

## Способ нахождения параметра киральности среды на основе анализа материальных уравнений

*И.В. Малышев, Н.В. Паршина*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В данной статье приводится один из методов анализа коэффициента киральности среды в зависимости от таких параметров, как концентрация  $N$ , частота  $f$ , диэлектрические проницаемости как материала используемого контейнера, самой среды, так и распределенных в этом материале лево- и правозакрученных спиралей. В результате данной работы получены частотные характеристики коэффициента киральности при различных концентрациях микроэлементов в контейнере.

**Ключевые слова:** киральная среда, элемент Телледжена, коэффициент киральности, диэлектрическая проницаемость среды, магнитная проницаемость среды, спиральная структура, метаматериальная подложка, объемная концентрация, метаматериал, спиральные включения.

Известно, что киральная среда, которая содержит зеркально-асимметричные включения (спирали, разрезные кольца и др.), представляет собой совокупные соединения электрических и магнитных диполей, образующих метаматериальную подложку (ММП) [1].

При этом уравнения Максвелла для такой среды будут определяться известными соотношениями [2]:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \mp i\chi \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \pm i\chi \vec{E}. \quad (1)$$

При таком рассмотрении соотношения содержит лево- и правозакрученные спиральные включения, где верхние знаки соответствуют правозакрученным спиральям, а нижние – левозакрученным спиральям или, иначе говоря, левозакрученным (ЛСЭ) и правозакрученным (ПСЭ) спиральным элементам.

Вышерассмотренные соотношения (1) относятся к материальным уравнениям, присущим искусственным киральным средам [1, 3].

В этих соотношениях параметр (коэффициент) киральности  $\chi$  объединяет киральные свойства в виде некоторой константы, линейно зависимой от частоты и проводимости всей структуры (подложки).

На рис.1 приведён эскиз тонкопроволочной металлической спирали, которая в многих источниках [4, 5] упоминается как наиболее часто применяемый элемент в составе киральной среды подложки, которая содержит равномерно распределенное одинаковое количество однозаходных лево- и правовинтовых спиральных элементов (модифицированные элементы Телледжена [2]). Физические параметры такого единичного спиралевидного включения (рис.1): количество  $N$  витков радиуса  $R$ , расположенных друг от друга на расстоянии  $h$ , а совокупность таких элементов, определяют параметры:  $l$  – длина спирали в развернутом состоянии,  $r$  – радиус проволоки.

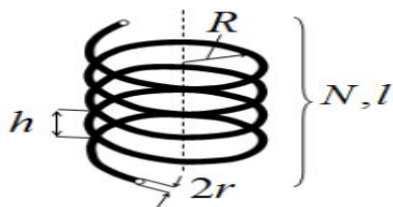


Рис. 1. – Эскиз спиралевидного включения (модифицированный элемент Телледжена)

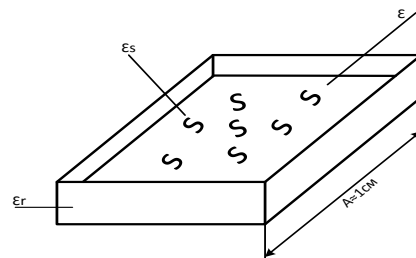


Рис. 2. – Эскиз ММП содержащей ЛСЭ и ПСЭ в контейнере подложки

Важно отметить, что эти свойства будут иметь дисперсионный характер, в связи с чем представляется возможным определить зависимость коэффициента киральности среды от таких параметров, как концентрация  $N$ , частота  $f$ , диэлектрические проницаемости как материала контейнера, в котором находятся спирали, самой среды, так и распределенных в этом материале лево- и правозакрученных спиралей (рис. 2) [5, 6].

В настоящей статье приводится один из методов учёта частотных зависимостей этих параметров. При этом считается, что спирали распределены равномерно вдоль всего объема среды с концентрацией  $N$  (которая является также аргументом).

В расчетах использовались несколько значений концентрации спиралей, а количество левовинтовых спиралей полагалось равным количеству правовинтовых спиралей [7].

Уравнение (1) можно переписать через абсолютный показатель киральности:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \mp i \chi \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \pm i \chi \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \vec{E},$$
$$\chi_a = \chi \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная вакуума;  $\mu_0$  – магнитная постоянная вакуума;  $\chi_a$  – абсолютный показатель – параметр киральности.

Известно также, что при представлении метаматериалов в виде совокупности киральных элементов, распределенных в однородном контейнере со средой, существуют соотношения Максвелла-Гарнетта, которые имеют вид [4]:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_s}{\varepsilon + 2\varepsilon_s} = n \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_s}{\varepsilon_r + 2\varepsilon_s},$$
$$\varepsilon_s(\omega) = \varepsilon_r + \frac{\beta_0^2}{\omega_0^2 + \omega^2},$$
$$\chi(\omega) = A \frac{\beta_0^2 \omega}{c(\omega_0^2 + \omega^2)}. \quad (3)$$

где  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость контейнера,  $\beta_0$  – параметр, имеющий размерность частоты и связанный с внутренними процессами в среде;  $c$  – скорость света;  $A$  – параметр, имеющий размерность длины;  $n$  – объемная концентрация микроэлементов в контейнере.

Подставив второе соотношение из (3) в первое и проводя соответствующую замену, получаем:

$$\chi = A \frac{\omega}{c} (\varepsilon_s - \varepsilon_r). \quad (4)$$

При этом можно записать:

$$\varepsilon_r - \varepsilon_s = \frac{(\varepsilon_r + 2\varepsilon_s)(\varepsilon - \varepsilon_s)}{n(\varepsilon + 2\varepsilon_s)}. \quad (5)$$

После подстановки соотношения (5) в (4) получаем:

$$\chi = \frac{A\omega (\varepsilon_r + 2\varepsilon_s)(\varepsilon_s - \varepsilon)}{cn (\varepsilon + 2\varepsilon_s)}. \quad (6)$$

Указанные соотношения дают возможность связать три важных параметра частоту  $f$ , концентрацию  $n$  и коэффициент киральности среды  $\chi$ , который в совокупности с общей диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_\Sigma$  будет определять основные свойства данной структуры [8, 9].

Полученные соотношения дали возможность получить графическое представление этих параметров от частоты  $f$  (рис.3, рис.4).

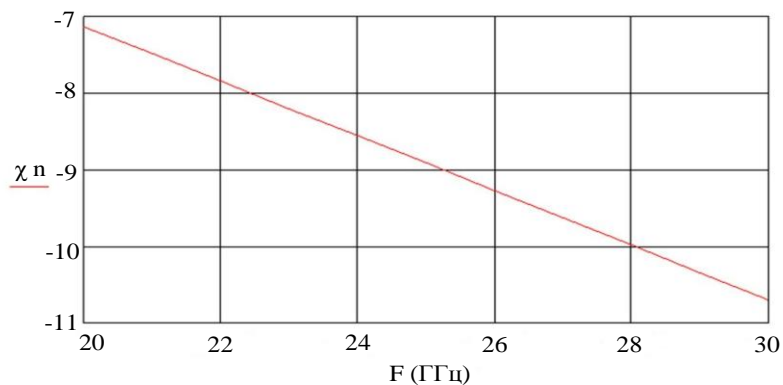


Рис. 3. – Зависимость произведения  $\chi n$  от частоты  $f$ .

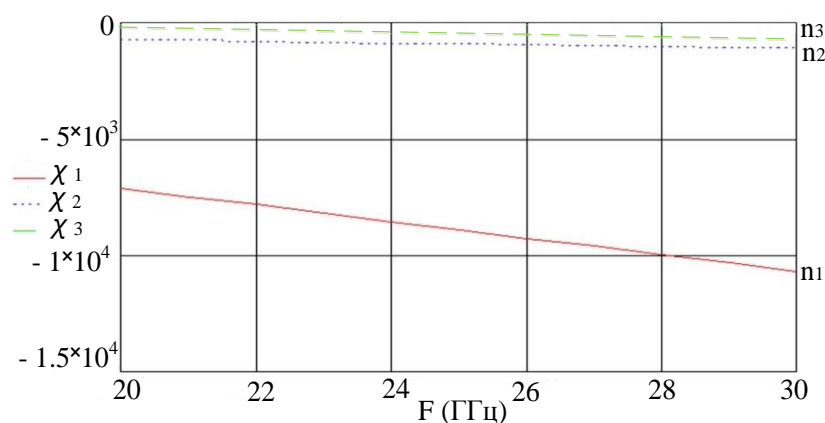


Рис. 4. – Зависимость коэффициента киральности  $\chi$  ( $\chi_1$ ,  $\chi_2$  и  $\chi_3$ ) от частоты  $f$  для трех значений концентрации  $n$  ( $n_1 = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $n_2 = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ,  $n_3 = 10^{13} \text{ м}^{-3}$ ).

Важно отметить, что особенностью киральных сред, отличающей их от других диэлектрических подложек, является то, что они имеют отрицательное значение суммарной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\Sigma}$  и при этом имеют отрицательную величину параметра магнитной проницаемости  $\mu$  [10].

### Литература

1. Осипов О.В., Аралкин М.В., Дементьев А.В. Использование моделей Максвелла-Гарнетта и Бруггемана для описания гетерогенности кирального метаматериала на основе гаммадионов // Инфокоммуникационные технологии, 2020. Т. 18. № 4. С. 391– 402.
2. Lindell I.V. Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media /I.V. Lindell, A.H. Sihvola, S.A. Tretyakov, A.J. Viitanen. London: Artech House, 1994. 291 p.
3. Малышев И.В., Паршина Н.В., Осадчий Е.Н. Определение электрофизических параметров спиралевидных включений в диэлектрическую среду для обеспечения киральных свойств // Инженерный вестник Дона, 2020, № 12. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6713](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6713).
4. Осипов О.В., Почепцов А.О., Юрасов В.И. Киральный метаматериал для частотно-селективной концентрации энергии сверхвысокочастотного излучения. // Инфокоммуникационные технологии, 2014. Т. 12. № 4. С. 76 – 82.
5. Малышев И.В., Паршина Н.В., Червяков Г.Г. Распространение ЭМВ в биизотропных средах с равномерным распределением концентрации дисперсных частиц // Специальная техника, 2015. № 1. С. 41– 43.
6. Осипов. О.В., Ключев Д.С., Почепцов А.О. Исследование электромагнитных характеристик кирального метаматериала на основе идеально проводящих элементов в виде взаимно ортогональных спиралей



// Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2017. Т.20. № 1. С. 4 – 10.

7. Malyshev I.V., Parshina N.V. The method of definition the electrophysical parameters of spiral inclusions in chiral metamaterials // 2020 International conference on "Physics and mechanics of new materials and their applications" (PHENMA 2020) Kitakyushu, Japan, 2021. pp. 173 – 174.

8. Насыбуллин А.Р., Сиразов А.Ф. Комплексированный метод измерения диэлектрической проницаемости в НЧ и СВЧ диапазонах // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5075/.

9. Sihvola A., Lindell I., Oksanen M., and Hujanen F. Broadband Microwave Measurements and Analysis of Artificial Chiral Materials// Electronics letters, Vol. 6. No 2. 1990. pp. 378 – 383.

10. Третьяков С.А. Электродинамика сложных сред: киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы // Радиотехника и электроника, 1994. Т.39. № 10. С.1457 – 1470.

### References

1. Osipov O.V., Aralkin M.V., Dement'ev A.V. Infokommunikatsionnye tekhnologii, 2020. Т. 18. № 4. pp. 391 – 402.

2. Lindell I.V. Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media. London: Artech House, 1994. 291 p.

3. Malyshev I.V., Parshina N.V., Osadchiy E.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6713.

4. Osipov O.V., Pocheptsov A.O., Yurasov V.I. Infokommunikatsionnye tekhnologii, 2014. Т. 12. № 4. pp. 76 – 82.

5. Malyshev I.V., Parshina N.V., Chervyakov G.G. Spetsial'naya tekhnika, 2015. № 1. pp. 41– 43.



6. Osipov. O.V., Klyuev D.S., Pocheptsov A.O. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy, 2017. T.20. № 1. pp. 4 – 10.
7. Malyshev I.V., Parshina N.V. 2020 International conference on "Physics and mechanics of new materials and their applications" (PHENMA 2020) Kitakyushu, Japan, 2021. pp. 173 – 174.
8. Nasybullin A.R., Sirazov A.F. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5075/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5075/).
9. Sihvola A., Lindell I., Oksanen M., and Hujanen F. Electronics letters, Vol. 6. No 2. 1990. pp. 378 – 383.
10. Tret'yakov S.A. Radiotekhnika i elektronika, 1994. T. 39. № 10. pp. 1457 – 1470.