

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 6, no. 4, pp. 386–397, 2023.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 4. С. 386—397.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.29039/2587-9936.2023.06.4.29

УДК 53.043

Исследование проницаемости и преломления плоскополяризованной ЭМВ при взаимодействии с диэлектрической киральной средой

Малышев И. В., Паршина Н. В., Дубченко Н. И.

Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения

Южного федерального университета

ул. Шевченко, 2, г. Таганрог Ростовской области, 347922, Российская Федерация
ivmalyshev@sfn.ru

Получено: 20 мая 2023 г.

Отрецензировано: 31 мая 2023 г.

Принято к публикации: 31 мая 2023 г.

Аннотация: *На основе рассмотрений известных соотношений Максвелла и Максвелла — Гарнетта для диэлектрических подложек, представленных в виде объемного диэлектрика (сплава) с распределенными в нем кирально-связанными объемными структурами (например, лево- и правозакрученными спиральями), предложены два алгоритма определения основных связанных друг с другом параметров: коэффициента киральности, концентрации киральных частиц и диэлектрических проницаемостей. Первая часть работы имеет теоретический характер и ориентирована относительно микроволнового частотного диапазона. Во второй части работы приводится способ нахождения коэффициента преломления E-плоскополяризованной ЭМВ при ее прохождении через киральную среду. При этом используется оригинальный метод, основанный на связи коэффициента киральности с углом поворота волны, прошедшей через данную среду с заданными электрофизическими параметрами.*

Ключевые слова: *диэлектрические подложки, кирально-связанные структуры, коэффициент киральности, коэффициенты отражения и преломления, уравнения Максвелла — Гарнетта, рупорная антенна, круговая поляризация.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Малышев И. В., Паршина Н. В., Дубченко Н. И. Исследование проницаемости и преломления плоскополяризованной ЭМВ при взаимодействии с диэлектрической киральной средой // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 4. С. 386—397.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Малышев, И. В. Исследование проницаемости и преломления плоскополяризованной ЭМВ при взаимодействии с диэлектрической киральной средой / И. В. Малышев, Н. В. Паршина, Н. И. Дубченко // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 4. — С. 386—397.

1. Введение

Как известно [1], искусственные киральные метаматериалы могут представлять собой диэлектрические подложки, которые содержат распределенные в них различные элементы или включения, имеющие симметричное расположение относительно друг друга и которые равномерно распределены в твердых сплавах диэлектрической среды.

При этом уравнения Максвелла для такой изотропной пастеровской среды включают в себя киральнозависимые поправки [1]:

$$\begin{aligned}\bar{D} &= \varepsilon \bar{E} - j\chi \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \bar{H}, \\ \bar{B} &= \mu \bar{H} + j\chi \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \bar{E},\end{aligned}\quad (1)$$

в которых использованы обозначения: \bar{H} и \bar{E} — напряженности магнитного и электрического и магнитного полей; χ — безразмерный коэффициент киральности ($\chi \leq n_0 \sqrt{\frac{\mu_0}{\mu_0 \varepsilon_0}}$, где n_0 — коэффициент отражения диэлектрической среды с параметрами: ε , μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; ε_0 , μ_0 — эти же параметры для вакуума).

Основные параметры спирали — ее площадь S и длина l , которая определяется из условия $l \ll \lambda$, а также диаметр проволоки $D = 2r$.

В дальнейшем будут определены два алгоритма нахождения коэффициента киральности и электрофизических параметров спиралевидных включений, которые находятся в объеме контейнера подложки, а также определяющегося из этого соотношения для коэффициента преломления ЭМВ в такой среде.

2. Расчет связанных параметров киральных сред

Вначале определим значение активных и реактивных параметров спирали, которые должны определять основные киральные свойства такой среды.

Известно, что подобные спирали обладают поляризационными моментами p_e и p_m определяемыми вдоль единичных векторов u в виде плоскостных параметров объема указанной среды [2]:

$$\begin{aligned}p_e &= \alpha_{ee} u u E + \alpha_{em} u u H, \\ p_m &= \alpha_{mm} u u H + \alpha_{me} u u E.\end{aligned}\quad (2)$$

Для идеального проводника материала провода:

$$\alpha_{ee} = \frac{Cl^2}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}, \quad (3)$$

$$\alpha_{mm} = \frac{\mu^2 \omega^2 CS^2}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} \quad (4)$$

$$\alpha_{em} = -\alpha_{me} = \frac{j\omega \mu CS l}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}. \quad (5)$$

В этих соотношениях поляризуемость α_{ij} спирали, определяющая киральные свойства среды с фоновой проницаемостью μ , выражена через распределенные параметры: емкость C и индуктивность L проволоки, а также собственного сопротивления R [3].

Конфигуративный эскиз металлической спирали, которая наиболее часто исследовалась и использовалась применительно к метаматериалам в составе киральной среды подложки, приведен на Рис. 1. В этой среде будем полагать равное количество однородно распределенных право- и левовинтовых спиралей (ПС и ЛС), которые в [2, 4, 5] упоминаются как модифицированные элементы Телегена. На этом эскизе указаны следующие параметры: r и l — радиус и длина проволоки спирали, $N = N_c$ — число витков спирали, $R = R_c$ — радиус одного витка и h — межвитковое расстояние.

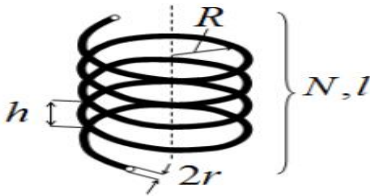


Рис. 1. Эскиз спирали модифицированного элемента Телегена.

Fig. 1. Design of the spiral of the modified Tellegen element

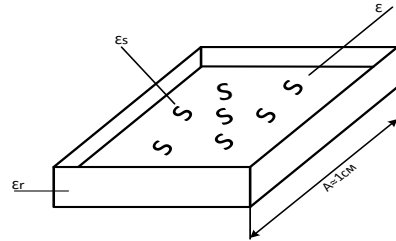


Рис. 2. Контейнер с диэлектриком и распределенными в нем ПС и ЛС.

Fig. 2. A container with a dielectric and distributed in it right- and left-handed spirals

Вследствие дисперсионности свойств такой среды (Рис. 2) можно определить зависимость коэффициента киральности такого образца от следующих параметров: концентрация N ЛС и ПС, частота f , диэлектрические проницаемости как материала контейнера (ϵ_r), в котором находятся спирали (ϵ_s), так и самой среды (ϵ) [5, 6].

Определение R , L , C — параметров для спирали с размерами l и S , входящих в соотношения (2—4), даст возможность, задавая параметры поляризуемости спирали α_{ij} , в конечном счете учесть эти зависимости в

соотношениях, описывающих излучательные и поглощающие свойства метаматериалов относительно взаимодействующей ними ЭМВ.

Используя подстановку: $x + iy = (1 - \omega^2 LC) + j\omega RC$, эти соотношения запишутся в виде:

$$\frac{x + jy}{C} = \frac{l^2}{\alpha_{ee}}, \quad (6)$$

$$\frac{x + jy}{C} = \frac{S^2 \mu^2 \omega^2}{\alpha_{mm}}, \quad (7)$$

$$\frac{x + jy}{C} = j \frac{\mu \omega S}{\alpha_{em}}. \quad (8)$$

Из (6) и (7) следует, что:

$$\frac{l^2}{\alpha_{ee}} = \frac{S^2 \mu^2 \omega^2}{\alpha_{mm}}. \quad (9)$$

А из (9) и (8) получим:

$$\frac{l}{\alpha_{ee}} = j \frac{\mu \omega S}{\alpha_{em}}. \quad (10)$$

Из (9) следует:

$$\frac{l}{S} = \mu \omega \sqrt{\alpha_{ee} / \alpha_{mm}}. \quad (11)$$

Значение R определяется через величину ρ (удельное сопротивление материала спирали) как $R = \rho l / S$. Остальные электрические параметры структуры спирали (L , C) могут быть найдены из соотношений (6—8) [5]. Уравнение (11) после соответствующей подстановки даст:

$$R = \rho \mu \omega \sqrt{\alpha_{ee} / \alpha_{mm}}. \quad (12)$$

Из соотношения (6) и (7) следует

$$C = \frac{\alpha_{ee}}{l^2 + \omega^2 L \alpha_{ee} + j \omega R \alpha_{ee}}, \quad (13)$$

$$L = \frac{\alpha_{mm} - C(\mu^2 \omega^2 S^2 + j \omega R \alpha_{mm})}{\omega^2 C \alpha_{mm}}. \quad (14)$$

Полученные равенства (12—14) являются исходными для определения электрофизических параметров ЛС и ПС, которые распределены в объеме диэлектрика и будут проявлять свои свойства как метаматериал [6, 7].

Алгоритм расчета обобщенных параметров структуры из такого метаматериала можно реализовать в следующей последовательности: после

определения коэффициентов поляризуемости спирали (α_{ee} и α_{mm}) вычислется величина сопротивления R , а реактивные элементы L и C находятся методом подбора [8, 9] на конкретной частоте с применением (13) и (14). Можно также модифицировать эту последовательность, применяя взаимную подстановку.

Второй алгоритм предполагает определение частотных зависимостей самого коэффициента киральности χ в зависимости от концентрации спиралевидных элементов [2].

Будем использовать несколько значений параметра N , количество ЛС считаем равным количеству ПС [5], и введем еще один параметр — абсолютный показатель киральности, зависящий от ε_0 и μ_0 (диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума):

$$\chi_a = \chi \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}. \quad (15)$$

При представлении киральнозависимой среды метаматериала в виде образца Рис.2 будут справедливы соотношения Максвелла-Гарнетта [4]:

$$\begin{aligned} \frac{|\varepsilon - \varepsilon_s|}{\varepsilon + 2\varepsilon_s} &= n \frac{|\varepsilon_r - \varepsilon_s|}{\varepsilon_r + 2\varepsilon_s}, \\ \varepsilon_s &= \varepsilon_r + \frac{\beta_0^2}{\omega_0^2 + \omega^2}, \\ \chi &= A \frac{\beta_0^2 \omega}{c(\omega_0^2 + \omega^2)}, \end{aligned} \quad (16)$$

где ε_r , ε и ε_s — относительная диэлектрическая проницаемость контейнера, среды диэлектрика и спирали соответственно, c — скорость света; β_0 — параметр, имеющий размерность частоты и связанный с внутренними процессами в среде; N — объемная концентрация ЛС и ПС в контейнере, A — нормирующий параметр, имеющий размерность расстояния.

После подстановки второго уравнения (16) в первое можно получить:

$$\varepsilon_r - \varepsilon_s = \frac{|\varepsilon_r + 2\varepsilon_s| |\varepsilon - \varepsilon_s|}{N |\varepsilon + 2\varepsilon_s|}. \quad (17)$$

При этом можно записать:

$$\chi = A \frac{\omega}{c} |\varepsilon_s - \varepsilon_r|. \quad (18)$$

После подстановки соотношения (17) в (18) получаем:

$$\chi = \frac{A\omega}{cN} E_\varepsilon, \quad (19)$$

где $E_\varepsilon = \frac{|\varepsilon_r + 2\varepsilon_s||\varepsilon_s - \varepsilon|}{|\varepsilon + 2\varepsilon_s|}$ — обобщенный параметр киральной диэлектрической проницаемости; $\varepsilon_\Sigma = \varepsilon + \varepsilon_s$.

В предположении отсутствия внешнего контейнера ($\varepsilon_r = 0$) соотношение (19) будет иметь вид $E_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_s|\varepsilon_\Sigma + 2\varepsilon|}{|\varepsilon_\Sigma + \varepsilon_s|}$.

Полученные равенства связывают три важных параметра киральной среды: коэффициент киральности χ , концентрацию N и частоту f , что совместно с параметром ε_Σ будет определять основные проводящие свойства структуры [8, 9].

Графики, построенные по полученным соотношениям, приведены на Рис. 3 и Рис. 4.

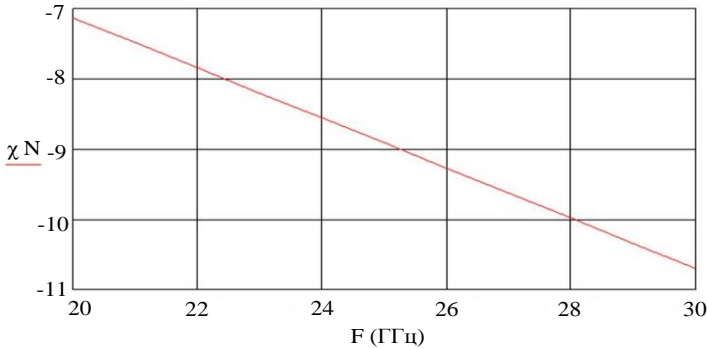


Рис. 3. Частотная зависимость произведения χN .

Fig. 3. Frequency dependence of χN

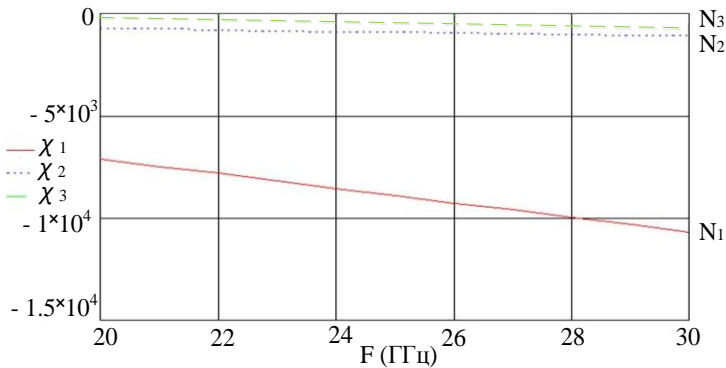


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента киральности χ (χ_1 , χ_2 и χ_3) для трех значений концентрации: $N_1 = 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $N_2 = 10^{12} \text{ м}^{-3}$, $N_3 = 10^{13} \text{ м}^{-3}$.

Fig. 4. Frequency dependence of the chirality coefficient χ (χ_1 , χ_2 and χ_3) for three concentration values: $N_1 = 10^{11} \text{ m}^{-3}$, $N_2 = 10^{12} \text{ m}^{-3}$, $N_3 = 10^{13} \text{ m}^{-3}$

3. Определение коэффициента проницаемости киральных сред

На практике коэффициент киральности определяет через угол поворота E -плоскополяризованной волны, прошедшей через среду относительно плоскости падающей волны.

Известно [3, 10], что показатель преломления диэлектрической среды равен $n = \sqrt{\epsilon\mu}$. Этот параметр входит в состав уравнений:

$$\begin{aligned}\Delta\vec{E} + k^2(n^2 + \chi^2)\vec{E} - 2ik^2\mu\chi\vec{H} &= 0, \\ \Delta\vec{H} + k^2(n^2 + \chi^2)\vec{H} - 2ik^2\mu\chi\vec{E} &= 0.\end{aligned}\quad (20)$$

В этих уравнениях модуль волнового числа для излучения с длиной волны в данной среде λ определяется как параметр $k = 2\pi/\lambda$. При этом нужно помнить, что в вещественной среде волновое число электромагнитной волны $k = k_{\text{вак}}\sqrt{\epsilon\mu}$ связано с $k_{\text{вак}} = 2\pi/\lambda_{\text{вак}}$, ($\lambda_{\text{вак}}$ — длина волны микроволнового излучения в вакууме).

Проведем разделение компонент уравнений (20), для чего вводим параметры напряженностей электрических полей с правокруговой \vec{E}_R и левокруговой \vec{E}_L поляризациями (ЛКП и ПКП, Рис. 4).

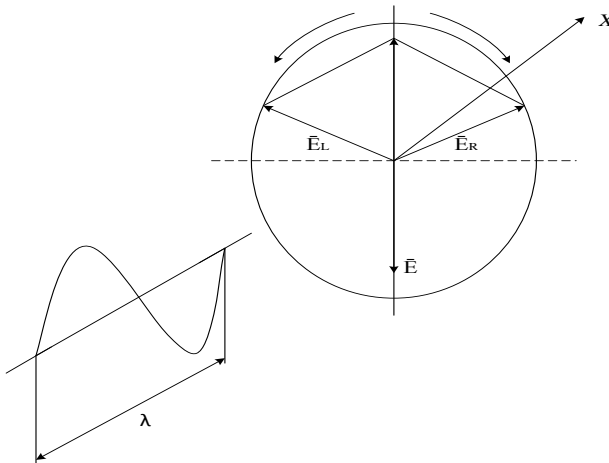


Рис. 4. ЭМВ падающая из E -плоскостной секторальной рупорной антенны на плоскопараллельный образец кирального материала.

Fig. 4. EMW falling from the E -planar sectoral horn antenna onto a plane-parallel sample of chiral material

Относительно этих компонент можно определить для заданной киральной среды напряженность плоскополяризованного электрического

поля ЭМВ как векторную сумму напряженностей электрических полей с ЛКП \vec{E}_L и ПКП \vec{E}_R поляризациями: $\vec{E} = \vec{E}_L + \vec{E}_R$, т. е. их суперпозицией. Вследствие наличия общей связи напряженностей магнитного и электрического полей для такой волны из равенства: $\vec{H} = in(\vec{E}_R - \vec{E}_L)$ можно провести разделение уравнения (20) на два независимых уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{E}_R + k_R^2 \vec{E}_R &= 0, \\ \Delta \vec{E}_L + k_L^2 \vec{E}_L &= 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Таким образом, волновые числа в киральной среде приобретают компонентную форму: $k_R = k(n + \chi)$ и $k_L = k(n - \chi)$.

На основании наличия связи между показателем преломления вещества и волновым числом можно получить показатели преломления полей с ЛКП и ПКП: $n_R = n + \chi$ и $n_L = n - \chi$, которые находятся с учетом (19).

Согласно феноменологической теории [10] угол поворота плоскости поляризации света в киральной оптически активной среде определяется как:

$$\varphi = \alpha d = \frac{\pi d}{\lambda} (n_R - n_L), \quad (22)$$

где d — толщина слоя киральной среды (Рис. 5), которую следует выбирать как можно меньшей для улучшения регистрации проводящих свойств. Параметр $\alpha = \pi(n_R - n_L)/\lambda$ является коэффициентом удельного вращения.

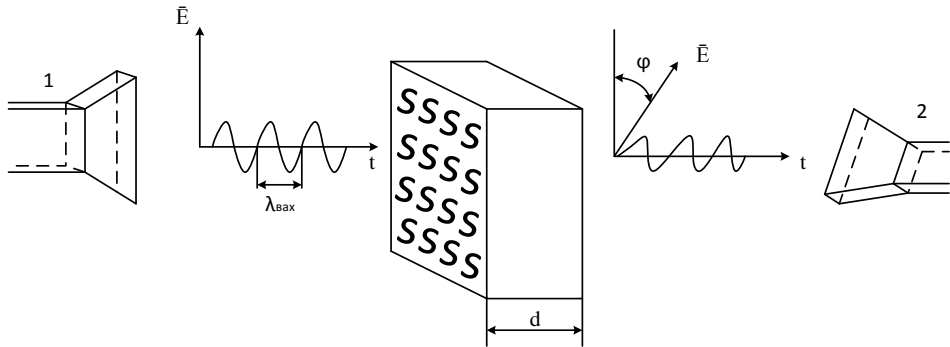


Рис. 5. Метод измерения угла поворота плоскопараллельной поляризованной ЭМВ после прохождения образца с киральной средой [10].

Fig. 5. Method for measuring the angle of rotation of a plane-parallel polarized EMW after passing through a sample with a chiral medium [10]

После подстановки в (22) соотношений для n_R и n_L получаем:

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \chi = k\chi d = \alpha d. \quad (23)$$

Тогда коэффициент удельного вращения будет определяться как $\alpha = k\chi$.

Следовательно, можно определить физический смысл коэффициента киральности χ как параметра, определяемого из величины отношения коэффициента удельного вращения к волновому числу.

Далее из (23) следует:

$$\chi = \frac{\varphi}{dk_{\text{вак}}\sqrt{n}} \cdot \quad (24)$$

Соотношение (24) дает возможность рассчитать параметр киральности данной среды посредством измерения угла поворота плоскости поляризации волны, которая прошла сквозь образец (Рис. 5).

Используя соотношения (19) и (24), можно получить:

$$\varphi\lambda_{\text{вак}}^2 N = an4\pi^2 f^2 d\varepsilon. \quad (25)$$

Отсюда следует окончательное соотношение:

$$n = \frac{\varphi}{d\omega^2} \left(\frac{Nc}{AE\varepsilon} \right), \quad (26)$$

которое определяет по углу поворота E -плоскополяризованной ЭМВ собственный коэффициент ее преломления в киральной среде с заданными параметрами.

4. Заключение

Таким образом, в результате предложенных расчетов определены связи и частотные зависимости основных параметров диэлектрических сред с объемными кирально-связанными включениями (на примере спиралей) имеющими конкретные электрофизические параметры, что позволяет на практике проанализировать проводящие особенности таких сред. Кроме этого найдено соотношение, позволяющее рассчитать коэффициент преломления ЭМВ при ее прохождении через объем среды используя удобную практическую методику.

Список литературы

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. 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. 27—28.

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: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6713>
4. Малышев И. В., Паршина Н. В. Способ нахождения параметра киральности среды на основе анализа материальных уравнений // Инженерный вестник Дона. 2021. № 12. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_34__12_Malyshev_Parshina.pdf_ea55a5fc71.pdf
5. 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.
6. Клюев Д. С., Кубанов В. П., Осипов О. В., Почепцов А. О., Резепова Е. С. 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. In : 2020 International conference on “Physics and mechanics of new materials and their applications” (PHENMA 2020). Kitakyushu, Japan, 2021. С. 173—174.
8. Sihvola A., Lindell I., Oksanen M., Hujanen F. Broadband Microwave Measurements and Analysis of Artificial Chiral Materials. In : 1994 24th European Microwave Conference, IEEE. 1994. Т. 6, № 2. С. 378—383.
9. Третьяков С. А. Электродинамика сложных сред : киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 10. С. 1457—1470.
10. Патент RU 2418292C1, МПК G01N 23/02(2006.01). Способ определения параметра киральности искусственных киральных сред. Волобуев А. Н., Осипов О. В., Панфёрова Т. А. Заявл. 22. 03.2010, № 2010110767/07, Оpubл. 10.05.2011, Бюл. № 13.

Информация об авторах

Малышев Игорь Владимирович, к. т. н., доцент кафедры радиотехнической электроники и наноэлектроники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация.

Паршина Наталья Валерьевна, к. т. н., доцент кафедры радиотехнической электроники и наноэлектроники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация.

Дубченко Никита Иванович, аспирант кафедры радиотехнической электроники и наноэлектроники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог, Российская Федерация.

Investigation of the Permeability and Refraction of a Plane-Polarized EMW Interacting with a Dielectric Chiral Medium

I. V. Malyshev, N. V. Parshina, and N. I. Dubchenko

*Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation
of the Southern Federal University
2, Shevchenko str., Taganrog, Rostov region, 347922, Russian Federation
ivmalyshev@sfedu.ru*

Received: May 20, 2023

Peer-reviewed: May 20, 2023

Accepted: June 3, 2023

Abstract: Based on consideration of the well-known Maxwell and Maxwell–Garnett relations for dielectric substrates, presented in the form of a bulk dielectric (alloy) with chirally-coupled bulk structures distributed in it (for example, left-handed and right-handed spirals), two algorithms are proposed, determining the main connected with each other parameters of the chirality coefficient, concentration of chiral particles and permittivities. This part of the work is of a theoretical nature and is considered in relation to the microwave frequency range. In the second part of the work, a method is given for finding the refractive index of a plane-polarized EMW as it passes through a chiral medium. In this case, an original method is used, based on the relationship between the chirality coefficient and the angle of rotation of a wave that has passed through a given medium with given electrophysical parameters.

Keywords: dielectric substrates, chirally coupled structures, chirality coefficient, reflection and refraction coefficients, Maxwell–Garnett equations, horn antenna, circular polarization.

For citation (IEEE): I. V. Malyshev, N. V. Parshina, and N. I. Dubchenko, “Investigation of the Permeability and Refraction of a Plane-Polarized EMW Interacting with a Dielectric Chiral Medium,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 4, pp. 386–397, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.4.29. (In Russ.).

References

- [1] M. V. Aralkin, A. N. Dementyev, and O. V. Osipov, “The Using of Maxwell–Garnett and Bruggman Models to Describe Heterogeneity of a Chiral Metamaterial Based on Gammadi-*ons*,” *Infokommunikacionnye Tehnologii*, vol. 18, no. 4, pp. 391–402, 2020. (In Russ.).
- [2] I. V. Malyshev, N. V. Parshina, and G. G. Chervyakov, “Electromagnetic Wave Propagation in Bi-Isotropic Media with Uniform Distribution of Dispersed Particles Concentration,” *Spetsial'naya Tekhnika*, no. 1, pp. 41–43, 2015. (In Russ.).

- [3] I. V. Malyshev, N. V. Parshina, and E. N. Osadchiy, "Determination of the electrophysical parameters of spiral inclusions in a dielectric medium to ensure chiral properties," *Inzhenernyy Vestnik Dona*, no. 12, 2020. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6713>. (In Russ.).
- [4] I. V. Malyshev and N. V. Parshina, "A method for finding the chirality parameter of a medium based on the analysis of material equations," *Inzhenernyy Vestnik Dona*, 2021. № 12. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_34__12_Malyshev_Parshina.pdf_ea55a5fc71.pdf. (In Russ.).
- [5] O. V. Osipov, A. O. Pochepcov, and V. I. Yurasov, "Chiral Metamaterials for Frequency Selective Concentration Microwave Energy," *Infokommunikacionnye Tehnologii*, vol. 12, no. 4, pp. 76–82, 2014. (In Russ.).
- [6] D. S. Klyuev, V. P. Kubanov, O. V. Osipov, A. O. Pochepcov, and E. S. Rezepova, "Research of electromagnetic characteristics of chiral metamaterial based on the thin-wire perfectly conducting elements consisting of mutually orthogonal helices," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 4–10, 2017. (In Russ.).
- [7] I. V. Malyshev and N. V. Parshina, "The method of definition the electrophysical parameters of spiral inclusions in chiral metamaterials," in : *2020 International conference on "Physics and mechanics of new materials and their applications" (PHENMA 2020)*, Kitakyushu, Japan, pp. 173–174, 2021.
- [8] A. Sihvola, I. Lindell, M. Oksanen, and F. Hujanen, "Broadband Microwave Measurements and Analysis of Artificial Chiral Materials," 1994 24th European Microwave Conference, IEEE, vol. 1, pp. 378–383, 1994, doi: 10.1109/euma.1994.337238.
- [9] S. A. Tret'yakov, "Electrodynamics of complex media – chiral, biisotropic, and some bianisotropic materials," *Radiotekhnika i Elektronika*, vol. 39, no. 10, pp. 1457–1470, 1994. (In Russ.).
- [10] A. N. Volobuev, O. V. Osipov, and T. A. Panferova, "Method for determining the chirality parameter of artificial chiral media," Patent RU 2418292C1, May 10, 2011. (In Russ.).

Information about the authors

Igor V. Malyshev, Ph.D., Associate Professor of Radio Electronics and Nanoelectronics Department of the Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering in Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.

Natalia V. Parshina, Ph.D., Associate Professor of Radio Electronics and Nanoelectronics Department of the Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering in Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.

Nikita I. Dubchenko, Postgraduate student of Radio Electronics and Nanoelectronics Department of the Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering in Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation.