2020. – № 3 (120). – С. 154–160.
9. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer / V. S. Asadchy [et. al.] // *Photon. Nanostruct. – Fundam. Appl.* – 2014. – Vol. 12. – P. 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2014.04.004>
10. Преобразование поляризации прошедшей СВЧ-волны в бианизотропном метаматериале на основе планарных спиралей [Электронный ресурс] / А. Ю. Кравченко [и др.] // *Науч. конф., посвящ. 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова (Гомель, 25 июня 2021 г.): сб. материалов*. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 78–83. – Режим доступа: <http://elib.gsu.by/jspui/handle/123456789/25087>
11. *Electromagnetics of Bianisotropic Materials: Theory and Applications* / A. N. Serdyukov [et. al.]. – London: Gordon and Breach Publishing Group [etc.], 2001. – 337 p.
12. Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах / И. В. Семченко, С. А. Хахомов. – Минск: Беларус. навука, 2019. – 279 с.
13. Семченко, И. В. Преобразование поляризации электромагнитных волн спиральными излучателями / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // *Радиотехника и электроника*. – 2007. – Т. 52, № 8. – С. 917–922.
14. Семченко, И. В. Оптимальная форма спирали: равенство диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов // *Изв. высш. учеб. заведений. Физика*. – 2009. – Т. 52, № 5. – С. 30–36.
15. Modeling of Spirals with Equal Dielectric, Magnetic, and Chiral Susceptibilities / E. Saenz [et. al.] // *Electromagnetics*. – 2008. – Vol. 28, № 7. – P. 476–493. <https://doi.org/10.1080/02726340802322528>
16. Semchenko, I. V. Optimal Shape of Spiral: Equality of Dielectric, Magnetic and Chiral Properties / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // *META'08, Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies: proceedings*, Marrakesh, Morocco, 7–10 May 2008. – Paris, France, 2008. – P. 71–80.
17. Sihvola, A. H. Bi-isotropic constitutive relations / A. H. Sihvola, I. V. Lindell // *Microwave Opt. Technol. Lett.* – 1991. – Vol. 4, № 8. – P. 195–297. <https://doi.org/10.1002/mop.4650040805>
18. Tretyakov, S. *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics* / S. Tretyakov. – Artech House, 2003. – 284 p.
19. Lindell, I. V. *Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-isotropic Media* / I. V. Lindell. – Artech House, 1994. – 332 p.
20. Аззам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Аззам, Н. Башара. – М.: Мир, 1981. – 583 с.

## References

1. Asadchy V., Díaz-Rubio A., Tretyakov S. Bianisotropic metasurfaces: physics and applications. *Nanophotonics* 2018, vol. 7, no. 6, pp. 1069–1094. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0132>
2. Cuesta F. S., Faniayeu I. A., Asadchy V. S., Tretyakov S. A. Planar broadband Huygens' metasurfaces for wave manipulations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 12, pp. 7117–7127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2869256>
3. Niemi T., Karilainen A. O., Tretyakov S. A. Synthesis of Polarization Transformers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 6. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2252136>
4. Li Y., Zhang J., Qu S., Wang J., Zheng L., Pang Y., Xu Z., Zhang A. Achieving wide-band linear-to-circular polarization conversion using ultra-thin bilayered metasurfaces. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, no. 4, pp. 04451. <https://doi.org/10.1063/1.4906220>
5. Wu C., Li H., Yu X., Li F., Chen H., Chan C. Metallic Helix Array as a Broadband Wave Plate. *Physical Review Letters*, 2011, vol. 107, no. 17, pp. 177401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.177401>
6. Fedorov F. I. *Theory of Gyrotropy*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 456 p. (in Russian).
7. Bokut' B. V., Serdyukov A. N. On the phenomenological theory of natural optical activity. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1971, vol. 61, no. 5, pp. 1808–1813 (in Russian).
8. Semchenko I. V., Kravchenko A. Y., Samofalov A. L., Fanyaev I. A. Design of metamaterials based on planar spirals in the microwave range. *Izvestiya Gmel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny = Francisk Skorina Gmel State University Proceedings*, 2020, no. 3 (120), pp. 154–160 (in Russian).
9. Asadchy V. S., Faniayeu I. A., Ra'di Y., Tretyakov S. A. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 2014, vol. 12, pp. 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2014.04.004>
10. Kravchenko A. Y., Semchenko I. V., Samofalov A. L., Khakhomov S. A. Transformation of the polarization of the transmitted microwave wave in an anisotropic metamaterial based on planar spirals. *Nauchnaya konferentsiya, posvyash-*

*chennaya 110-letiyu so dnya rozhdeniya F. I. Fedorova (Gomel', 25 iyunya 2021 goda): sbornik materialov* [Scientific conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of F. I. Fedorov (Gomel, June 25, 2021): collection of materials]. Gomel, 2021, pp. 78–83. Available at: <http://elib.gsu.by/jspui/handle/123456789/25087> (in Russian).

11. Serdyukov N., Semchenko I., Tretyakov S., Sihvola A. *Electromagnetics of Bianisotropic Materials: Theory and Applications*. London, Gordon and Breach Publishing Group [etc.], 2001. 337 p.

12. Semchenko I. V., Khakhomov S. A. *Electromagnetic Waves in Metamaterials and Spiral Structures*. Minsk, Belruskaya navuka Publ., 2019. 279 p. (in Russian).

13. Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Samofalov A. L. Transformation of polarization of electromagnetic waves by spiral emitters. *Radiotekhnika i elektronika*, 2007, vol. 52, no. 8, pp. 917–922 (in Russian).

14. Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Samofalov A. L. Optimal spiral shape: equality of dielectric, magnetic and chiral susceptibilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2009, vol. 52, no. 5, pp. 30–36 (in Russian).

15. Saenz E., Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Guven K., Gonzalo R., Ozbay E., Tretyakov S. Modeling of Spirals with Equal Dielectric, Magnetic, and Chiral Susceptibilities. *Electromagnetics*, 2008, vol. 28, no. 7, pp. 476–493. <https://doi.org/10.1080/02726340802322528>

16. Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Samofalov A. L. Optimal Shape of Spiral: Equality of Dielectric, Magnetic and Chiral Properties. *META'08, Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies: proceedings, Marrakesh, Morocco, 7–10 May 2008*. Paris, France, 2008, pp. 71–80.

17. Sihvola A. H., Lindell I. V. Bi-isotropic constitutive relations. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1991, vol. 4, no. 8, pp. 195–297. <https://doi.org/10.1002/mop.4650040805>

18. Tretyakov S. *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics*. Artech House, 2003. 284 p.

19. Lindell I. V. *Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-isotropic Media*. Artech House, 1994. 332 p.

20. Azzam R., Bashara N. *Ellipsometry and Polarized Light*. Moscow, Mir Publ., 1981. 583 p. (in Russian).

### Информация об авторах

**Семченко Игорь Валентинович** – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по учебной работе, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (ул. Советская, 104, 246028, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: [isemchenko@gsu.by](mailto:isemchenko@gsu.by). <https://orcid.org/0000-0002-2438-0330>

**Кравченко Александр Юрьевич** – аспирант, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (ул. Советская, 104, 246028, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: [kravchenko.a.y@tut.by](mailto:kravchenko.a.y@tut.by)

**Самофалов Андрей Леонидович** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (ул. Советская, 104, 246028, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: [samofalov@gsu.by](mailto:samofalov@gsu.by). <https://orcid.org/0000-0002-6691-9189>

**Хахомов Сергей Анатольевич** – доктор физико-математических наук, доцент, ректор, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (ул. Советская, 104, 246028, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: [khakh@gsu.by](mailto:khakh@gsu.by). <https://orcid.org/0000-0001-7068-7061>

### Information about the authors

**Igor V. Semchenko** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Francisk Skorina Gomel State University (104, Sovetskaya Str., 246028, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [isemchenko@gsu.by](mailto:isemchenko@gsu.by). <https://orcid.org/0000-0002-2438-0330>

**Alexander Y. Kravchenko** – Postgraduate Student, Francisk Skorina Gomel State University (104, Sovetskaya Str., 246028, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [kravchenko.a.y@tut.by](mailto:kravchenko.a.y@tut.by)

**Andrey L. Samofalov** – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, Francisk Skorina Gomel State University (104, Sovetskaya Str., 246028, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [samofalov@gsu.by](mailto:samofalov@gsu.by). <https://orcid.org/0000-0002-6691-9189>

**Sergei A. Khakhomov** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Rector, Francisk Skorina Gomel State University (104, Sovetskaya Str., 246028, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [khakh@gsu.by](mailto:khakh@gsu.by). <https://orcid.org/0000-0001-7068-7061>