

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 537.86,621.396.67

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2025-61-4-343-352>

Поступила в редакцию 20.10.2025

Received 20.10.2025

М. А. Подалов¹, И. В. Семченко², А. Л. Самофалов¹, С. А. Хахомов¹

¹*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
Гомель, Республика Беларусь*

²*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
Минск, Республика Беларусь*

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ Ω -ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА

Аннотация. Целью работы является создание с использованием технологий печатных плат нового типа поляризаторов в СВЧ-диапазоне для преобразования падающей линейно поляризованной волны в отраженную циркулярно поляризованную. Преобразователь поляризации представляет собой метаповерхность, состоящую из массива плоских медных прямоугольных Ω -элементов, на подложке из стеклотекстолита. Найдена оптимальная форма Ω -элементов, при которой в каждом из них под действием падающей волны индуцируются одинаково значимые электрический дипольный момент и магнитный момент. Эти оптимальные геометрические параметры Ω -элементов позволяют использовать их в поглотителях СВЧ-волн. Показано, что такая форма Ω -резонаторов, образующих метаповерхность, также универсальна для их применения в ТГц-поляризаторах. Исследованы поляризационно-селективные свойства метаматериала на основе стандартного фольгированного медью стеклотекстолита. Метаматериал, образованный прямоугольными Ω -элементами, проявил поляризационно-селективные свойства вблизи резонансной частоты в СВЧ-диапазоне и может использоваться как эффективный преобразователь поляризации СВЧ-волн.

Ключевые слова: метаматериал, метаповерхность, прямоугольный омега-элемент, Ω -элемент, циркулярная поляризация электромагнитной волны, печатные платы

Для цитирования. Поляризационные свойства метаповерхности на основе прямоугольных Ω -элементов на подложке из стеклотекстолита / М. А. Подалов, И. В. Семченко, А. Л. Самофалов, С. А. Хахомов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных науку. – 2025. – Т. 61, № 4. – С. 343–352. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2025-61-4-343-352>

Maxim A. Podalov¹, Igor V. Semchenko², Andrey L. Samofalov¹, Sergei A. Khahomov¹

¹*Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus*

²*SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”, Minsk, Republic of Belarus*

POLARIZATION PROPERTIES OF A METASURFACE BASED ON RECTANGULAR Ω -ELEMENTS ON A GLASS TEXTOLITE SUBSTRATE

Annotation. The goal of this project is to create a new type of polarizer using printed circuit boards that can convert an incident linearly polarized wave into a reflected circularly polarized wave in the microwave range. This device represents a metamaterial surface consisting of a metal plate array made up of flat copper rectangular Ω -elements on a glass fiber substrate. By optimizing the shape of these elements, we found that they can also be used as absorbers for microwaves in addition to their ability to transform polarization. We showed that this form of Ω -resonators, which make up the metamaterial surface, are universal for use in THz polarizers. Finally, we investigated the polarization-selective properties of a metamaterial based on standard copper-coated fiberglass. This material exhibited polarization-selective properties near the resonant frequency in the microwave range and can be used as an effective polarization converter for microwaves.

Keywords: metamaterial, metasurface, rectangular omega element, Ω -element, circular polarization of an electromagnetic wave, printed circuit boards

For citation. Podalov M. A., Semchenko I. V., Samofalov A. L., Khahomov S. A. Polarization properties of a metasurface based on rectangular Ω -elements on a glass textolite substrate. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2025, vol. 61, no. 4, pp. 343–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2025-61-4-343-352>

Введение. В настоящее время развитие технологий изготовления метаматериалов переживает бурный рост, в первую очередь в направлении создания метаповерхностей. При этом, несмотря на успешные исследования, широкополосный преобразователь поляризации волны из линейной в циркулярную (круговую) при отражении волн в СВЧ-диапазоне до настоящего времени реализован в недостаточной степени. Поэтому задача создания такого поляризатора остается новой и актуальной, особенно с использованием методов и стандартов современной фотолитографии и технологий печатных плат.

Поляризаторы электромагнитных волн на основе метаматериалов и метаповерхностей в различных областях спектра могут иметь элементы различной формы, например, это спирали с различным числом витков, разомкнутые кольца, ориентированные в разных положениях, а также Ω -элементы классической или прямоугольной формы [1–9]. Основной диапазон такого рода поляризаторов составляет СВЧ- и в меньшей степени ТГц-полоса спектра.

Стоит отметить, что Ω -элементы и разомкнутые кольца имеют планарную геометрию и сравнительно легко могут быть изготовлены с помощью методов современной фотолитографии.

Ранее было сформулировано и экспериментально исследовано условие оптимальности Ω -элемента в составе двумерного массива, в первую очередь для создания поглотителя СВЧ- и ТГц-волн. Это условие оптимальности определяется одинаковой значимостью индуцируемых электрических дипольных моментов и магнитных моментов. В оптимальном элементе эти моменты равны между собой по модулю либо, в зависимости от выбора системы единиц, имеют коэффициент пропорциональности, равный скорости света в вакууме. Длина металлизированной полоски, образующей поляризующий элемент, приблизительно равна половине длины волны падающего излучения, что соответствует условию главного частотного резонанса [10–13].

Целью данной статьи является получение, исследование и создание метаматериала (метаповерхности), образованного массивом прямоугольных Ω -элементов, с помощью методов современной фотолитографии на базе стандартного фольгированного медью стеклотекстолита, к примеру FR4 (T_g 135). Использование прямоугольных Ω -элементов взамен классических элементов в форме греческой буквы Ω упрощает изготовление метаматериала в рамках технологий печатных плат и позволяет достичь более плотного расположения элементов на метаповерхности. Такая метаповерхность может быть использована в СВЧ-диапазоне для частотной фильтрации и преобразования поляризации волны из линейной в циркулярную, при отражении волны от метаматериала. Возникновение циркулярно поляризованной отраженной волны обусловлено одновременным активированием электрического дипольного момента и магнитного момента в каждом прямоугольном Ω -элементе. При этом электрический дипольный и магнитный моменты играют одинаково важную роль и вносят равные по абсолютной величине вклады в отраженную волну.

Границные условия и моделирование. Ранее в работах [10, 11] нами были рассчитаны и экспериментально исследованы Ω -элементы в СВЧ-диапазоне (2,55–3,8 ГГц). Такие частицы рассматривались также для терагерцового диапазона в качестве элементов эффективных поляризаторов либо поглотителей электромагнитных волн [12–15]. На данном этапе исследований разрабатывается метаповерхность на базе массива прямоугольных Ω -элементов, параметры которых оптимизированы для СВЧ-диапазона и стандартизированы для производства с помощью методов современной фотолитографии. Показано, что метаматериал на основе массива Ω -элементов может выполнять функции эффективного преобразователя поляризации электромагнитной волны в СВЧ-диапазоне.

Проектирование отдельного прямоугольного Ω -элемента и массива на его основе для СВЧ-диапазона сопряжено с изменением параметров элемента в соответствии с изменением длины волны падающего излучения. В частности, длина волны для резонансной частоты 3 ГГц составляет 10 см, а длина металлизированной полоски, образующей Ω -элемент, будет приблизительно равна 5 см.

После построения объекта моделирования были введены граничные условия и заданы параметры падающей электромагнитной волны. При решении поставленной задачи использовалась падающая плоская волна. Согласно общепринятым обозначениям для s -поляризованной волны

(TE-волны) вектор \vec{E} колеблется ортогонально плоскости падения и параллельно поверхности метаматериала. Для p-поляризованной волны (TM-волны) вектор \vec{E} колеблется в плоскости падения и в нашем эксперименте под углом 45° к поверхности метаматериала. Поскольку плоскость падения волны параллельна плечам Ω -элементов, то p-поляризованная волна наиболее эффективно индуцирует электрические дипольные моменты Ω -элементов. В другом случае для s-поляризованной волны наиболее эффективно возбуждаются магнитные моменты Ω -элементов, это происходит под действием вектора магнитного поля \vec{B} падающей волны, который создает магнитный поток сквозь прямоугольные Ω -элементы.

Методика исследования заключается в численном моделировании с помощью метода конечных элементов электрического тока, возникающего в массиве прямоугольных Ω -элементов под действием падающей электромагнитной волны. Рассчитаны электрический дипольный момент и магнитный момент Ω -элемента, имеющие взаимно перпендикулярное направление. Учтено влияние геометрических параметров Ω -элемента на возможность получения круговой поляризации отраженной волны при падении линейно поляризованной волны.

В исследовании использовалась традиционная бианизотропная частица с Ω -связью – металлическая полоска в форме стилизованной греческой буквы Ω , которая в рассматриваемом случае в результате приобрела прямоугольную форму, более удобную для изготовления в рамках технологий печатных плат и позволяющую более плотно располагать микрорезонаторы на метаповерхности.

Параметры Ω -элемента как классической, так и стилизованной прямоугольной формы могут быть приближенно рассчитаны с учетом модели квазистационарного тока. При этом предполагается, что сила тока не изменяется в зависимости от координаты, отсчитываемой вдоль Ω -элемента, а электромагнитные и магнитоэлектрические поляризуемости для оптимального (сбалансированного) Ω -элемента должны быть равны друг другу.

Используя массив оптимальных резонаторов на метаповерхности, можно усилить поляризационные свойства метаматериала в целом. Однако требуется дополнительная оптимизация расположения частиц в массиве, поскольку их взаимодействие здесь также значительно влияет на свойства поляризатора. На рис. 1 показан дизайн отдельного Ω -резонатора со структурными параметрами (a) и дизайн метаповерхности на основе прямоугольного Ω -резонатора со структурными параметрами (b).

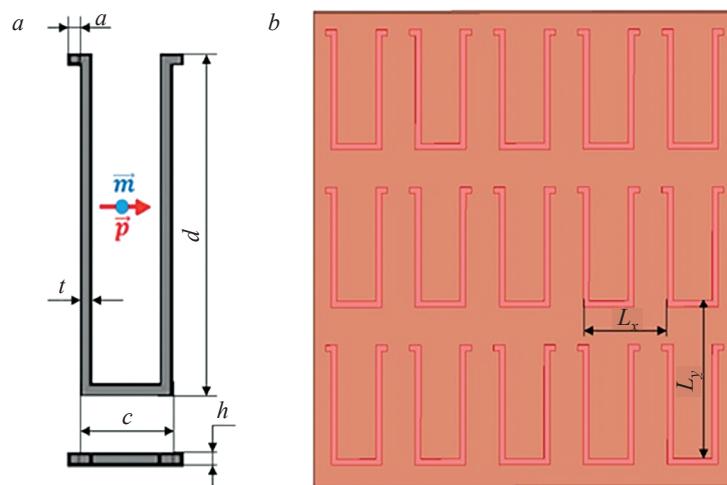


Рис. 1. Дизайн отдельного Ω -резонатора со структурными параметрами (a) и дизайн метаповерхности на основе прямоугольных Ω -резонаторов со структурными параметрами (b)

Здесь \vec{p} и \vec{m} – векторы электрического дипольного момента и магнитного момента прямоугольного Ω -резонатора

Fig. 1. Design of a single Ω -resonator with structural parameters (a) and design of a metasurface based on rectangular Ω -resonators with structural parameters (b). Here \vec{p} and \vec{m} are the manifestation designations of the dipole moment and magnetic moment of a rectangular Ω -resonator

Основные структурные параметры прямоугольного Ω -резонатора указаны на рис. 1, а. Ширина элемента равна c , ширина металлизированной полоски – t , длина элемента – d , толщина медной металлизированной полоски $h = 35$ мкм (в нашем случае она всегда одинакова, так как соответствует технологическим требованиям к толщине фольги), длина плеча – a (в принципе, плечо может отсутствовать). На рис. 1, б приведены параметры массива прямоугольных Ω -резонаторов. Период массива по горизонтали равен L_x , период массива по вертикали – L_y . Модель массива метаповерхности образована 15 прямоугольными Ω -элементами. Подложка выполнена из стеклотекстолита FR4 толщиной 0,51 мм. Параметры толщины медной фольги и стеклотекстолита FR4 подобраны в соответствии со стандартами, принятыми при производстве серийных односторонних печатных плат.

Результаты моделирования и их анализ. В работе рассмотрен случай с наклонным падением электромагнитной волны, вектор \vec{k} падающей волны направлен под углом 45° к нормали к метаповерхности.

Наклонное падение СВЧ-волны (при ориентации вектора \vec{k} под углом 45° к плоскости Ω -элемента) позволяет активировать и электрический дипольный момент, и магнитный момент Ω -элементов, поэтому коэффициент эллиптичности отраженной волны будет достигать максимальных значений на расчетной частоте. При этом выполняется условие полуволнового резонанса, поэтому коэффициент отражения также принимает максимальное значение.

Рассмотрим первый случай, соответствующий р-поляризации. Параметрическое моделирование проводилось с использованием в основном пяти параметров элемента: ширина элемента, ширина металлизированной полоски, длина плеча, расстояние между элементами по горизонтали и по вертикали. Из всех изученных параметров наиболее хорошим поляризатором для получения циркулярно поляризованной отраженной волны оказался массив Ω -элементов с параметрами: $c = 9$ мм, $t = 1$ мм, $d = 20,5$ мм, $a = 1$ мм, $L_x = 15$ мм и $L_y = 27$ мм. Метаповерхность с такими параметрами показала коэффициент эллиптичности отраженной волны $k_1 = 0,999$ на расчетной частоте, равной 3 ГГц (рис. 2). Также на кривой есть второй пик на частоте 2,35 ГГц со значением $k_2 = 0,975$. При этом Ω -элемент достаточно хорошо преобразует поляризацию электромагнитной

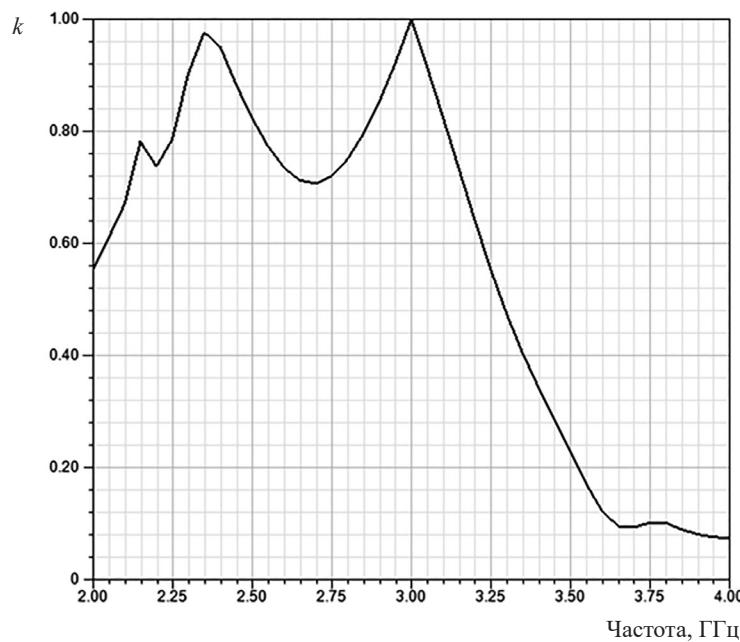


Рис. 2. График частотной зависимости коэффициента эллиптичности k отраженной волны для метаповерхности с параметрами: $L_x = 15$ мм, $L_y = 27$ мм, падающая волна р-поляризована

Fig. 2. Graph of the frequency dependence of the ellipticity coefficient k of the reflected wave for a metasurface with the parameters: $L_x = 15$ mm, $L_y = 27$ mm, the incident wave is p-polarized

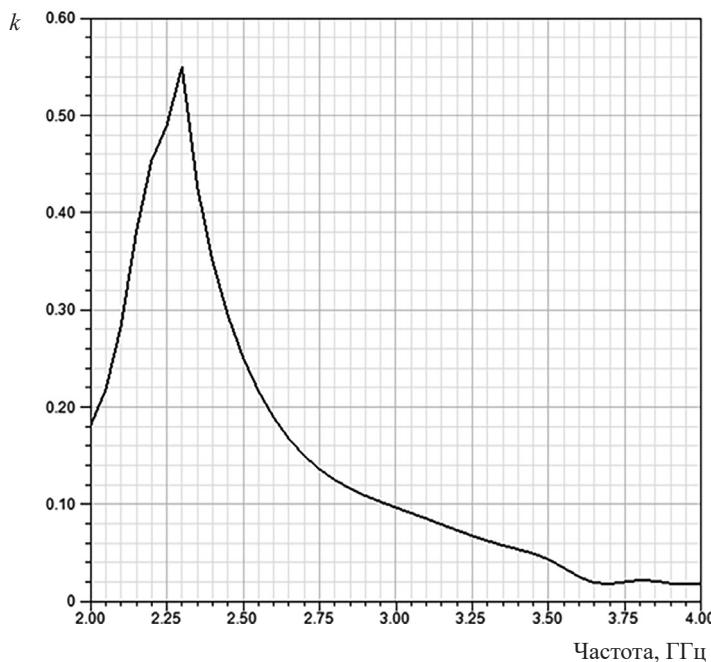


Рис. 3. График частотной зависимости коэффициента эллиптичности k отраженной волны для метаповерхности с параметрами: $L_x = 15$ мм, $L_y = 28$ мм, падающая волна s-поляризована

Fig. 3. Graph of the frequency dependence of the ellipticity coefficient k of the reflected wave for a metasurface with the parameters: $L_x = 15$ mm, $L_y = 28$ mm, the incident wave is s-polarized

волны при ее отражении от плоско поляризованной падающей волны к циркулярно поляризованной отраженной волне в достаточно широком частотном интервале. Максимальные значения напряженности электрического поля отраженной волны наблюдаются на диапазоне частот 2,1–2,3 ГГц, что свидетельствует о достаточно хорошем возбуждении электромагнитной волной Ω -элемента в районе второго пика коэффициента эллиптичности.

При анализе второго случая, при s-поляризации, можно заключить, что лучшими поляризационными свойствами обладает массив Ω -элементов с параметрами $c = 9$ мм, $t = 1$ мм, $d = 20,5$ мм, $a = 1$ мм, $L_x = 15$ мм и $L_y = 28$ мм. Фактически, по сравнению с первым случаем, изменился только параметр массива L_y . Метаповерхность на основе Ω -элементов с такими параметрами показала коэффициент эллиптичности отраженной волны $k_{\max} = 0,549$ на частоте, равной 2,3 ГГц, что соответствует эллиптически-поляризованной отраженной волне (рис. 3). В этом случае «виток» Ω -элемента пронизывается вектором магнитного поля падающей волны, т. е. активируется вектором \vec{B} . Сравнительно небольшой коэффициент эллиптичности объясняется недостаточно эффективно работающей электрической составляющей падающей волны.

Экспериментальное исследование. Для подтверждения результатов моделирования был изготовлен образец метаматериала, состоящего из Ω -элементов прямоугольной формы, изготовленных на основе стеклотекстолита (рис. 4). С образцами были проведены экспериментальные исследования в СВЧ-диапазоне, частотный диапазон составил 2–4 ГГц [16]. Схема эксперимента показана на рис. 5.

Анализ графиков на рис. 6 показал достаточно хорошую степень соответствия результатов экспериментального исследования взаимодействия электромагнитных СВЧ-волн с образцами двумерного метаматериала с результатами моделирования. В случае p-поляризации падающей волны (a) коэффициент эллиптичности отраженной волны равен $k = 0,92$ на частоте 3,479 ГГц. В случае s-поляризации падающей волны (b) коэффициент эллиптичности отраженной волны равен $k = 0,55$ на частоте 2,437 ГГц.

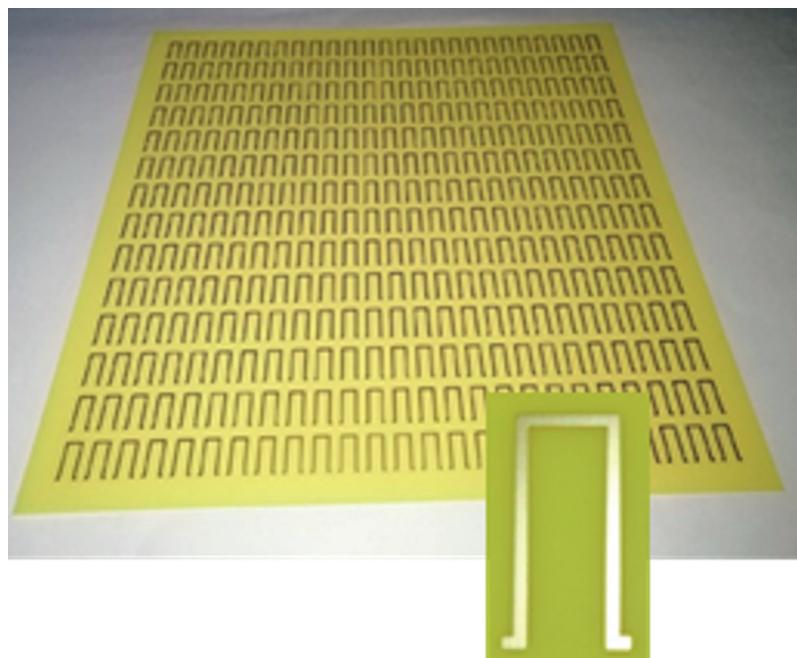


Рис. 4. Экспериментальный образец метаматериала на основе стеклотекстолита

Fig. 4. Photo of an experimental sample of a metamaterial based on fiberglass

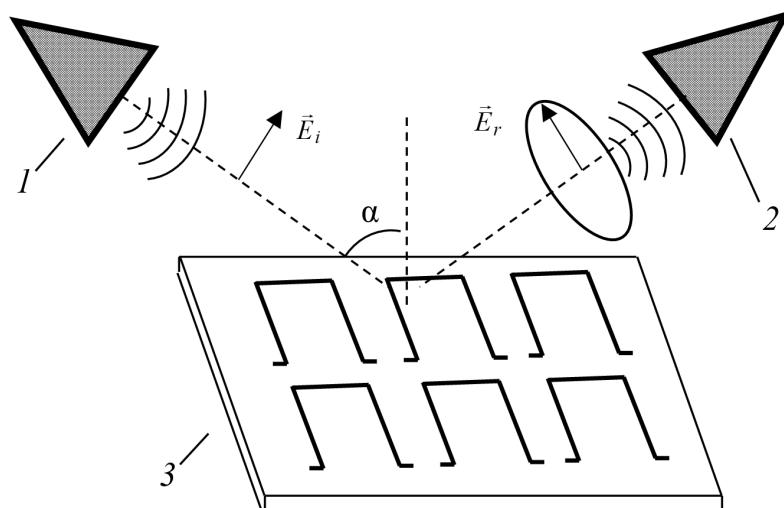


Рис. 5. Схема эксперимента: показан случай p-поляризации падающей волны; при s-поляризации вектор \vec{E}_i ориентирован перпендикулярно плоскости падения; отраженная волна имеет эллиптическую поляризацию, близкую к циркулярной (1 – излучающая антенна; 2 – приемная антенна; 3 – образец метаматериала; $\alpha = 45^\circ$ – угол падения; \vec{E}_r – вектор напряженности электрического поля отраженной волны)

Fig. 5. Experimental setup: the case of p-polarization of the incident wave is shown; for s-polarized incident waves, the vector \vec{E}_i is oriented perpendicular to the plane of incidence; the reflected wave has an elliptical polarization, close to circular one (1 is an emitting antenna; 2 is a receiving antenna; 3 is a metamaterial sample; $\alpha = 45^\circ$ is the angle of incidence; \vec{E}_r is the electric field strength vector of the reflected wave)

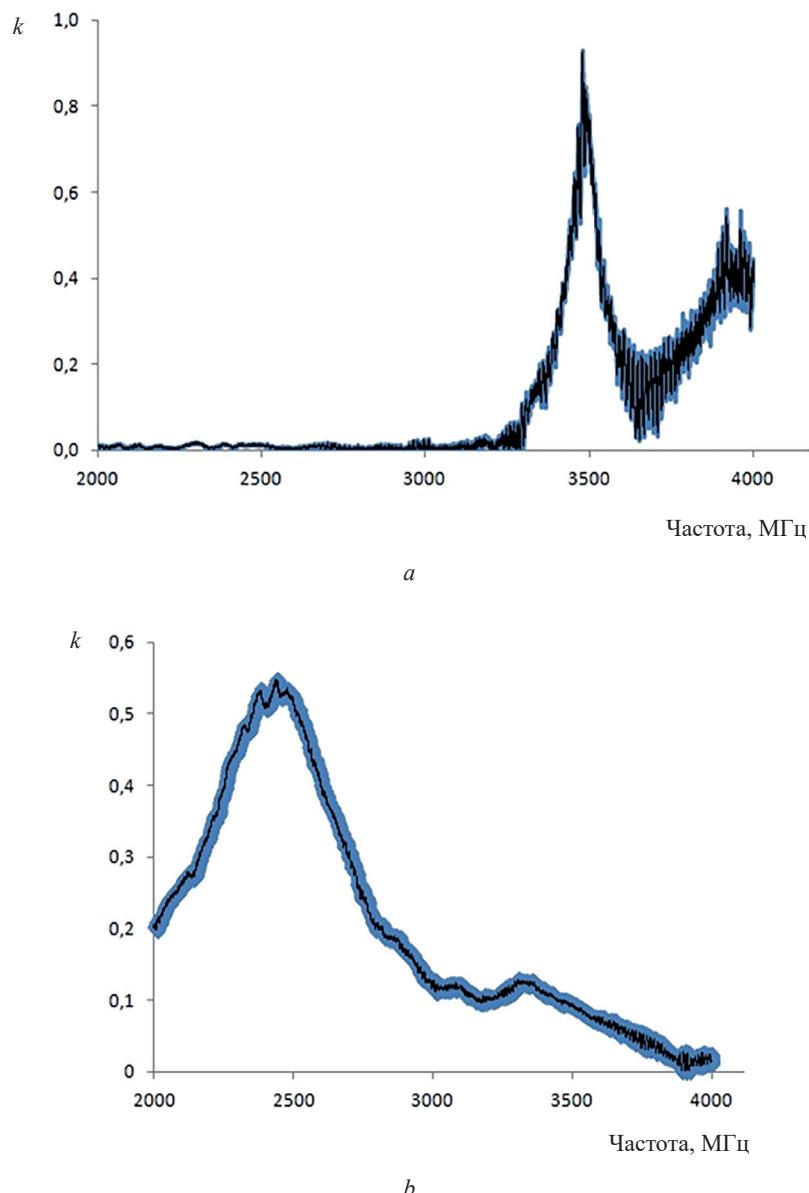


Рис. 6. Графики результатов экспериментального исследования коэффициента эллиптичности отраженной волны k при взаимодействии падающей линейно поляризованной электромагнитной волны с образцом двумерного метаматериала, состоящего из Ω -элементов прямоугольной формы, изготовленных на основе стеклотекстолита:
 a – p -поляризация падающей волны; b – s -поляризация падающей волны

Fig. 6. Graphs of the results of an experimental study of the ellipticity coefficient of the reflected wave k during the interaction of an incident linearly polarized electromagnetic wave with a sample of a two-dimensional metamaterial consisting of rectangular Ω -elements made on the basis of fiberglass: a is p -polarization of the incident wave; b is s -polarization of the incident wave

Заключение. По результатам моделирования отдельного прямоугольного Ω -элемента и определения его оптимальной формы сделан вывод о том, что метаповерхность на основе прямоугольных Ω -элементов обладает хорошими поляризующими свойствами, рассчитанными для СВЧ-диапазона. Такая метаповерхность является эффективным поляризатором электромагнитных волн с коэффициентом эллиптичности отраженной волны, близким к единице, при наклонном падении линейно поляризованной электромагнитной волны под углом 45° к плоскости метаповерхности.

Возникновение циркулярно поляризованной отраженной волны является результатом одновременного возбуждения электрического дипольного момента и магнитного момента в каждом прямоугольном Ω -элементе. При этом электрический дипольный момент и ортогональный ему магнитный момент имеют одинаково важное значение и вносят вклады в отраженную волну, одинаковые по абсолютной величине.

Одним из преимуществ рассматриваемого прямоугольного Ω -элемента является то, что преобразование поляризации СВЧ-волны из падающей линейно поляризованной в циркулярно поляризованную в исследуемом метаматериале будет возможно для отраженной волны, а не для волны, проходящей через метаматериал. Это позволит использовать поглощающие метаматериалы и снизить потери в интенсивности волн с преобразованной поляризацией.

Максимальное значение коэффициента эллиптичности, близкое к единице, наблюдается у массива прямоугольных Ω -элементов с параметрами: $c = 9$ мм, $t = 1$ мм, $d = 20,5$ мм, $a = 1$ мм, $L_x = 15$ мм и $L_y = 27$ мм. Метаповерхность на основе Ω -элементов с такими параметрами показала коэффициент эллиптичности отраженной волны $k_1 = 0,999$ на расчетной частоте, равной 3 ГГц, и $k_2 = 0,975$ на частоте 2,35 ГГц в случае р-поляризации падающей волны. По результатам параметрического моделирования метаповерхности изготовлен экспериментальный образец.

Показано, что для создания поляризатора в СВЧ-диапазоне вблизи резонансной частоты может быть использован двумерный метаматериал на основе Ω -элементов прямоугольной формы на базе стеклотекстолита. Этот вывод подтверждается результатами моделирования и эксперимента. Для создания метаматериалов и метаповерхностей на основе прямоугольных элементов, обладающих стилизованной прямоугольной формой, могут быть использованы методы печатных плат. Вакуумно-плазменные технологии также могут быть применены для получения Ω -структурированных метаматериалов и метаповерхностей, содержащих прямоугольные элементы.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» подпрограммы «Фотоника».

Acknowledgments. This work was carried out in the framework of the State Scientific Research Program “Photonics, Opto- and Microelectronics”, subprogram “Photonics”.

Список использованных источников

1. Cheng, Z. A multi-functional polarization convertor based on chiral metamaterial for terahertz waves / Z. Cheng, Y. Cheng // Optics Communications. – 2019. – Vol. 435. – P. 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.11.038>
2. Sun, B. Optical refractive index sensor based on the conjugated bilayer Γ -shaped chiral metamaterials / B. Sun, Y. Yingying // Optik. – 2019. – Vol. 182. – P. 587–593. <https://doi.org/10.1016/j.jleo.2019.01.028>
3. Yu, Y. Analysis of giant circular dichroism metamaterial based on conductive coupling / Y. Yu, B. Sun // Optik. – 2019. – Vol. 182. – P. 1046–1052. <https://doi.org/10.1016/j.jleo.2019.02.019>
4. A bi-layered chiral metamaterial with high-performance broadband asymmetric transmission of linearly polarized wave / F. Mirzamohammadi, J. Nourinia, C. Ghobadi, M. Majidzadeh // AEU – International Journal of Electronics and Communications. – 2019. – Vol. 98. – P. 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.11.008>
5. Asymmetric chiral metamaterial circular polarizer based on twisted split-ring resonator / Y. Z. Cheng, Y. Nie, Z. Z. Cheng [et al.] // Applied Physics B. – 2014. – Vol. 116. – P. 129–134. <https://doi.org/10.1007/s00340-013-5659-z>
6. 3D chiral plasmonic metamaterials fabricated by direct laser writing: the twisted omega particle / I. Sakellari, X. Yin, M. L. Nesterov [et al.] // Advanced Optical Materials. – 2017. – Vol. 5, № 16. – Art. ID 1700200. <https://doi.org/10.1002/adom.201700200>
7. Numerical parametric study of chiral effects and group delays in Ω element based terahertz metamaterial / D. B. Stojanović, P. P. Belićev, J. Radovanović, V. Milanović // Physics Letters A. – 2019. – Vol. 383, № 15. – P. 1816–1820. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.02.035>
8. Broadband asymmetric transmission and polarization conversion of a linearly polarized wave based on chiral metamaterial in terahertz region / D. Liu, Z. Y. Xiao, X. L. Ma [et al.] // Wave Motion. – 2016. – Vol. 66. – P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2016.05.003>
9. Broadband asymmetric transmission and multi-band 90° polarization rotator of linearly polarized wave based on multi-layered metamaterial / D. Liu, Z. Y. Xiao, X. L. Ma, Z. H. Wang // Optics Communications. – 2015. – Vol. 354. – P. 272–276. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.04.043>
10. Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of Ω elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, M. A. Podalov, S. A. Tret'yakov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2007. – Vol. 52, № 9. – P. 1002–1005. <https://doi.org/10.1134/S1064226907090082>

11. The effective optimal parameters of metamaterial on the base of omega-elements / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov [et al.] // Recent Global Research and Education: Technological Challenges: Proceedings of the 15th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2016 / eds: R. Jabłoński, R. Szewczyk. – Springer, Cham, 2017. – P. 3–9. – (Advances in Intelligent Systems and Computing; vol. 519). https://doi.org/10.1007/978-3-319-46490-9_1
12. Omega-structured substrate-supported metamaterial for the transformation of wave polarization in THz frequency range / I. Semchenko, S. Khakhomov, A. Samofalov [et al.] // Recent Advances in Technology Research and Education: Proceedings of the 16th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2017 / eds: D. Luca, L. Sirghi, C. Costin. – Springer International Publishing, 2017. – P. 72–80. – (Advances in Intelligent Systems and Computing; vol. 660). https://doi.org/10.1007/978-3-319-67459-9_10
13. Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators / A. Balmakou, M. Podalov, S. Khakhomov [et al.] // Optics Letters. – 2015. – Vol. 40, № 9. – P. 2084–2084. <https://doi.org/10.1364/OL.40.002084>
14. Polarization Properties of a Rectangular Balanced Omega Element in the THz Range / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, M. A. Podalov, A. L. Samofalov // Engineering for Sustainable Future. INTER-ACADEMIA 2019 / ed. A. Várkonyi-Kóczy. – Springer, 2020. – P. 84–93. – (Lecture Notes in Networks and Systems; vol 101). https://doi.org/10.1007/978-3-030-36841-8_8
15. Terahertz Polarization-Resolved Spectra of the Metamaterial Formed by Optimally Shaped Omega Elements on a Silicon Substrate at Oblique Incidence of Waves / A. V. Lyakhovich, I. V. Semchenko, A. L. Samofalov [et al.] // Photonics. – 2024. – Vol. 11, № 2. – Art. ID 163. <https://doi.org/10.3390/photonics11020163>
16. Microwave polarization converter consisting of rectangular omega resonators located on a dielectric substrate / I. Semchenko, S. Khakhomov, M. Podalov, A. Samofalov // 2021 Fifteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials), NYC. – New York, 2021. – P. 386–388. <https://doi.org/10.1109/metamaterials52332.2021.9577110>

References

1. Cheng Z., Cheng Y. A multi-functional polarization convertor based on chiral metamaterial for terahertz waves. *Optics Communications*, 2019, vol. 435, pp. 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.11.038>
2. Sun B., Yingying Y. Optical refractive index sensor based on the conjugated bilayer Γ-shaped chiral metamaterials. *Optik*, 2019, vol. 182, pp. 587–593. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.01.028>
3. Yu Y., Sun B. Analysis of giant circular dichroism metamaterial based on conductive coupling. *Optik*, 2019, vol. 182, pp. 1046–1052. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.019>
4. Mirzamohammadi F., Nourinia J., Ghobadi C., Majidzadeh M. A bi-layered chiral metamaterial with high-performance broadband asymmetric transmission of linearly polarized wave. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, 2019, vol. 98, pp. 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.11.008>
5. Cheng Y. Z., Nie Y., Cheng Z. Z., Wang X., Gong R. Z. Asymmetric chiral metamaterial circular polarizer based on twisted split-ring resonator. *Applied Physics B*, 2014, vol. 116, pp. 129–134. <https://doi.org/10.1007/s00340-013-5659-z>
6. Sakellari I., Yin X., Nesterov M. L., Terzaki K., Xomalis A., Farsari M. 3D chiral plasmonic metamaterials fabricated by direct laser writing: the twisted omega particle. *Advanced Optical Materials*, 2017, vol. 5, no. 16, art. ID 1700200. <https://doi.org/10.1002/adom.201700200>
7. Stojanović D. B., Belićev P. P., Radovanović J., Milanović V. Numerical parametric study of chiral effects and group delays in Ω element based terahertz metamaterial. *Physics Letters A*, 2019, vol. 383, no. 15, pp. 1816–1820. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.02.035>
8. Liu D. J., Xiao Z. Y., Ma X. L., Xu K. K., Tang J. Y., Wang Z. H. Broadband asymmetric transmission and polarization conversion of a linearly polarized wave based on chiral metamaterial in terahertz region. *Wave Motion*, 2016, vol. 66, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2016.05.003>
9. Liu D. J., Xiao Z. Y., Ma X. L., Wang Z. H. Broadband asymmetric transmission and multi-band 90° polarization rotator of linearly polarized wave based on multi-layered metamaterial. *Optics Communications*, 2015, vol. 354, pp. 272–276. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.04.043>
10. Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Podalov M. A., Tretyakov S. A. Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of Ω elements. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2007, vol. 52, no. 9, pp. 1002–1005. <https://doi.org/10.1134/S1064226907090082>
11. Semchenko I. V., Khakhomov S. A., Samofalov A. L., Podalov M. A., Songsong Q. The effective optimal parameters of metamaterial on the base of omega-elements. Jabłoński R., Szewczyk R. (eds). *Recent Global Research and Education: Technological Challenges: Proceedings of the 15th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 519. Springer, Cham, 2017, pp. 3–9. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46490-9_1
12. Semchenko I., Khakhomov S., Samofalov A., Podalov M., Solodukha V., Pyatlitski A., Kovalchuk N. Omega-structured substrate-supported metamaterial for the transformation of wave polarization in THz frequency range. Luca D., Sirghi L., Costin C. (eds). *Recent Advances in Technology Research and Education: Proceedings of the 16th International Conference on Global Research and Education Inter-Academia 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 660. Springer International Publishing, 2017, pp. 72–80. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67459-9_10

13. Balmakou A., Podalov M., Khakhomov S., Stavenga D., Semchenko I. Ground-plane-less bidirectional terahertz absorber based on omega resonators. *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 9, pp. 2084–2087. <https://doi.org/10.1364/OL.40.002084>
14. Semchenko I., Khakhomov S., Podalov M., Samofalov A. Polarization Properties of a Rectangular Balanced Omega Element in the THz Range. Várkonyi-Kóczy A. (eds). *Engineering for Sustainable Future. INTER-ACADEMIA 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 101*. Springer, 2020, pp. 84–93. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36841-8_8
15. Lyakhovich A. V., Semchenko I. V., Samofalov A. L., Podalov M. A., Sinitsyn G. V., Kravchenko A. Y., Khakhomov S. A. Terahertz Polarization-Resolved Spectra of the Metamaterial Formed by Optimally Shaped Omega Elements on a Silicon Substrate at Oblique Incidence of Waves. *Photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, art. ID 163. <https://doi.org/10.3390/photonics11020163>
16. Semchenko I., Khakhomov S., Podalov M., Samofalov A. Microwave polarization converter consisting of rectangular omega resonators located on a dielectric substrate. *2021 Fifteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, NYC. New York, 2021, pp. 386–388. <https://doi.org/10.1109/metamaterials52332.2021.9577110>

Информация об авторах

Подалов Максим Александрович – старший преподаватель кафедры общей физики, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (ул. Советская, 104, 246028, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: podalov@gsu.by. <https://orcid.org/0000-0001-9387-7853>

Семченко Игорь Валентинович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной деятельности, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (пр. Независимости, 68-1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: igor.semchenko@internet.ru <https://orcid.org/0000-0002-2438-0330>

Самофалов Андрей Леонидович – кандидат физико-математических наук, доцент, декан факультета физики и информационных технологий, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (ул. Советская, 104, 246028, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: 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. <https://orcid.org/0000-0001-7068-7061>

Information about the authors

Maxim A. Podalov – Senior Lecturer of the Department of General Physics, Francisk Skorina Gomel State University (104, Sovetskaya Str., 246028, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: podalov@gsu.by. <https://orcid.org/0000-0001-9387-7853>

Igor V. Semchenko – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Deputy Director General for Research, SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” (68-1, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igor.semchenko@internet.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2438-0330>

Andrey L. Samofalov – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dean of the Faculty of Physics and Information Technology, Francisk Skorina Gomel State University (104, Sovetskaya Str., 246028, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: 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. <https://orcid.org/0000-0001-7068-7061>