

**А. Ю. Кравченко, И. В. Семченко,
А. Л. Самофалов, С. А. Хахомов**
УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПРОШЕДШЕЙ СВЧ ВОЛНЫ В БИАНИЗОТРОПНОМ МЕТАМАТЕРИАЛЕ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНЫХ СПИРАЛЕЙ

Бианизотропные структуры, в частности, гиротропные кристаллы, в течение длительного времени являлись объектом исследований Ф. И. Фёдорова, Б. В. Бокутя, А. Н. Сердюкова и учеников [1, 2]. В настоящее время эти исследования получили логическое продолжение в области метаматериалов. Например, в работе [3] 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 работе [4]. Каждая такая спираль состоит из четырёх металлических полосок, расположенных на двух сторонах печатной платы, по две полоски на каждой стороне, и трёх 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 свёрнутом состоянии, которое имеет место в печатной плате, значительно уступают длине волны, что позволяет рассматривать каждую спираль как малую бианизотропную частицу, поляризуемую как электрическим, так и магнитным полем. Метод вычисления поляризуемостей таких частиц был предложен в статье [5]. Важная задача заключается в определении оптимальной формы планарной спирали, при которой создаваемый метаматериал имеет равные значения диэлектрической и магнитная проницаемости. Несмотря на малую толщину печатной платы, каждая спираль является трёхмерным объектом, что позволяет магнитному полю падающей волны пронизывать витки спирали и возбуждать в ней ток. Одновременно электрическое поле падающей волны создаёт ток в металлических полосках на двух сторонах платы, следовательно, во всей спирали. Хотя печатная плата фактически состоит из трёх слоёв – двух проводящих поверхностей и подложки, однако её 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.

В представленной работе 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 правосторонних и левосторонних спиралей, то есть киральные свойства в нём компенсированы. В отличие от поглотителя волн, преобразователь поляризации должен содержать планарные спирали только одного направления закручивания, то есть обладать киральными свойствами.

Исследуемая ячейка состоит из правозакрученных двухвитковых планарных спиралей, представленных на рисунке 1. Параметры спирали подбираются таким образом, чтобы для них выполнялось условие главного частотного резонанса, определяемого по формуле (1). Резонанс такой структуры наблюдается на частоте около 2,2 ГГц.

В формуле (1) l – длина полоски планарной спирали на одной стороне печатной платы, h – толщина печатной платы, c – скорость света в вакууме, ν – частота СВЧ волны, ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости подложки:

$$4l + 3h \approx \frac{c}{2\nu\sqrt{\varepsilon\mu}}. \quad (1)$$

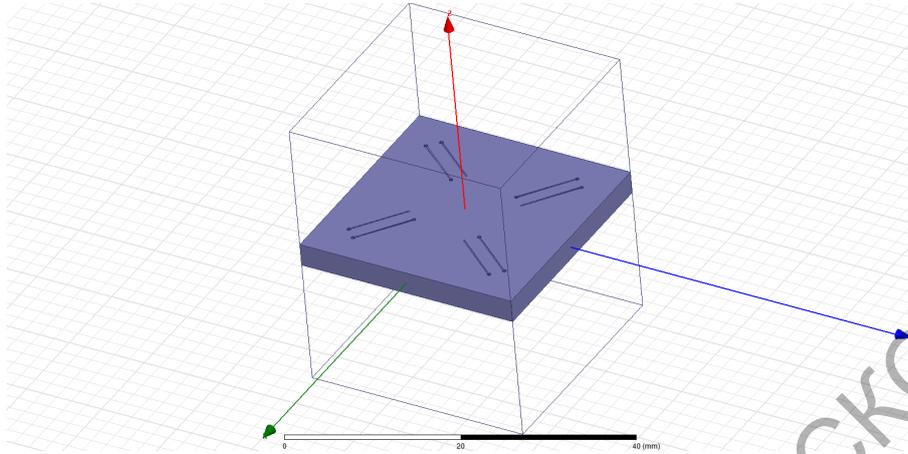


Рисунок 1 – Элементарная ячейка метаповерхности, состоящая из четырёх планарных спиралей с правосторонним закручиванием

Для нахождения угла поворота главной оси эллипса поляризации и эллиптичности прошедшей волны использовались соотношения (2) и (3) [4].

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

$$\psi = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{|T_{RCP}|^2 - |T_{LCP}|^2}{|T_{RCP}|^2 + |T_{LCP}|^2} \right), \quad (3)$$

где $T_{RCP} = T_{co} + jT_{cr}$ и $T_{LCP} = T_{co} - jT_{cr}$ – амплитудные коэффициенты прохождения право- и левоциркулярно поляризованных волн соответственно, j – мнимая единица, T_{co} и T_{cr} – амплитудные коэффициенты прохождения для волн, имеющих параллельную и поперечную поляризацию относительно падающей волны. Угол θ представляет собой угол между главной осью эллипса поляризации прошедшей волны и плоскостью поляризации падающей волны, а эллиптичность ψ характеризует поляризационное состояние прошедшей волны и изменяется в диапазоне от 0° для линейно поляризованной волны до $\pm 45^\circ$ для циркулярно поляризованной волны.

На основе проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. На резонансной частоте 2,2 ГГц найденная структура способна пропускать до 52,26% падающего излучения (рисунок 2). При этом

коэффициент отражения равен 4,34%, а коэффициент поглощения равен 43,41%.

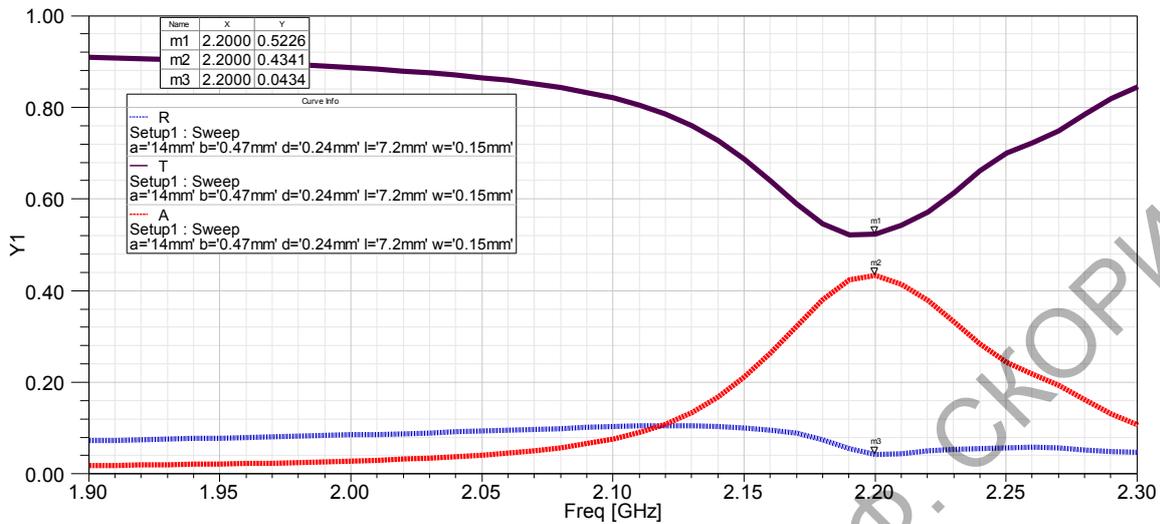


Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов поглощения, отражения и прохождения СВЧ волны от её частоты, рассчитанных для интенсивности волны

2. Эллиптичность прошедшей волны вблизи резонанса принимает значение $\psi=32,9^\circ$, что соответствует эллиптически поляризованной волне, близкой к циркулярно-поляризованной, а угол поворота главной оси её эллипса поляризации равен $\theta=4,1^\circ$ (рисунок 3).

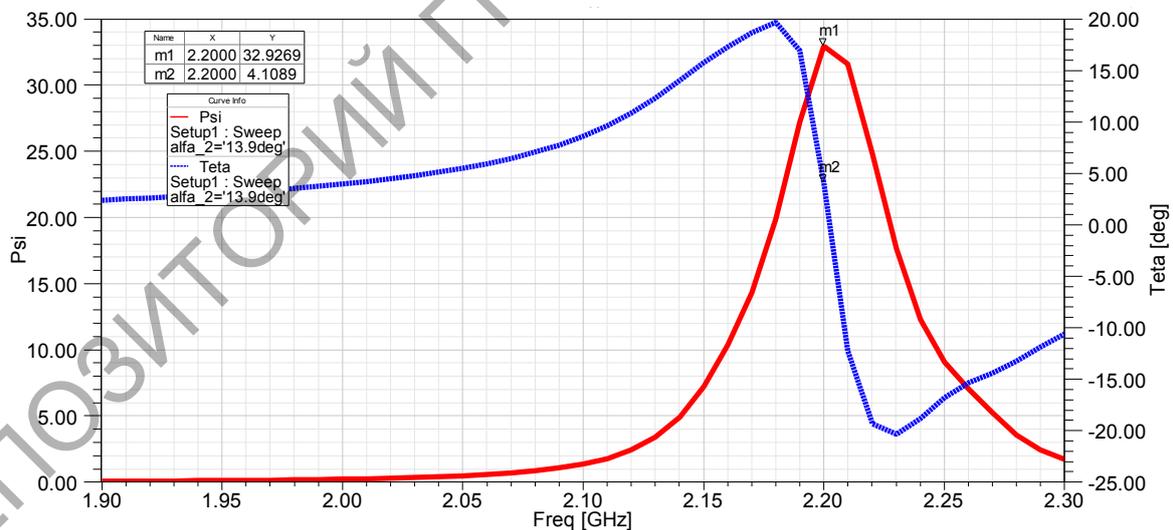


Рисунок 3 – Зависимость эллиптичности прошедшей волны и угла поворота главной оси эллипса поляризации от частоты

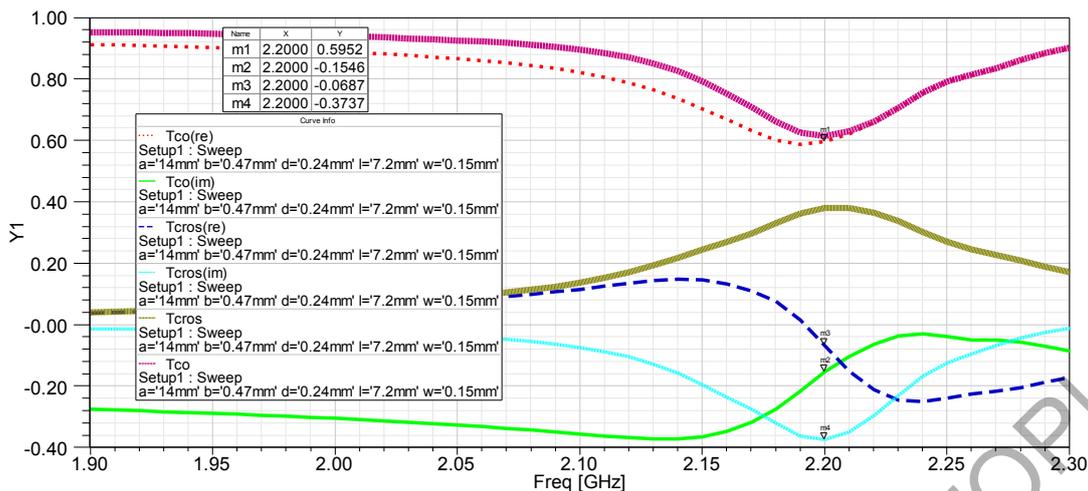


Рисунок 4 – Зависимость действительных и мнимых частей линейных компонент прошедшей волны от частоты при единичной амплитуде падающей волны

3. На рисунке 4 показаны действительные и мнимые части линейных компонент прошедшей волны, параллельных и перпендикулярных вектору поля падающей волны. При совместном использовании с формулами (2) и (3) данный рисунок подтверждает, что прошедшая волна является эллиптически поляризованной, близкой к волне с круговой поляризацией.

Литература

1. Фёдоров, Ф. И. Теория гиротропии / Ф. И. Фёдоров // Минск: Наука и техника, 1976. – 456 с.
2. Бокуть, Б. В. К феноменологической теории естественной оптической активности / Б. В. Бокуть, А. Н. Сердюков // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1971. – Т. 61, № 5. – С. 1808–1813.
3. Проектирование метаматериалов на основе планарных спиралей в СВЧ диапазоне / И. В. Семченко, А. Ю. Кравченко, А. Л. Самофалов, И. А. Фаняев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2020. – №3 (120). – С. 154–160.
4. Planar broadband Huygens' metasurfaces for wave manipulations / F. S. Cuesta, I. A. Faniayeu, V. S. Asadchy, S. A. Tretyakov // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66 (12). – P. 7117–7127.
5. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer / V. S. Asadchy, I. A. Faniayeu, Younes Ra'di,

S. A. Tretyakov // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. – 2014. – Vol. 12. – P. 298–304.