

Метаповерхность с функцией пропускающего кросс-поляризатора на основе одновитковых планарных спиралей

И.А. ФАНЯЕВ¹, А.Л. САМОФАЛОВ¹, А.Ю. КРАВЧЕНКО², И.В. СЕМЧЕНКО³, С.А. ХАХОМОВ¹

В работе предложена модель ультратонкого пропускающего кросс-поляризатора, состоящего из планарных одновитковых спиралей, поворачивающего плоскость поляризации прошедшей линейно поляризованной волны приблизительно на 90° вблизи резонансной частоты. С использованием численного моделирования проведена оптимизация элементов метаповерхности и найдено оптимальное расположение планарных спиралей в решетке. Приведены частотные зависимости основных коэффициентов, подтверждающие эффективность использования предложенной структуры в качестве пропускающего кросс-поляризатора. Коэффициент пропускания составил 0,8, эллиптичность не превышает 6° , а угол поворота составил 95° на резонансной частоте. Предлагаемая модель электрически тонкой метаповерхности с функцией кросс-поляризационного полного прохождения найдет применение в антенной и СВЧ технике.

Ключевые слова: метаповерхность, планарный элемент, кросс-поляризатор, коэффициент прохождения, эллиптичность.

In this work, we propose an ultrathin transmitting cross-polarizer based on planar single-turn spirals, which rotates the plane of polarization of the transmitted linearly polarized wave by approximately 90° near the resonant frequency. Using numerical modeling, the metasurface elements were optimized and the optimal arrangement of planar spirals in the lattice was found. The frequency dependences of the main coefficients are presented, confirming the effectiveness of using the proposed structure as a transmitting cross-polarizer. The transmittance was 0,8, the ellipticity did not exceed 6° , and the rotation angle was 95° at the resonant frequency. The proposed electrically thin metasurface with the function of cross-polarization full transmission will find application in antenna and microwave technology.

Keywords: metasurface, planar element, cross-polarizer, transmission coefficient, ellipticity.

Введение. Вращение поляризации электромагнитных волн играет важную роль во многих оптоэлектронных устройствах. Киральные метаматериалы, которые представляют собой разновидность метаматериалов, были предложены в качестве альтернативного пути реализации отрицательного показателя преломления [1]–[3], а также используются для достижения сильного вращения поляризации. При использовании обычных материалов возможно поворачивать плоскость поляризации линейно поляризованной электромагнитной волны на фиксированный угол с единичным коэффициентом прохождения, но для этого обычно требуется значительная толщина образца. В классической оптике хорошо известны, например, естественные гиротропные среды, магнитоактивные среды с эффектом Фарадея, холестерические жидкие кристаллы, одноосные и двуосные кристаллы [4], [5]. В литературе известно большое разнообразие преобразователей поляризации для различных применений [6], таких как создание селективности по круговой поляризации и циркулярного дихроизма [7], вращение поляризации плоской волны с линейной поляризацией [8] и преобразование линейной поляризации в круговую [9].

В метаматериалах, в сравнении с обычными средами, вращение плоскости поляризации можно осуществить для образцов малой толщины. Однако стоит отметить, что вращение поляризации киральными метаматериалами может меняться только лишь при наклонном падении [10] или вращение поляризации на один и тот же угол невозможно получить без изменения геометрических параметров подложки при изменении ее диэлектрической проницаемости. Поэтому реализация вращателя поляризации, который не зависит от углов падения или может реализовать постоянный угол вращения поляризации для различной диэлектрической проницаемости подложки, по-прежнему остается актуальной задачей.

Одним из устройств, которые вращают плоскость поляризации линейно поляризованной падающей волны на 90° при прохождении волны, является кросс-поляризатор прошедшей волны. Это устройство преобразует поляризацию, в которой поперечная электрическая (ТЕ) поляризованная волна преобразуется в поперечную магнитную (ТМ) поляризованную волну и наоборот [11], [12]. Как правило, эти структуры имеют толщину, сравнимую с рабочей длиной

волны, что является важным недостатком для их применения для СВЧ частот. Этот недостаток можно преодолеть, используя типичные киральные трехслойные метаповерхности, которые имеют электрически тонкую толщину (намного меньшую, чем рабочая длина волны) и обладают сильной оптической активностью в СВЧ диапазоне [10], [13], [14]. Тем не менее, подобные трехслойные конструкции не лишены недостатков, к которым можно отнести следующие: зависимость от поляризации падающей волны, неединичный коэффициент прохождения, расщепление резонансной полосы и непрозрачность вне резонанса [15]. Также в литературе предлагаются другие метаповерхности, некоторые недостатки которых удалось преодолеть [16]–[20].

В данной работе предлагается ультратонкий пропускающий кросс-поляризатор, основанный на планарных одновитковых спиральях, поворачивающий плоскость поляризации прошедшей линейно поляризованной волны на 90° относительно падающей волны на резонансной частоте. Вне резонанса он является прозрачным в широкой полосе частот. Предлагаемая электрически тонкая метаповерхность с указанной выше функцией может найти достаточно много применений в антенной и СВЧ технике.

Условия для получения кросс-поляризатора. Для реализации пропускающего кросс-поляризатора необходимо достижение баланса электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаповерхности. В качестве элемента метаповерхности мы рассматриваем одновитковую планарную спираль (рисунок 1). 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 [21].



Рисунок 1 – Вид одновитковой планарной спирали с указанием параметров

Рассмотрим уравнения, описывающие поля пропускающего кросс-поляризатора, поворачивающего плоскость поляризации прошедшей волны на 90° на резонансной частоте. Оптимальное расположение планарных спиралей для данного преобразования поляризации может быть найдено, если известна требуемая ориентация электрического и магнитного дипольных моментов в элементарной ячейке. Для достижения полной кросс-поляризованной способности прохождения падающей волны ($|T_{yx}|^2 = |E_t^y/E_0|^2 = 1$) компоненты отраженных и прошедших полей должны быть равны:

$$E_r^x = 0, \quad E_t^x = 0, \quad E_r^y = 0, \quad E_t^y = E_0 e^{j\phi_t^{cr}}. \quad (1)$$

Здесь ϕ_t^{cr} – начальная фаза прошедшей волны.

На метаповерхность падает линейно поляризованная плоская волна, распространяющаяся в направлении, задаваемом единичным вектором $-\vec{z}_0$, со следующим состоянием поляризации:

$$\vec{E}_{inc} = E_0 \vec{x}_0, \quad \vec{H}_{inc} = -\frac{E_0}{\eta_0} \vec{y}_0. \quad (2)$$

Здесь $\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0$ – орты системы координат, E_0 – амплитуда волны.

С учетом поляризации падающей волны (2) компоненты отраженного $E_r^{x,y}$ и прошедшего $E_t^{x,y}$ полей могут быть найдены из уравнений, представленных в [22].

Конечные условия для пропуска кросс-поляризованной волны, основанные на индивидуальных электрических и магнитных дипольных моментах, записываются следующим образом:

$$0 = \frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_x - \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \quad (3)$$

$$0 = E_0 - \frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_x + \frac{1}{c} \hat{m}_y \right), \quad (4)$$

$$0 = -\frac{j\omega_0}{2S} \left(\hat{p}_y + \frac{1}{c} \hat{m}_x \right), \quad (5)$$

$$E_0 e^{j\phi_t^{cr}} = -\frac{j\omega\eta_0}{2S} \left(\hat{p}_y - \frac{1}{c} \hat{m}_x \right). \quad (6)$$

Отсюда следует, что

$$\hat{p}_x = \frac{1}{c} \hat{m}_y, \quad (7)$$

$$\frac{2SE_0}{j\omega_0} = \hat{p}_x + \frac{1}{c} \hat{m}_y, \quad (8)$$

$$\hat{p}_y = -\frac{1}{c} \hat{m}_x, \quad (9)$$

$$\frac{2SE_0 e^{j\phi_t^{cr}}}{j\omega_0} = -\left(\hat{p}_y - \frac{1}{c} \hat{m}_x \right). \quad (10)$$

Подставляя уравнение (7) в (8) и (9) в (10), получаем конечные условия

$$\hat{p}_x = \frac{1}{c} \hat{m}_y = -j \frac{SE_0}{\omega\eta_0}, \quad (11)$$

$$\hat{p}_y = -\frac{1}{c} \hat{m}_x = j \frac{SE_0}{\omega\eta_0} e^{j\phi_t^{cr}}. \quad (12)$$

Для количественных характеристик преобразования поляризации необходимо учитывать угол поворота поляризации (θ) и эллиптичность (ψ) прошедшей волны. Эти параметры могут быть выражены следующим образом [23]:

$$\theta = \frac{1}{2} [\arg(T_{co} + jT_{cr}) - \arg(T_{co} - jT_{cr})], \quad (13)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{|T_{co} + jT_{cr}|^2 - |T_{co} - jT_{cr}|^2}{|T_{co} + jT_{cr}|^2 + |T_{co} - jT_{cr}|^2} \right). \quad (14)$$

где T_{co} – коэффициент со-поляризованного прохождения, T_{cr} – коэффициент кросс-поляризованного прохождения.

Из условий (7)–(12) следует, что x-составляющая электрического момента должна быть равна y-составляющей магнитного момента, а остальные компоненты должны иметь разные знаки. Такая ориентация дипольных моментов должна приводить к повороту поляризации прошедших волн на 90° с коэффициентом прохождения, равным единице.

Полученные условия (11) и (12) показывают необходимую ориентацию и значения составляющих электрического и магнитного дипольных моментов. Данные условия могут быть выполнены при использовании двух ортогональных спиралей с одинаковой киральностью, т. е. достаточным является использование или левозакрученных, или правозакрученных планарных спиралей. При этом для достижения симметричных свойств ячейки метаматериала в ней должно быть четыре спирали, все правозакрученные или левозакрученные, ориентированные относительно обеих координатных осей в плоскости метаповерхности. Это условие может быть применено к любым метаповерхностям с субволновыми поляризованными включениями для достижения требуемых кросс-поляризованных коэффициентов пропускания.

Моделирование одиночной планарной спирали. Структурные параметры одновитковой планарной спирали подбирались таким образом, чтобы обеспечить сбалансированное возбуждение электрического и магнитного дипольных моментов (электромагнитный баланс) в метаповерхности. Это привело к сбалансированному электромагнитному отклику на возбуждение линейно поляризованной плоской волной и повороту плоскости поляризации прошедшей волны на угол, близкий к 90° .

В качестве диэлектрика взят материал Taconic TLY толщиной 3,175 мм с двусторонним медным фольгированием, толщиной 35 мкм, относительной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 2,2$) и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,0009.

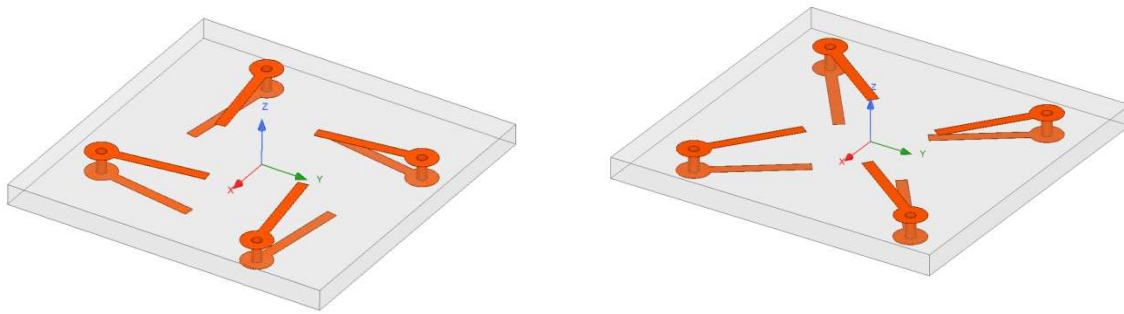
Численные значения оптимизированных параметров приведены в таблице 1, здесь β – угол между металлическими полосками на двух сторонах печатной платы, a – длина полоски, измеряемая от центра отверстия в плате, r – радиус отверстия с металлизированными стенками, w – ширина металлической полоски, l – расстояние между планарными спиральями в ячейке. Вид планарной спирали с указанными параметрами приведен на рисунке 1.

Таблица 1 – Значения параметров пропускающего кросс-поляризатора для двух вариантов расположения спиралей

Параметр	β , град	a , мм	r , мм	w , мм	l , мм
Вариант 1	17	16,65	0,75	1,6	11
Вариант 2	17	16,72	0,75	1,6	17,4

Оптимизация основных параметров модели метаповерхности для получения кросс-поляризационного полного прохождения в СВЧ диапазоне. На данном этапе, путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов, проведен численный расчет оптимального расположения планарных элементов в решетке для получения кросс-поляризационного полного прохождения при отсутствии отражения и поглощения электромагнитных волн.

Численный расчет структурных параметров планарной спирали и всего пропускающего кросс-поляризатора проведен с учетом технических возможностей технологий изготовления печатных плат и доступных в Республике Беларусь материалов. На рисунке 2 показаны два варианта расположения планарных одновитковых спиралей с одинаковой киральностью в элементарной ячейке пропускающего кросс-поляризатора.



Вариант 1

(оси планарных спиралей параллельны сторонам ячейки)

Вариант 2

(оси планарных спиралей параллельны диагоналям ячейки)

Рисунок 2 – Варианты расположения планарных одновитковых спиралей с одинаковой киральностью в элементарной ячейке пропускающего кросс-поляризатора

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.

На рисунке 3 приведен график частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения (R_{co}) и прохождения (T_{co}), коэффициентов кросс-поляризованного отражения (R_{cr}) и прохождения (T_{cr}), а также поглощения (A) для рассматриваемой метаповерхности.

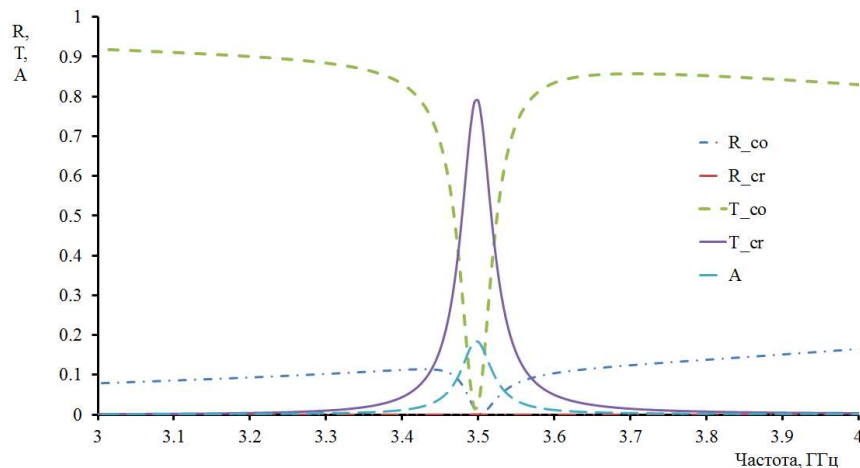


Рисунок 3 – График частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения (R_{co}) и прохождения (T_{co}), коэффициентов кросс-поляризованного отражения (R_{cr}) и прохождения (T_{cr}) пропускающего кросс-поляризатора на подложке Taconic TLY

Анализ графика показывает, что с использованием диэлектрика Taconic TLY коэффициент кросс-поляризованного прохождения (T_{cr}) принимает значения, близкие к 0,8 на резонансной частоте при двух вариантах расположения спиралей, при этом коэффициент со-

поляризованного прохождения (T_{co}) в обоих случаях практически равен нулю, что говорит о повороте плоскости поляризации прошедшей электромагнитной волны на 90° . Также из графика следует, что на резонансе происходит поглощение, приблизительно равное 20 %, это связано с потерями в проводнике (медь) и самом диэлектрике, при этом коэффициент отражения приблизительно равен нулю. Кроме того, использование одновитковых планарных спиралей с оптимизированными параметрами и электромагнитным балансом обеспечило высокоэффективное преобразование поляризации с широкополосным низким отражением во всем исследуемом диапазоне вблизи резонансной частоты.

На рисунке 4 показана частотная зависимость коэффициента эллиптичности (ψ) и угла поворота плоскости поляризации (θ) прошедшей волны для метаповерхности на исследуемой диэлектрической подложке. Данный график подтверждает вращение плоскости поляризации прошедшей волны на угол, близкий к 90° , и эффективность предложенных вариантов метаповерхностей для использования их в качестве пропускающего кросс-поляризатора.

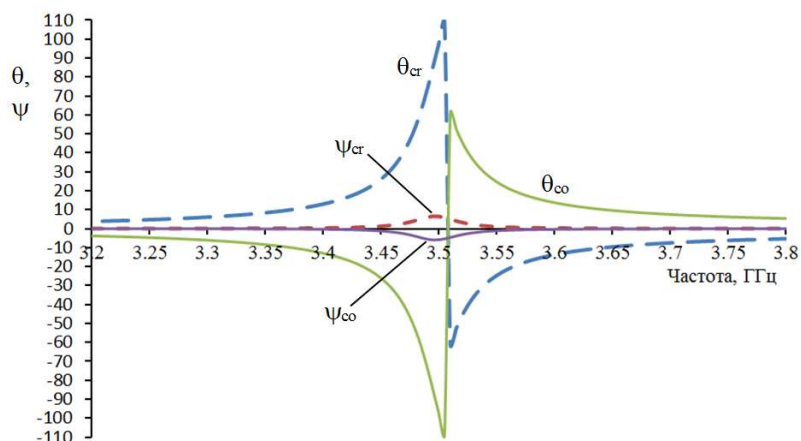


Рисунок 4 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности прошедшей волны и угла поворота плоскости поляризации прошедшей волны

Преобразование линейно поляризованной падающей волны в кросс-поляризованное состояние соответствует случаю, когда эллиптичность прошедшей волны равна нулю, а её плоскость поляризации имеет угол поворота 90° .

Заключение. Проведено численное моделирование с использованием метода конечных элементов метаповерхности с найденным оптимальным расположением планарных одновитковых спиралей в решетке для получения функции кросс-поляризационного полного прохождения при отсутствии отражения и поглощения электромагнитных волн. Численный расчет структурных параметров планарной спирали и всего пропускающего кросс-поляризатора проведен с учетом технических возможностей технологий изготовления печатных плат и доступных в Республике Беларусь материалов. В качестве диэлектрика рассмотрен материал Taconic TLY. Для двух вариантов расположения планарных одновитковых спиралей с одинаковой киральностью в элементарной ячейке и двух диэлектриков найдены численные значения геометрических параметров метаматериала и построены графические зависимости, подтверждающие эффективность использования предложенной структуры в качестве пропускающего кросс-поляризатора. Коэффициент пропускания составил 0,8, эллиптичность не превышает 6° , а угол поворота плоскости поляризации составил примерно $\theta \approx 95^\circ$. Предлагаемая электрически тонкая метаповерхность с функцией кросс-поляризационного полного прохождения может найти применение в антенной и СВЧ технике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты Ф22КИТГ-021 и Ф23КИ-027.

Литература

1. Zhang, S. Negative refractive index in chiral metamaterials / S. Zhang [et al.] // Physical review letters. – 2009. – Vol. 102, № 2. – P. 023901.

2. Zhou, J. Negative refractive index due to chirality / J. Zhou [et al.] // *Physical Review B*. – 2009. – Vol. 79, № 12. – P. 121104.
3. Li, Z. Composite chiral metamaterials with negative refractive index and high values of the figure of merit / Z. Li [et al.] // *Optics express*. – 2012. – Vol. 20, № 6. – P. 6146–6156.
4. Saleh, B. E. Fundamentals of photonics / B. E. Saleh, M. C. Teich, B. E. Saleh. – New York : Wiley, 1991. – 250 p.
5. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
6. Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах / И. В. Семченко, С. А. Хахомов. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 279 с.
7. Tarn, I. Y. A new advance in circular polarization selective surface—A three layered CPSS without vertical conductive segments / I. Y. Tarn, S. J. Chung // *IEEE transactions on antennas and propagation*. – 2007. – Vol. 55, № 2. – P. 460–467.
8. Ye, Y. 90° polarization rotator using a bilayered chiral metamaterial with giant optical activity / Y. Ye, S. He // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 96, – № 20. – P. 1–12.
9. Doumanis, E. Anisotropic impedance surfaces for linear to circular polarization conversion / E. Doumanis [et al.] // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2011. – Vol. 60, № 1. – P. 212–219.
10. Plum, E. Optical activity in extrinsically chiral metamaterial / E. Plum, V. A. Fedotov, N. I. Zheludev // *Applied physics letters*. – 2008. – Vol. 93, № 19. – P. 1–16.
11. Niemi, T. Synthesis of polarization transformers / T. Niemi, A. O. Karilainen, S. A. Tretyakov // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2013. – Vol. 61, № 6. – P. 3102–3111.
12. Euler, M. RCS control using cascaded circularly polarized frequency selective surfaces and an AMC structure as a switchable twist polarizer / M. Euler, V. F. Fusco // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2010. – Vol. 52, № 3. – P. 577–580.
13. Li, T. Q. Magnetic resonance hybridization and optical activity of microwaves in a chiral metamaterial / T. Q. Li [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92, № 13. – P. 131111–131111-3.
14. Plum, E. Metamaterial with negative index due to chirality / E. Plum [et al.] // *Physical Review B*. – 2009. – Vol. 79, № 3. – P. 035407.
15. Song, K. 90° polarization rotator with rotation angle independent of substrate permittivity and incident angles using a composite chiral metamaterial / K. Song [et al.] // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, № 6. – P. 7439–7446.
16. Semchenko, I. V. Radiation of circularly polarized microwaves by a plane periodic structure of Ω elements / I. V. Semchenko [et al.] // *J. Commun. Technol. Electron*. – 2007. – Vol. 52. – P. 1002–1005.
17. 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.
18. Semchenko, I. V. Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties / I. V. Semchenko [et al.] // *Electromagnetics*. – 2001. – Vol. 21 (5). – P. 401–414.
19. Mutlu, M. A transparent 90 polarization rotator by combining chirality and electromagnetic wave tunneling / M. Mutlu, E. Ozbay // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 100, № 5. – DOI : 10.1063/1.3682591.
20. Semchenko, I. V. Transformation of the polarization of electromagnetic waves by helical radiators / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2007. – Vol. 52, № 8. – P. 850–855.
21. Asadchy, V. S. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer / V. S. Asadchy [et al.] // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2014. – V. 12, № 4. – P. 298–304.
22. Faniayeu, I. Polarization control with helical metasurfaces / I. Faniayeu, V. Asadchy, I. Fanyayev // *Crystals*. – 2020. – Vol. 10, № 9. – P. 726.
23. Cuesta, F. S. Planar broadband Huygens metasurfaces for wave manipulations / F. S. Cuesta // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2018. – Vol. 66 (12). – P. 7117–7127.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²БелНИПИнефть, ПО Белоруснефть

³ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Поступила в редакцию 31.10.2023