

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

**УО «Гомельский государственный университет  
имени Ф. Скорины», Беларусь**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНЫХ КИРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СТРУКТУР В СВЧ ДИАПАЗОНЕ**

В работе [1] на примере образца, разработанного авторским коллективом из Института физики полупроводников Сибирского отделения РАН, проведено численное моделирование киральных свойств искусственной анизотропной структуры, образованной микроспиралями. Показано, что такая искусственная периодическая структура может проявлять значительные киральные свойства в ТГц-диапазоне. Получены аналитические выражения для диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей структуры при условии сильных гиротропных свойств. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов. В итоге сделан вывод, что предложенная модель удовлетворительно описывает свойства искусственной структуры с большой киральностью.

Используя аналитическое выражение для киральной восприимчивости из статьи [1], проведем моделирование в СВЧ-диапазоне киральных свойств образца искусственной среды, состоящей из медных спиралей с параметрами:

$N_b = 1$ ,  $r = 6,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $\alpha = 35^\circ$ ,  $L = 0,05$  м,  $H = 0,0288$  м,  $d = 9 \cdot 10^{-4}$  м; где  $N_b$  – число витков спирали;  $r$  – радиус витка;  $\alpha$  – угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали;  $L$  – длина медной проволоки (соответствует условию главного частотного резонанса, при котором длина спирали равна половине длины волны электромагнитного поля);  $H$  – высота спирали (в данном случае, для одновитковой спирали, она равна шагу спирали);  $d$  – диаметр медной проволоки.

Зависимость параметра киральности  $k'$  от частоты для среды с сильными киральными свойствами, с учетом его частотной дисперсии имеет вид [1]:

$$\kappa' = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} B \frac{\omega_0^2 - \omega^2 - j\omega \tilde{A}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \tilde{A}^2} \left( 1 + \frac{q\omega r^2}{2} \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \kappa \right),$$

где

$$\frac{1}{A} = \frac{2Ne^2}{\pi m_e} \frac{\tau}{r^2 q^2 + 1}, \quad B = \frac{r^2 q}{2} \omega, \quad \tilde{A} = \frac{\rho N_0 N_s e^2}{m_e},$$

$$N = N_0 N_s N_h V_h, \quad V_h = \pi r_0^2 L.$$

$$\tau = j \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{\rho}{\pi r^2 S_{\text{ш}} \sin \alpha} \alpha_{me}, \quad N_s = \frac{2\Delta}{r_0}, \quad \Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}}.$$

$e$  – заряд электрона,  $m_e$  – масса электрона,  $r$  – радиус спирали,  $q$  – удельное кручение спирали,  $\omega$  – частота падающего излучения,  $\rho$  – удельное сопротивление металла,  $N_0$  – объемная концентрация электронов проводимости в металле,  $N_s$  – доля скин-слоя в объеме спирали,  $r_0$  – радиус проволоки,  $N_h$  – концентрация спиралей,  $V_h$  – объем проволоки, из которого изготовлена одна спираль,  $\tau$  – коэффициент ослабления поля внутри металла,  $S_{\text{ш}}$  – площадь сечения проводника,  $\alpha$  – угол подъема спирали.  $\alpha_{me}$  – магнитоэлектрическая восприимчивость, используемая в материальных уравнениях для отдельной спирали:

$$\mathbf{p} = \varepsilon_0 \alpha_{ee} \mathbf{E} - j \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \alpha_{em} \mathbf{H},$$

$$\mathbf{m} = \alpha_{mm} \mathbf{H} + j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \alpha_{me} \mathbf{E}.$$

Здесь  $\alpha_{ee}$  и  $\alpha_{mm}$  – тензоры диэлектрической и магнитной восприимчивости,  $\alpha_{em} = \alpha_{me}^T$  – псевдотензор, характеризующий киральные свойства спирали, символ  $T$  означает транспонирование,  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные. При записи этих выражений полагается, что электрическое и магнитное поле являются монохроматическими, и их зависимость от времени описывается функцией  $\exp(j\omega t)$ , как принято в радиофизике [1].

В нашем случае удельное сопротивление меди  $\rho = 1.673 \cdot 10^{-8}$  Ом·м [2], объемная концентрация электронов проводимости в меди определялась как  $N_0 = \rho_m N_A / M$ , где  $\rho_m = 8920$  кг/м<sup>3</sup> – плотность меди [2],  $N_A$  – число Авогадро,  $M$  – молярная масса меди.

Как следует из дисперсионных соотношений Крамерса–Кронига [3], в окрестности резонансной частоты действительная и мнимая части магнитоэлектрической восприимчивости спирали  $\alpha_{me}$  являются величинами одного порядка. Следовательно, коэффициент ослабления электромагнитного поля внутри металлической спирали  $\tau$  имеет

одинаково значимые действительную и мнимую части. Одной из задач данного исследования является определение коэффициента  $\tau$ , который связан с входным сопротивлением спирали. Сравнение экспериментальных данных и результатов расчётов позволяет найти значение комплексной величины  $\tau$ :

$$\tau = \tau' + j \cdot \tau'' = 1.508 \cdot 10^{-5} + j \cdot 1.508 \cdot 10^{-5}.$$

Используя значение комплексного параметра киральности  $\kappa'$ , можно определить частотную зависимость угла поворота плоскости поляризации волны, прошедшей через структуру, для наблюдателя, смотрящего навстречу волне:

$$\varphi = \frac{\omega}{c} \operatorname{Re}(\kappa') z_0,$$

где  $z_0$  – толщина структуры (в нашем случае  $z_0 = 2r$ ),  $\operatorname{Re}(\kappa')$  – действительная часть комплексного параметра киральности.

Полученная аналитически частотная зависимость угла поворота плоскости поляризации волны, прошедшей через искусственную структуру, показана на рисунке 1 сплошной кривой.

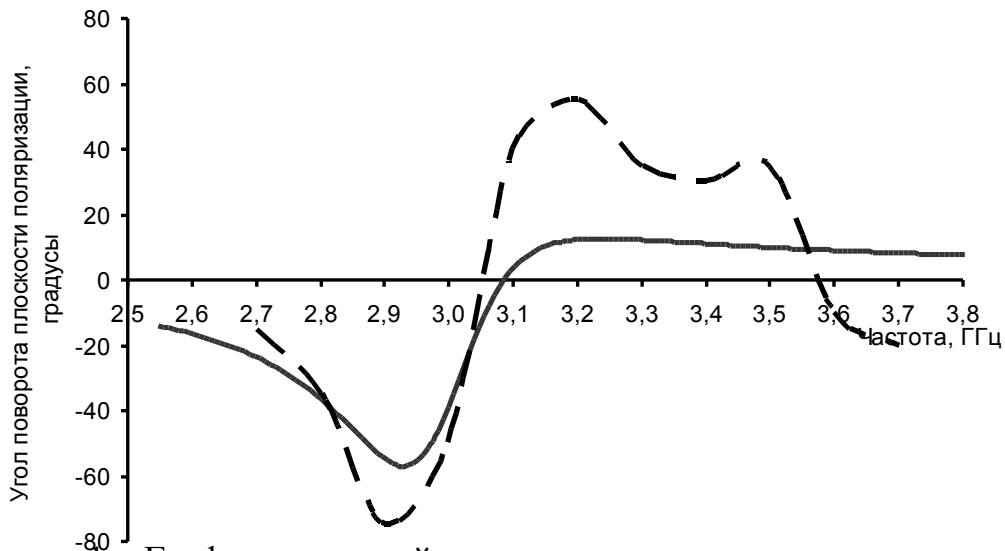


Рисунок 1 – График частотной зависимости угла поворота плоскости поляризации электромагнитной волны, прошедшей через образец двумерной решетки, состоящей из одновитковых левосторонних спиральных элементов с углом подъема  $35^{\circ}$

Если структура образована спиралями с левосторонним кручением ( $q < 0$ ), то для частот, более низких по отношению к резонансной, получаем  $\operatorname{Re}(\kappa') < 0$  и  $\varphi < 0$ . Таким образом, для этих частот имеет место

поворот плоскости поляризации волны против часовой стрелки, если смотреть навстречу волне.

Аналитическую зависимость угла поворота плоскости поляризации СВЧ волны сравним с результатами экспериментальных исследований, проведенных с образцом искусственной анизотропной двумерной решетки (рисунок 2), состоящей из одновитковых металлических спиральных элементов с углом подъема  $35^{\circ}$  (экспериментальная кривая приведена на рисунке 1 – штриховая линия) [4].

Сравнение экспериментальных графиков и результата моделирования позволяет сделать вывод, что предложенная модель качественно описывает свойства искусственной структуры с большой киральностью в СВЧ-диапазоне. Направление поворота плоскости поляризации волны, рассчитанное на основании предложенной модели, соответствует направлению поворота, наблюдаемому на эксперименте. Полученное теоретически значение частоты, соответствующей изменению направления вращения плоскости поляризации на противоположное, совпадает, в пределах погрешности измерения, с экспериментальным результатом.

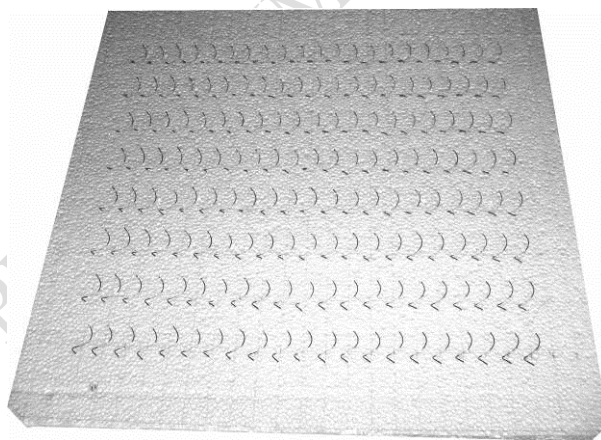


Рисунок 2 – Искусственный образец, содержащий левосторонние одновитковые спирали с углом подъема  $35^{\circ}$

Целью данного исследования является демонстрация того, что искусственные киральные анизотропные структуры, состоящие из спиралей, могут использоваться для преобразования поляризации электромагнитных волн СВЧ диапазона, например, для получения циркулярно-поляризованной волны, а также вращения главной оси эллипса поляризации СВЧ волны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) – проект № Ф11МС-005.

## Литература

1. Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью / И. В. Семченко [и др.] // Кристаллография. – 2011. – Т. 56. – № 3. – С. 404–411.
2. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
3. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 620 с.
4. Самофалов, А.Л. Использование спиральных излучателей для преобразования поляризации электромагнитных волн / А.Л. Самофалов // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2009. – № 4 (55). – Ч. 2. – С. 176–183.

**И.В. Семченко, С.А. Хахомов, И.А. Фаняев**

**УО «Гомельский государственный университет  
имени Ф. Скорины», Беларусь**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОДНОВИТКОВОЙ СПИРАЛИ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИМИ ИЗЛУЧЕНИЕ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ВОЛНЫ**

В настоящее время в теоретической и прикладной электродинамике, а также в смежных областях науки наблюдается значительный рост интереса к исследованию искусственных метаматериалов, обладающих киральными свойствами, в том числе и в СВЧ-диапазоне.

В качестве киральных элементов могут использоваться право- и левовинтовые металлические спирали, сферические частицы со спиральной проводимостью, разомкнутые кольца с выступающими концами, полосковые элементы в виде буквы S и ее зеркального эквивалента и другие.

В данной статье рассматривается массив одновитковых спиралей. Теоретический расчет параметров отдельной спирали был произведён в [1]. Спираль имеет следующие оптимальные параметры:

$$N_B=1, \alpha=13,6^\circ, L=0,05 \text{ м}, r=7,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}, h=0,012 \text{ м}, d=0,001 \text{ м},$$

где  $N_B$  – число витков спирали,  $\alpha$  – угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали,  $L$  – длина проволоки,