

УДК 537.876:621.3.09

## Расчет параметров метаматериала для получения кросс-поляризационного полного отражения при отсутствии прохождения и поглощения электромагнитных волн

С.А. ХАХОМОВ<sup>1</sup>, А.Л. САМОФАЛОВ<sup>1</sup>, И.А. ФАНЯЕВ<sup>1</sup>, И.В. СЕМЧЕНКО<sup>1,2</sup>, А.А. ТИМОШЕНКО<sup>1</sup>

В работе проведено компьютерное моделирование и оптимизация параметров метаматериала для получения кросс-поляризационного полного отражения при отсутствии прохождения и поглощения электромагнитных волн. Показано, что для получения кросс-поляризационного отражения в метаматериале, в котором при этом коэффициенты прохождения и поглощения на резонансной частоте должны равняться нулю, т. е. метаматериал должен не пропускать и не поглощать электромагнитные волны во всем исследуемом диапазоне частот, необходимо получить эквивалентный электромагнитный отклик ячейки метаматериала. Достичь желаемых свойств позволяет баланс электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаматериала.

**Ключевые слова:** метаматериал, кросс-поляризатор, планарный элемент, отражение, поглощение.

The paper presents computer modeling and optimization of metamaterial parameters to obtain a cross-polarizing total reflection in the absence of transmission and absorption of electromagnetic waves. It is shown that in order to obtain a cross-polarizing reflection in a metamaterial, in which the transmission and absorption coefficients at the resonant frequency should be zero, i. e. the metamaterial should not transmit or absorb electromagnetic waves throughout the studied frequency range, it is necessary to obtain an equivalent electromagnetic response of a metamaterial cell. The balance of the electric dipole and magnetic moments of a separate element of the metamaterial makes it possible to achieve the desired properties.

**Keywords:** metamaterial, cross-polarizer, planar element, reflection, absorption.

**Введение.** Кросс-поляризационный отражатель (рефлектор) представляет собой устройство, вращающее плоскость поляризации отраженной волны ровно на  $90^\circ$  относительно падающей линейно-поляризованной плоской волны, при этом коэффициенты прохождения и поглощения такого устройства на резонансной частоте должны равняться нулю.

Для получения кросс-поляризационного отражения в метаматериале, в котором при этом коэффициенты прохождения и поглощения на резонансной частоте должны равняться нулю, т. е. метаматериал должен не пропускать и не поглощать электромагнитные волны во всем исследуемом диапазоне частот, необходимо получить эквивалентный электромагнитный отклик ячейки метаматериала. Достичь желаемых свойств позволяет баланс электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаматериала. В качестве элемента метаматериала мы рассматриваем одновитковую планарную спираль. Под действием падающей плоской электромагнитной волны в такой одновитковой планарной спирали индуцируются дипольные моменты, которые можно выразить через компоненты тензоров электрических, магнитных, электромагнитных и магнитоэлектрических поляризуемостей. Равные по абсолютной величине амплитуды этих поляризуемостей означают сбалансированный отклик от такого микро-резонатора.

**Моделирование параметров одиночной планарной спирали.** Для достижения сбалансированного электромагнитного отклика (равенства амплитуд поляризуемостей в резонансе) от спирального микро-резонатора было проведено численное моделирование одновитковой планарной спирали в вакууме, с учетом частотного сдвига от 3 ГГц, обусловленного наличием планируемого диэлектрика, при этом все структурные параметры планарной спирали оптимизированы. Данная методика подробно описана в работах [1]–[2]. В статье [3] предложена аналогичная планарная спираль, состоящая из двух витков.

Расчет структурных параметров одновитковой планарной спирали и всего кросс-поляризационного рефлектора проведен с учетом технических возможностей технологий изготовления печатных плат и доступных в Республике Беларусь материалов. В качестве ди-

электрика взяты два материала с двусторонним медным фольгированием, относительно невысокой стоимостью и соответствующими нашим расчетам относительной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) и тангенсом угла диэлектрических потерь (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Параметры используемых материалов

Материал	Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ )	Тангенс угла диэлектрических потерь	Толщина металлического основания (t), мкм	Толщина ядра (h), мм
Arlon AD255C	2,55	0,0014	35	3,175
Taconic TLY	2,2	0,0009	35	3,175

На рисунке 1 показаны зависимости вычисленных осевых компонент тензоров электрической ( $\alpha_{ee}^{yy}$ ), магнитной ( $\alpha_{mm}^{yy}$ ), электромагнитной ( $\alpha_{em}^{yy}$ ) и магнитоэлектрической ( $\alpha_{me}^{yy}$ ) поляризуемостей одновитковой планарной спирали, нормированных на импеданс свободного пространства ( $\eta_0$ ) в исследуемом частотном диапазоне, с учетом частотного сдвига, обусловленного значением диэлектрической проницаемости используемых диэлектриков: Arlon AD255C и Taconic TLY. Мы используем термин «осевые компоненты», поскольку координатная ось OY направлена вдоль оси планарной спирали.

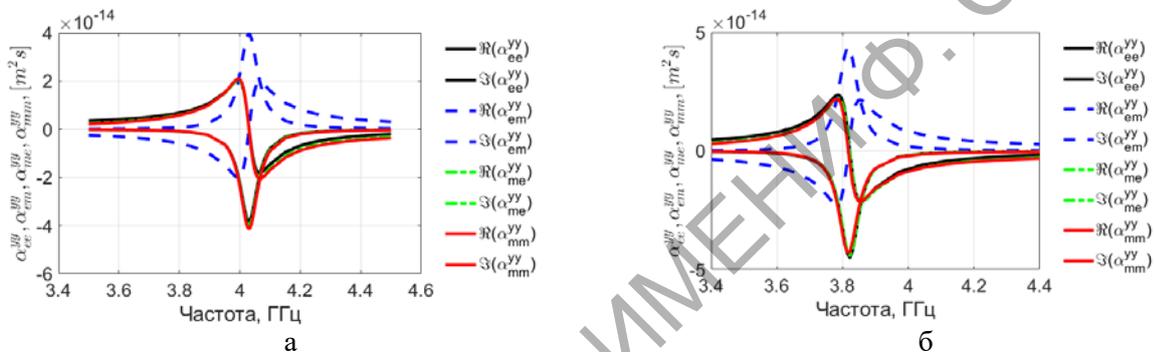


Рисунок 1 – Частотная зависимость осевых компонент тензоров поляризуемостей одновитковой планарной спирали, нормированных на импеданс свободного пространства с учетом частотного сдвига, обусловленного значением диэлектрической проницаемости диэлектрика Arlon AD255C (а) и Taconic TLY (б)

Из графиков на рисунке 1 следует, что все осевые компоненты тензоров поляризуемостей одновитковой планарной спирали приблизительно равны друг другу по абсолютной величине на резонансной частоте, что свидетельствует о сбалансированном электромагнитном отклике такой спирали на возбуждение линейно поляризованной плоской волной.

**Моделирование параметров кросс-поляризационного отражателя.** На рисунке 2 показана элементарная ячейка кросс-поляризационного отражателя на основе планарных одновитковых спиралей для микроволнового диапазона частот. Элементарная ячейка метаповерхности состоит из левосторонних и правосторонних проводящих планарных спиралей, расположенных на диэлектрической подложке. Структурные параметры спиралей адаптированы к балансу их индивидуальных поляризуемостей.

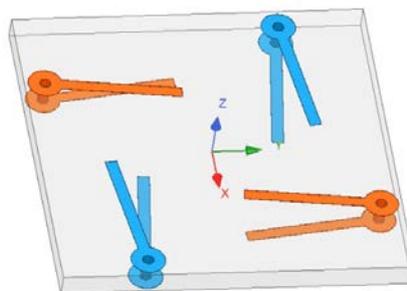


Рисунок 2 – Элементарная ячейка метаматериала, состоящего из сбалансированных одновитковых планарных спиралей на диэлектрической подложке. Синим цветом показаны спирали с левосторонним закручиванием, оранжевым цветом – спирали с правосторонним закручиванием

Изменяя параметры структурного элемента метаматериала (элементарной ячейки), добились, для ячейки в целом, равенства как действительных, так и мнимых частей компонент электрического и магнитного дипольного моментов на резонансной частоте (3 ГГц), то есть баланса такой ячейки.

Таким образом, получены параметры метаматериала, состоящего из одновитковых планарных спиралей (рисунок 3), обладающего функцией кросс-поляризационного отражения на резонансной частоте. Численные значения рассчитанных параметров приведены в таблицах 2 и 3, где  $l$  – расстояние между планарными спиральями.

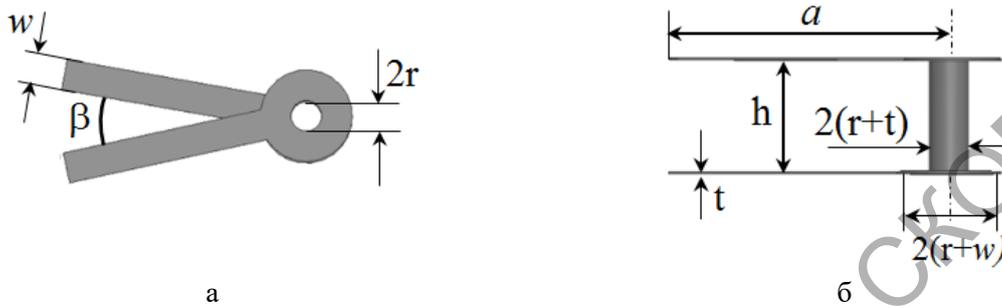


Рисунок 3 – Параметры одновитковой планарной спирали: а – вид сверху, б – вид сбоку

Таблица 2 – Значения параметров кросс-поляризационного отражателя на подложке Arlon AD255C

Параметр	$\beta$ , град	$a$ , мм	$r$ , мм	$w$ , мм	$l$ , мм
Значение	15	18,5	0,75	1,6	12

Таблица 3 – Значения параметров кросс-поляризационного отражателя на подложке Taconic TLY

Параметр	$\beta$ , град	$a$ , мм	$r$ , мм	$w$ , мм	$l$ , мм
Значение	15	19,6	0,75	1,7	12

На рисунке 4 приведены графики частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения ( $R_{co}$ ) и прохождения ( $T_{co}$ ), коэффициентов кросс-поляризованного отражения ( $R_{cr}$ ), прохождения ( $T_{cr}$ ) для рассматриваемого метаматериала.

Полные значения коэффициентов отражения ( $R$ ), прохождения ( $T$ ) и поглощения ( $A$ ) могут быть выражены как:  $R = R_{co} + R_{cr}$ ,  $T = T_{co} + T_{cr}$ ,  $A = 1 - R_{co} - R_{cr} - T_{co} - T_{cr}$ .

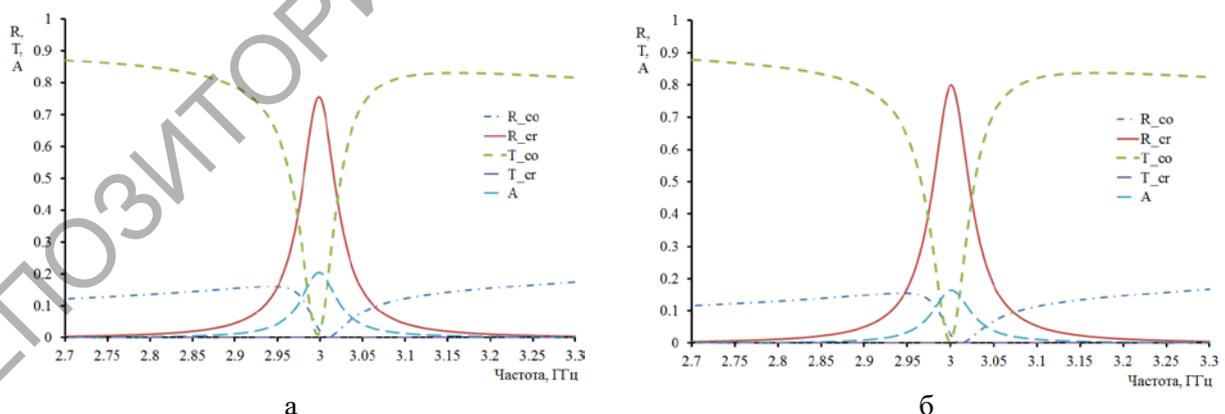


Рисунок 4 – Графики частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения ( $R_{co}$ ) и прохождения ( $T_{co}$ ), коэффициентов кросс-поляризованного отражения ( $R_{cr}$ ), прохождения ( $T_{cr}$ ) кросс-поляризационного отражателя в случае медных полосок на подложке Arlon AD255C (а) и на подложке Taconic TLY (б)

Анализ графиков на рисунке 4 показывает, что для обоих диэлектриков коэффициент кросс-поляризованного отражения ( $R_{cr}$ ) принимает значения, близкие к 0,8 на резонансной час-

тоте, при этом коэффициент со-поляризованного отражения ( $R_{co}$ ) практически равен нулю, что говорит о повороте плоскости поляризации отраженной электромагнитной волны на  $90^\circ$ . На графиках видно, что в резонансе коэффициент прохождения равен нулю, но при этом наблюдается поглощение электромагнитной волны на 20,4 % на подложке Arlon AD255C и 16,5 % на подложке Taconic TLY. Поглощение связано с потерями в проводнике (медь) и самом диэлектрике.

Для анализа потерь энергии на рисунке 5 приведены графики частотной зависимости коэффициентов отражения, прохождения и поглощения метаматериала для случая идеальный проводник (PEC) – диэлектрик.

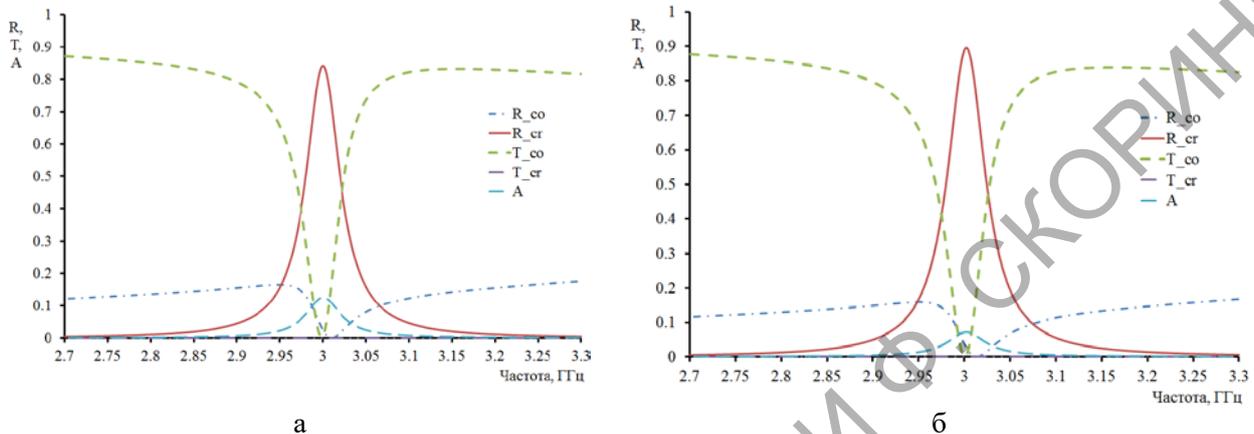


Рисунок 5 – Графики частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения ( $R_{co}$ ) и прохождения ( $T_{co}$ ), коэффициентов кросс-поляризованного отражения ( $R_{cr}$ ), прохождения ( $T_{cr}$ ) кросс-поляризованного отражателя для случая идеальный проводник (PEC) – Arlon AD255C (а) и для случая идеальный проводник (PEC) – Taconic TLY (б)

Анализ графиков на рисунках 4а и 5а позволяет сделать вывод о причинах поглощения в метаматериале на подложке Arlon AD255C: 12,4 % потерь от интенсивности падающей волны составляет поглощение в диэлектрике Arlon AD255C и 8 % в медном проводнике, а анализ графиков на рисунках 4б и 5б позволяет сделать вывод о причинах поглощения в метаматериале на подложке Taconic TLY: 7,2 % потерь от интенсивности падающей волны составляет поглощение в диэлектрике Taconic TLY и 9,3 % в медном проводнике.

На рисунке 6 показана частотная зависимость коэффициента эллиптичности ( $\psi$ ) и угла поворота плоскости поляризации отраженной волны ( $\theta$ ) для двух исследуемых диэлектрических подложек. Расчет данных параметров проводился согласно методике, описанной в работе [3]. Как видно из рисунков 6а и 6б, угол поворота плоскости поляризации отраженной волны ниже резонансной частоты равен  $85,3$  и  $86,8$  градуса, выше резонансной частоты плоскость поляризации отраженной волны поворачивается в противоположную сторону на  $93,8$  и  $93$  градуса. Коэффициент эллиптичности отражённой волны для обеих диэлектрических подложек вблизи резонанса имеет значения, близкие к нулю, то есть поляризация отражённой волны является практически линейной. Рассчитанные значения угла поворота поляризации и эллиптичности отражённой волны соответствуют ожидаемым значениям, что показывает эффективность предложенных кросс-поляризационных рефлекторов.

**Заключение.** В результате проведенных исследований рассчитаны параметры одиночного планарного элемента метаматериала на резонансной частоте для получения кросс-поляризационного полного отражения при отсутствии прохождения и поглощения электромагнитных волн. Показано, что для получения кросс-поляризационного отражения в метаматериале необходимо получить эквивалентный электромагнитный отклик ячейки метаматериала. Достичь желаемых свойств позволяет баланс электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаматериала.

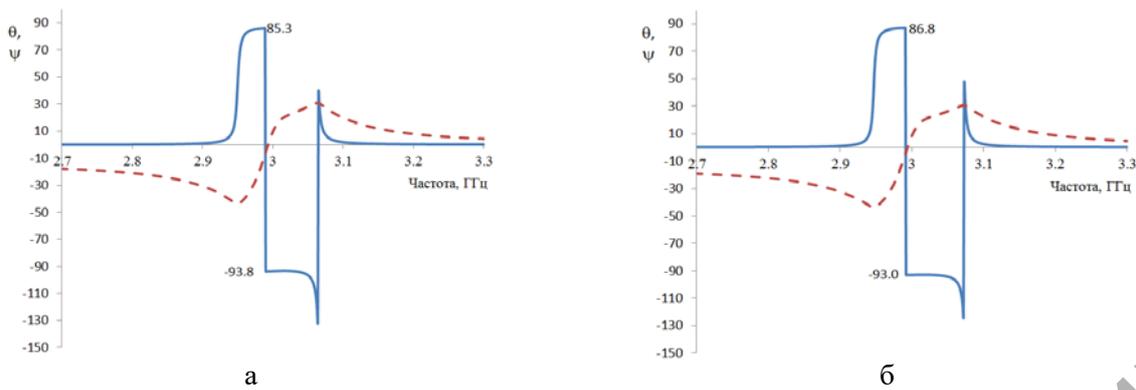


Рисунок 6 – Графики частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны ( $\psi$  – штриховая линия) и угла поворота плоскости поляризации отраженной волны ( $\theta$  – сплошная линия) в случае медных планарных спиралей на подложке Arlon AD255C (а) и на подложке Taconic TLY (б)

Для достижения сбалансированного электромагнитного отклика (равенство амплитуд поляризуемостей на резонансной частоте) от одиночного планарного элемента метаматериала проведено численное моделирование такого микро-резонатора в вакууме, с учетом частотного сдвига резонанса при наличии диэлектрика (Arlon AD255C и Taconic TLY), при этом все структурные параметры одиночной планарной спирали оптимизированы. Получены численные значения параметров метаматериала, состоящего из одновитковых планарных спиралей, обладающего функцией кросс-поляризационного отражения на резонансной частоте, для двух видов диэлектрической подложки. Проведен анализ причин поглощения в метаматериале на резонансной частоте.

Проведенные исследования позволят перейти к разработке теоретических основ новых типов преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред с включениями различной формы, изготовлению экспериментальных образцов новых искусственных метаматериалов [4]–[6].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты Ф22КИ-016, Ф22КИТГ-021.*

### Литература

1. Ishimaru, A. Generalized constitutive relations for meta materials based on the quasi-static Lorentz theory / A. Ishimaru, L. Seung-Woo, Y. Kuga, V. Jandhyala // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2003. – V. 51 – P. 2550–2557.
2. 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.
3. Planar broadband Huygens' metasurfaces for wave manipulations / F. S. Cuesta // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66 (12). – P. 7117–7127.
4. Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах : монография / И. В. Семченко, С. А. Хахомов. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 279 с.
5. Semchenko, I. Production and experimental study of a weakly reflecting absorbing metamaterial based on planar spirals in the microwave range / I. Semchenko [et. al.] // Research and Education: Traditions and Innovations : INTER-ACADEMIA 2021 / S. Khakhomov, I. Semchenko, O. Demidenko, D. Kovalenko (eds.). – Singapore : Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, 2022. – V. 422. – P. 261–269.
6. Semchenko, I. V. Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterial-substrate system with compensated chirality / I. V. Semchenko [et al.] // J. Appl. Phys. – 2017. – V. 121. – P. 015108.

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Поступила в редакцию 05.05.2023