

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, α – угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали, L – длина проволоки,

из которой изготовлена спираль, r – радиус витка, h – шаг спирали, d – диаметр проволоки.

При помощи компьютерного моделирования, на основании метода конечных элементов, был смоделирован массив одновитковых медных спиралей. Вся структура рассматривается в вакууме. Спираль возбуждается падающей линейно поляризованной электромагнитной волной (рисунок 1), вектор напряженности электрического поля параллелен оси одновитковой спирали. Волновой вектор падающей волны ориентирован в плоскости, образованной концами спирали и ее осью.

В дипольном приближении напряженность электрического поля излучаемой волны имеет вид [2]:

$$\vec{E}(\vec{R}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi R} \left(\left[\ddot{p}, \vec{n} \right] \vec{n} + \frac{1}{c} \left[\dot{m}, \vec{n} \right] \right), \quad (1)$$

где \vec{R} – радиус-вектор, проведенный от спирали в точку наблюдения, μ_0 – магнитная постоянная, R – расстояние от спирали до точки наблюдения, \vec{n} – единичный вектор волновой нормали, c – скорость света в вакууме, точки над векторами обозначают дифференцирование по времени.

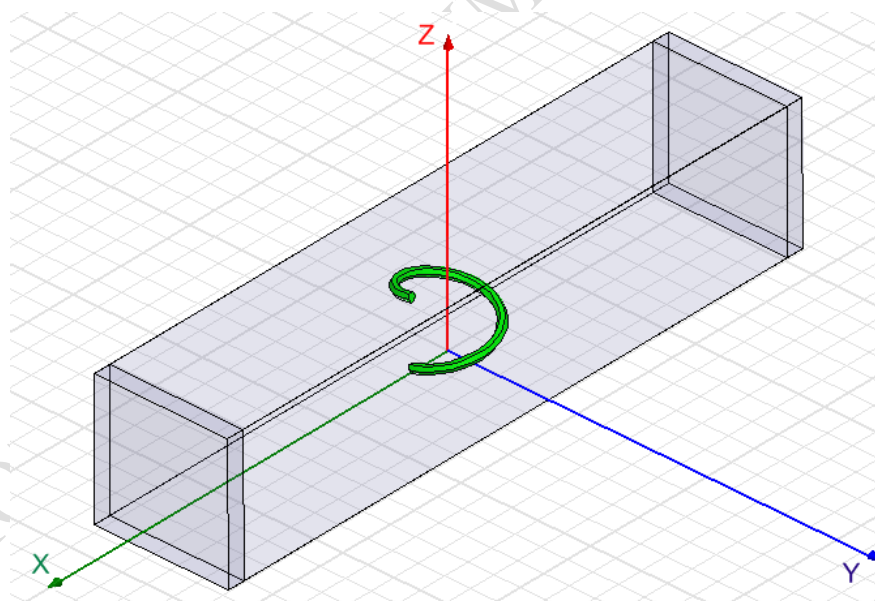


Рисунок 1 – Модель элементарной ячейки с одновитковой спиралью

Расчет компьютерной модели позволяет исследовать интересующие нас электромагнитные свойства одновитковой спирали.

В рассматриваемом диапазоне частот от 2 до 4 ГГц наблюдается главный частотный резонанс токов. В соответствии с законом Ома эффективная сила тока пропорциональна напряженности электриче-

ского поля (рисунок 2).

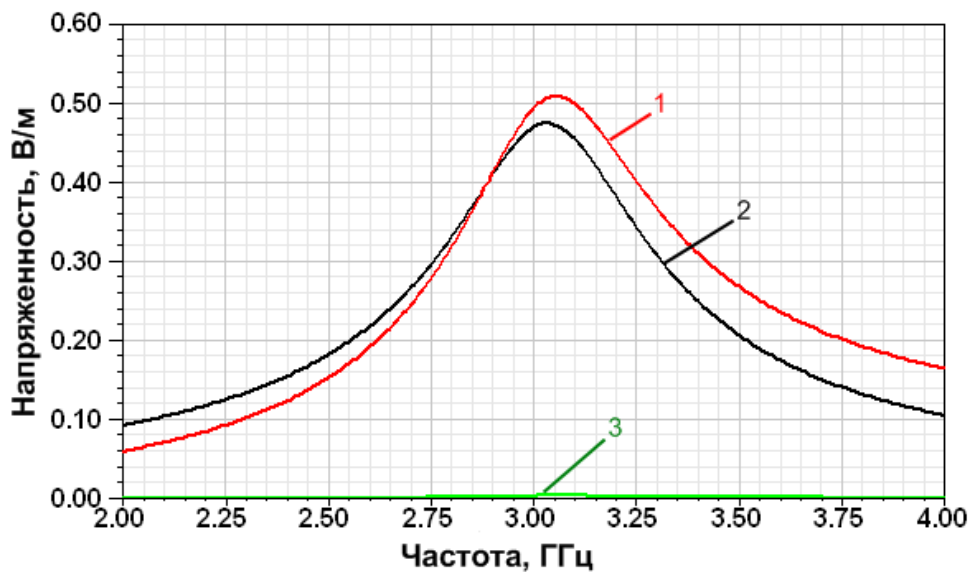


Рисунок 2 – График зависимости компонентов напряженности электрического поля от частоты. 1 – компонента вектора E_y ; 2 – компонента вектора E_z ; 3 – компонента вектора E_x

Из полученного графика можно численно определить резонансную частоту, для которой компоненты напряженности электрического поля по осям y и z максимальны. Компонента вектора E_x стремится к нулю, что и должно выполняться для волны в вакууме ввиду поперечности волны.

Так как диаметр спирали мал в сравнении с длиной волны, то есть выполняется неравенство $d \ll \lambda$, то токи в диаметрально противоположных точках спирали имеют в пространстве противоположное направление. Это приводит к тому, что в спирали устанавливается режим стоячей волны, излучение вдоль оси спирали равно нулю, и максимум энергии излучается в плоскости, ортогональной оси спирали [3].

Условие излучения циркулярной волны имеет вид [1,4]:

$$|p_z| = \frac{1}{c} |m_z|, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме, p_z и m_z – компоненты электрического дипольного момента и магнитного момента, направленные вдоль оси спирали.

Параметры спирали рассчитаны таким образом, чтобы формирование циркулярно-поляризованной волны происходило только благодаря излучению компонент p_z и m_z . При этом компоненты электрического дипольного момента p_x, p_y и магнитного момента m_x, m_y ,

ортогональны оси спирали, не должны давать вклад в излучённую волну. При условии главного резонанса $p_x = 0$, $m_x = 0$ вследствие симметрии распределения тока вдоль спирали. Компоненты p_y и m_y не обращаются в нуль, однако в направлении оси ou эти компоненты электрического дипольного и магнитного моментов не излучают и, следовательно, не искажают циркулярно-поляризованную волну.

Определение оптимальных параметров спиралей основано на использовании универсального соотношения [1,4]:

$$p_z = -\frac{2j}{\omega r^2 q} m_z, \quad (3)$$

где r – радиус витка спирали, q – удельное кручение спирали, связанное с шагом спирали соотношением $h = \frac{2\pi}{|q|}$, при этом для спирали с правым закручиванием $q > 0$, ω – циклическая частота излучаемой волны, i – мнимая единица.

Формула (3) является верной для любого распределения тока вдоль спирали, при этом ток может быть индуцирован как падающей волной, так и полями, созданными другими спиралями. Следовательно, оптимальные свойства проявляются не только для отдельных спиралей, но и для искусственных структур, то есть для массива спиралей.

Основным показателем циркулярно поляризованной волны является коэффициент эллиптичности. На рисунке 3 представлен коэффициент эллиптичности в частотном диапазоне.

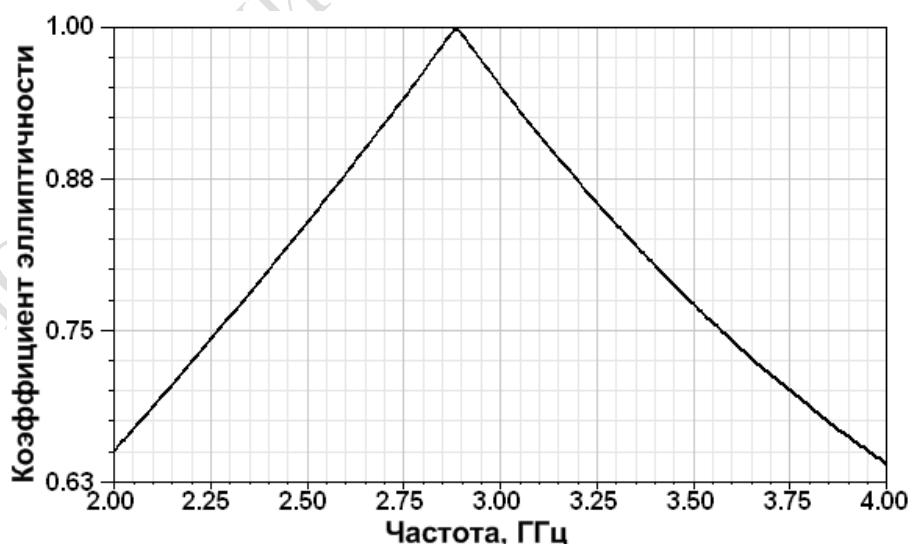


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны от частоты

Из полученного графика видно, что при резонансной частоте коэффициент эллиптичности приближен к единице. Это свидетельствует

о том, что волна, отражённая массивом спиралей, близка к циркулярно-поляризованной.

На основе проделанного моделирования из построенных графиков зависимостей можно судить о поляризации волны, излучаемой массивом одновитковых спиралей с оптимальными параметрами в направлении, перпендикулярном оси спиралей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) – проект № Ф10Р-230.

Литература

1. Semchenko, I.V. Optimal Shape of Spiral: Equality of Dielectric, Magnetic and Chiral Properties / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // Proceedings of META'08, NATO Advanced Research Workshop, Metamaterials for Secure Information and Communication Technologies 7–10 May, 2008, Marrakesh – Morocco. – P. 71–80.

2. Ландау, Л.Д. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – Т. 2. – 512 с.

3. Марков, Г.Т. Антенны: учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.

4. Семченко, И.В. Преобразование поляризации электромагнитных волн при помощи спиральных излучателей / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52. – №8. – С. 1–6.

В.В. Филиппов

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Беларусь

ТЕМПЕРАТУРНО-НЕЗАВИСИМЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛА $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$

Введение

Кристаллы калий-гадолиниевого вольфрамата $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (КТВ) находят широкое применение в лазерной технике. Легирование их ионами эрбия, иттербия, неодима, диспрозия, празеодима, гольмия позволяет получать высокоэффективную генерацию света видимого и ближнего ИК диапазонов [1–6]. Немаловажно и то, что концентрации