



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 537.87

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПЕРИОДИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ ИСКУССТВЕННОЙ СРЕДЕ ИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И КИРАЛЬНЫХ СЛОЕВ

¹Куркин Е.В., ²Осипов О.В.

ФГБОУВО Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия (443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23), email: ¹Kurkin@bk.ru, ²osipov.o@mail.ru

В работе построена математическая модель кирального метаматериала на основе суперпозиции модели Максвелла-Гарнетта для описания пространственной структуры метаматериала и дисперсионной модели Кондона. Получены выражения для векторов электромагнитного поля в киральном метаматериале. Построена математическая модель продольно протяженного периодически неоднородного кирального метаматериала.

Ключевые слова: метаматериал, искусственная киральная среда, оптически активная среда, СВЧ излучение, электромагнитная волна, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, периодическая неоднородность

ELECTROMAGNETIC WAVES PROPAGATION IN A PERIODICALLY INHOMOGENEOUS ARTIFICIAL MEDIUM OF DIELECTRIC AND CHIRAL LAYERS

¹Kurkin E.V., ²Osipov O.V.

Volga Region State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia (443010, Samara, Lva Tolstogo Str., 23), email: ¹Kurkin@bk.ru, ²osipov.o@mail.ru

A mathematical model of the chiral metamaterial is constructed based on the superposition of the Maxwell-Garnett model to describe the spatial structure of the metamaterial and the Condon dispersion model. Expressions for electromagnetic field vectors in a chiral metamaterial are obtained. A mathematical model of a longitudinally extended periodically inhomogeneous chiral metamaterial is constructed.

Keywords: metamaterial, artificial chiral medium, optically active medium, microwave radiation, electromagnetic wave, reflection coefficient, transmission coefficient, periodic inhomogeneity..

Понятие «киральность» означает свойство некоторого объекта не совмещаться со своим зеркальным отражением в пространстве при таких действиях, как перемещение, совмещение, вращение [1]. Можно заметить, что киральность относится к положению объекта в пространстве, то есть является геометрическим свойством.

В настоящее время значительный интерес в электродинамике СВЧ представляет собой исследование и создание искусственных сред, называемых метаматериалами [2-5]. Они, как правило, создаются с использованием мелких частиц, собственный размер которых намного меньше длины электромагнитной волны, которые располагаются в среде-контейнере из

материала с другими электрофизическими параметрами. Отдельным классом метаматериалов являются киральные среды [6-12], которые состоят из диэлектрического контейнера, в котором равномерно размещены и хаотически ориентированы проводящие микроэлементы киральной (зеркально асимметричной) формы. В киральной среде распространяются две волны с право (ПКП) и левокруговыми (ЛКП) поляризациями с разными постоянными распространения. Также следует заметить, что для описания свойств взаимодействия киральной среды с электромагнитной волной кроме диэлектрической и магнитной проницаемостей вводится относительный параметр киральности. Материальные уравнения для киральной среды имеют вид [6-8]:

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

где ε — относительная эффективная диэлектрическая проницаемость;

μ — относительная магнитная проницаемость;

χ — относительный параметр киральности метаматериала.

Верхние и нижние знаки в (1) соответствуют правым и левым формам киральных элементов. Уравнения (1) записаны в Гауссовой системе единиц.

С другой стороны, значительное внимание уделяется построению математических моделей киральных сред, учитывающих дисперсию материальных параметров и гетерогенность (двухкомпонентность) [13-16].

В работе рассматривается периодически неоднородный киральный метаматериал (КММ), состоящий из чередующихся планарных киральных слоев. Для описания свойств киральных слоев в работе используется математическая модель, учитывающая свойства гетерогенности, дисперсии диэлектрической проницаемости и дисперсии параметра киральности [15]. По сути, периодически неоднородный КММ — это многослойная структура, состоящая из периодически чередующегося набора планарных микрослоев с различными значениями материальных параметров (например, параметра киральности). В таких структурах возникает возможность частотно селективного управления прохождением волн различной поляризации.

Рассмотрим математическую модель КММ, используемого в работе. Для описания гетерогенности используется модель Максвелла Гарнетта [17]:

$$\varepsilon = \varepsilon_c \frac{1 + 2\alpha\varepsilon_x}{1 - \alpha\varepsilon_x}; \quad \varepsilon_x = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_c}, \quad (2)$$

где ε — относительная эффективная диэлектрическая проницаемость метаматериала (как пространственной структуры, состоящей из контейнера и компонентов);

ε_c — относительная диэлектрическая проницаемость контейнера;

ε_s — относительная диэлектрическая проницаемость области, занятой компонентом.

Дисперсия диэлектрической проницаемости и параметра киральности описывается моделями Лоренца и Кондона, соответственно [13]:

$$\varepsilon_s(\omega) = \frac{\Omega_\varepsilon \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}; \quad \chi(\omega) = \frac{\Omega_\chi \omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}, \quad (3)$$

где ω_0 — резонансная частота кирального элемента (определяется из квазистатической модели для конкретного типа элемента);

γ — частота демпфирования;

Ω_ϵ — «сила» резонанса диэлектрической проницаемости;

Ω_χ — «сила» резонанса параметра киральности.

Соотношения (1)-(3) представляют собой математическую модель КММ, применяемую в работе для описания слоев.

Рассмотрим распространение плоской электромагнитной волны через периодически неоднородную систему из чередующихся киральных слоев с различными значениями параметра киральности (Рисунок 1).

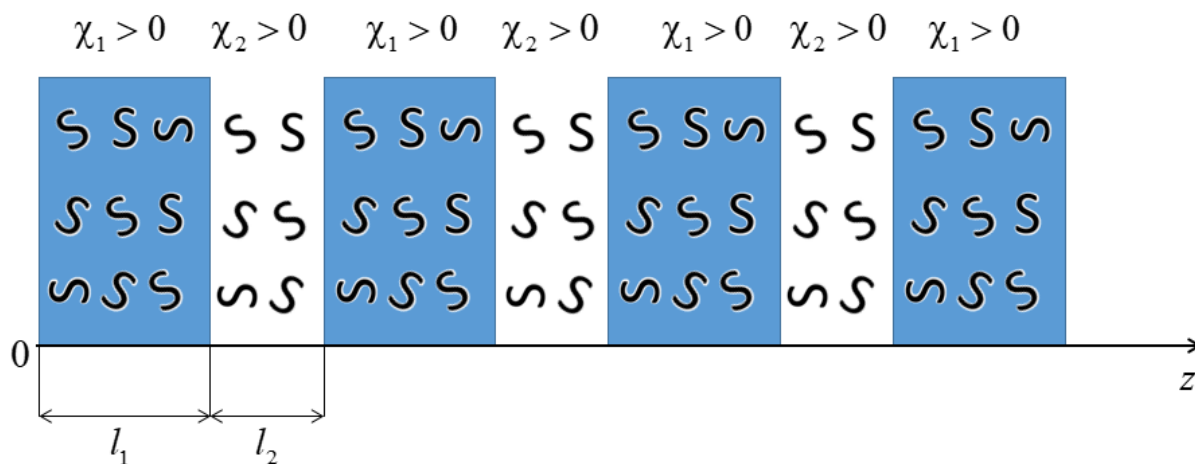


Рисунок 1 – Геометрия задачи

В первом киральном слое напряженности электрического поля волн ПКП и ЛКП определялись из уравнения Хилла [18]:

$$\frac{d^2 E_{R,L}}{dz^2} + k_1^2 (1 \pm \alpha_1 \chi_1) E_{R,L} = 0. \quad (4)$$

где $k_1 = k_0 \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$ — волновое число для плоской однородной волны в среде с параметрами ϵ_1 и μ_1 ;

$n_1 = \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$ — показатель преломления кирального слоя;

\vec{E}_R — напряженность электрического поля волны ПКП;

\vec{E}_L — напряженность электрического поля волны ЛКП; $\alpha_1 = 2/n_1$.

Для определения электромагнитного поля на отрезке $[l_2 < z < l_1 + l_2]$ была использована теорема Флоке, согласно которой для одной из двух волн решение уравнения (4) можно записать в виде [19]:

$$E_{R,L}^{(3)}(z) = F_{R,L}(z) \vec{E}_{R,L}^{(1)}(z - d), \quad (5)$$

где $F_{R,L}(z)$ — функции, периодические с периодом $d = l_1 + l_2$.

В качестве функций $F_{R,L}(z)$ удобно была выбрана гармоническую функцию вида:

$$F_{R,L}(z) = e^{i\gamma_{R,L}d}, \quad (6)$$

где $\gamma_{R,L}$ — постоянные распространения волн ПКП и ЛКП в периодически неоднородной системе, которые находятся как функции волновых чисел $\tilde{k}_1^{(R,L)} = k_0\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}\sqrt{(1 \pm \alpha_1\chi_1)}$, $\tilde{k}_2^{(R,L)} = k_0\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}\sqrt{(1 \pm \alpha_2\chi_2)}$ и толщин слоев $l_{1,2}$.

С использованием граничных условий на границах раздела слоев было получено дисперсионное уравнение для собственных волн исследуемой периодически неоднородной структуры:

$$\begin{aligned} \cos(\gamma_{R,L}d) &= \cos(\tilde{k}_1^{(R,L)}l_1)\cos(\tilde{k}_2^{(R,L)}l_2) - \\ &- \frac{(\tilde{k}_1^{(R,L)})^2 + (\tilde{k}_2^{(R,L)})^2}{2\tilde{k}_1^{(R,L)}\tilde{k}_2^{(R,L)}} \sin(\tilde{k}_1^{(R,L)}l_1)\sin(\tilde{k}_2^{(R,L)}l_2), \quad (7) \\ \tilde{k}_{1,2}^{(R,L)} &= k_0\sqrt{\varepsilon_{1,2}\mu_{1,2}}\sqrt{1 \pm \alpha_{1,2}\chi_{1,2}}; \alpha_{1,2} = 2/\sqrt{\varepsilon_{1,2}\mu_{1,2}}. \end{aligned}$$

Дисперсионные уравнения описывают собственные волны, распространяющиеся в периодически неоднородной структуре из чередующихся киральных слоев с параметрами $\{l_1, \varepsilon_1, \mu_1, \chi_1\}$ и $\{l_2, \varepsilon_2, \mu_2, \chi_2\}$. Если $\chi_1\chi_2 > 0$, то киральные слои состоят из зеркально-асимметричных элементов одного и того же типа; если же $\chi_1\chi_2 < 0$, то один киральный слой создан на основе правовинтовых, а другой — на основе левовинтовых киральных элементов.

Коэффициенты отражения и прохождения волн через структуру определяются через матрицы передачи слоев:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} T_+ \\ T_- \end{pmatrix} &= \prod_{j=1}^N \vec{Z}_j \begin{pmatrix} A_+ \\ A_- \end{pmatrix}; \quad (8) \\ R_+ &= \sqrt{1 - T_+^2}; R_- = \sqrt{1 - T_-^2}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \vec{Z}_j &= \begin{pmatrix} Z_{11j}(\omega) & Z_{12j}(\omega) \\ Z_{21j}(\omega) & Z_{22j}(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -i\frac{\chi_j(\omega)}{\varepsilon_j(\omega)} & -\frac{\sin\theta}{\varepsilon_j(\omega)} \\ -\frac{n_{cj}^2(\omega)}{\sin\theta\varepsilon_j(\omega)} & -i\frac{\chi_j(\omega)}{\varepsilon_j(\omega)} \end{pmatrix}; \\ n_{cj}^2(\omega) &= \varepsilon_j(\omega)\mu_j - \chi_j^2(\omega), \end{aligned}$$

В соотношениях (9) введены следующие обозначения: T_+, T_- — коэффициенты прохождения волн ПКП и ЛКП в область за КММ (за всеми слоями КММ); R_+, R_- —

коэффициенты отражения волн ПКП и ЛКП в область перед КММ; j — порядковый номер слоя.

На Рисунке 2 приведены дисперсионные характеристики собственных волн ПКП и ЛКП, то есть зависимости нормированных постоянных распространения $\gamma_{R,L}d$ от нормированной частоты k_0l_1 . Волны ПКП отмечены сплошными линиями; волны ЛКП — штриховыми.

Значения параметров расчета:

$$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{c2} = 2.0; \mu_1 = \mu_2 = 2.2; \chi_1 = 0.3; \chi_2 = -0.3;$$

$$\alpha_1 = 0.1; \alpha_2 = 0.1; k_0A_1 = 0.05; k_0A_2 = 0.05; k_0l_2 = 2.$$

Как видно из Рисунка 2 каждая волна в периодически неоднородной структуре разбивается на две пространственные гармоники, которые распространяются с различными фазовыми скоростями. Заметим, что в различных частотных диапазонах волны ПКП и ЛКП могут обладать как нормальной, так и аномальной дисперсией. Это следствие, периодической неоднородности структуры. Также можно заметить, что волны ПКП и ЛКП в интервалах прозрачности имеют различные постоянные распространения, причем у обеих пространственных гармоник. Как видно из Рисунка 2, в КММ существуют области прозрачности и непрозрачности структуры, которые для волн ПКП и ЛКП совпадают. Это значит, что КММ работает в двух режимах — пропускания обеих волн ПКП и ЛКП и непропускания обеих волн ПКП и ЛКП.

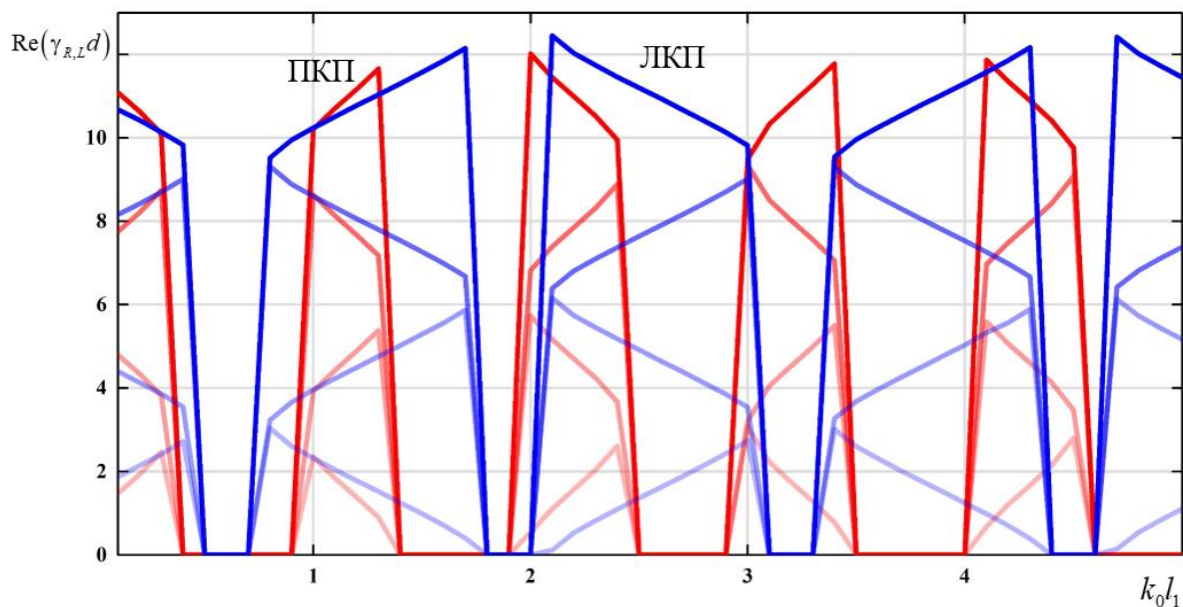


Рисунок 2 – Дисперсионные характеристики

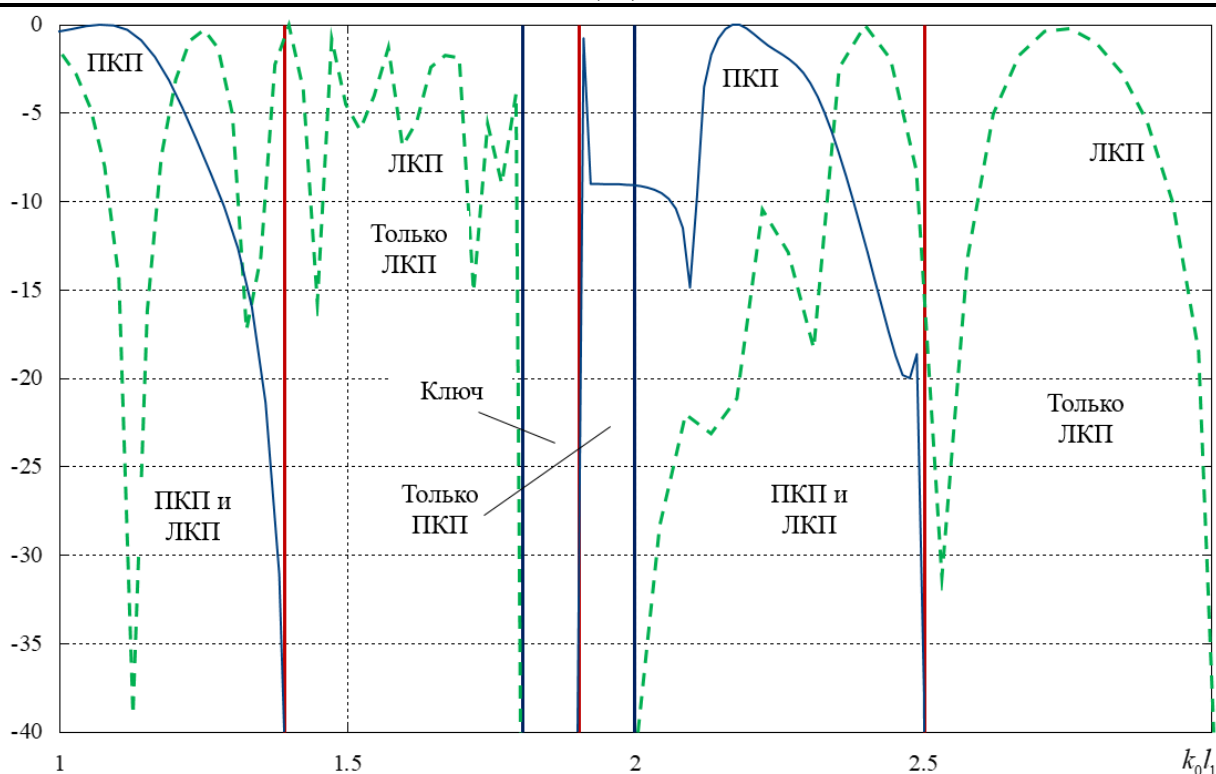


Рисунок 3 – Частотные зависимости прошедших мощностей волн ПКП и ЛКП

На Рисунке 3 приведены графики зависимостей прошедших мощностей волн ПКП и ЛКП от частоты. Сплошной линией показана зависимость $20\lg|T_+|^2$; штриховой линией — зависимость $20\lg|T_-|^2$. Как видно из рисунка 3, прошедшая мощность в интервалах непрозрачности меньше -40 дБ, что свидетельствует об отсутствии прохождения волны через КММ. Также можно отметить, что в интервалах прозрачности мощности волн ПКП и ЛКП различаются, а также наблюдается ряд локальных минимумов прохождения, связанных с резонансными частотами кирального слоя метаматериала. КММ выполняет роль полосового фильтра для одной из волн ПКП или ЛКП, а также блокирует обе волны ПКП и ЛКП. Причем для него наблюдается несколько полос непропускания волн ПКП и ЛКП.

Таким образом, рассмотренная в работе неоднородная киральная структура может служить базовым элементом при создании частотно селективных фильтров СВЧ для волн с право и левокруговыми поляризациями, при разработке экранирующих структур СВЧ в заданном частотном интервале и других устройствах, обладающим свойствами частотной и поляризационной селективности.

Список литературы

1. Физический энциклопедический словарь / Под ред. А.М. Прохорова. — М.: Большая российская энциклопедия, 1995. — 928 с.
2. Capolino F. Theory and Phenomena of Metamaterials. Boca Raton: Taylor & Francis – CRC Press, 2009. 992 p.

3. Engheta N., Ziolkowski R.W. *Metamaterials: Physics and engineering explorations*. Hoboken: Wiley, 2006. 414 p.
4. Iyer A. K., Alù A., Epstein A. *Metamaterials and Metasurfaces — Historical Context, Recent Advances, and Future Directions* // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020. V. 68. №3. P. 1223-1231. DOI: 10.1109/TAP.2020.2969732.
5. Caloz C., Itoh T. *Electromagnetic metamaterials: Transmission line theory and microwave applications. The engineering approach*. New York. Wiley Interscience, 2006.
6. 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.
7. Lakhtakia A.. *Time-harmonic electromagnetic fields in chiral media. Lecture Notes in Physics* / A. Lakhtakia, V.K. Varadan, V.V. Varadan. Berlin: Heidelberg and Boston: Springer-Verlag, 1989. 121 p.
8. Caloz C., Sihvola A. *Electromagnetic Chirality, Part 1: The Microscopic Perspective [Electromagnetic Perspectives]* // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2020. V. 62. №1. P. 58-71. DOI: 10.1109/MAP.2019.2955698.
9. Неганов В.А., Осипов О.В. *Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами*. М.: Радио и Связь, 2006. 280 с.
10. Третьяков С.А. *Электродинамика сложных сред: киральные, би-изотропные и некоторые бианизотропные материалы* // *Радиотехника и электроника*, 1994. Т.39. №10. С.1457-1470.
11. Lakhtakia A., Varadan V.V., Varadan V.K. *Field equations, Huy-gens's principle, integral equations, and theorems for radiation and scattering of electro-magnetic waves in isotropic chiral media* // *Journal of the Optical Soc. Of America*, 1988. V.5. №2. P.175-184.
12. Каценеленбаум Б.З., Коршунова Е.Н., Сивов А.Н., Шатров А.Д. *Киральные электродинамические объекты* // *Успехи физических наук*, 1997. Т.167. №11. С.1201-1212.
13. Prudêncio F.R., Silveirinha M.G. *Optical isolation of circularly polarized light with a spontaneous magnetoelectric effect* // *Phys. Rev. A.*, 2016. V.93. P.043846.
14. Semchenko I.V., Tretyakov S.A., Serdyukov A.N. *Research on chiral and bianisotropic media in Byelorussia and Russia in the last ten years* // *Progress In Electromagnetics Research*, 1996. V.12. pp. 335-370.
15. Аралкин М.В., Дементьев А.Н., Осипов О.В. *Математические модели киральных метаматериалов на основе многозаходных проводящих элементов* // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 2020. Т. 23. № 1. С. 8-19.
16. Аралкин М.В., Дементьев А.Н., Осипов О.В. *Исследование электромагнитных характеристик планарных киральных метаструктур на основе составных спиральных компонентов с учетом гетерогенной модели Бруггемана* // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 2020. Т. 23. № 3. С. 44-55.
17. Сушко М.Я., Криськив С.К. *Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем* // *Журнал технической физики*, 2009. Т.79. Вып.3. С. 97-101.

18. Осипов О.В. Распространение электромагнитных волн в периодически неоднородной структуре из чередующихся киральных слоев // Электромагнитные волны и электронные системы, 2006. №12. С.4-8.
19. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. 383 с.

References

1. Physical Encyclopedic dictionary / Edited by A.M. Prokhorov. — М.: The Great Russian Encyclopedia, 1995. — p.928
2. Capolino F. Theory and Phenomena of Metamaterials. Boca Raton: Taylor & Francis – CRC Press, 2009.p. 992
3. Engheta N., Ziolkowski R.W. Metamaterials: Physics and engineering explorations. Hoboken: Wiley, 2006.p. 414
4. Iyer A. K., Alù A., Epstein A. Metamaterials and Metasurfaces — Historical Context, Recent Advances, and Future Directions // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020. V. 68. №3. P. 1223-1231. DOI: 10.1109/TAP.2020.2969732.
5. Caloz C., Itoh T. Electromagnetic metamaterials: Transmission line theory and microwave applications. The engineering approach. New York. Wiley Interscience, 2006.
6. 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. p.291
7. Lakhtakia A.. Time-harmonic electromagnetic fields in chiral media. Lecture Notes in Physics / A. Lakhtakia, V.K. Varadan, V.V. Varadan. Berlin: Heidelberg and Boston: Springer-Verlag, 1989.p. 121
8. Caloz C., Sihvola A. Electromagnetic Chirality, Part 1: The Microscopic Perspective [Electromagnetic Perspectives] // IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2020. V. 62. No. 1. pp. 58-71. DOI: 10.1109/MAP.2019.2955698.
9. Neganov V.A., Osipov O.V. Reflecting, waveguide and radiating structures with chiral elements. M.: Radio and Communications, 2006. p. 280
10. Tretyakov S.A. Electrodynamics of complex media: chiral, bi-isotropic and non-bianisotropic materials // Radio Engineering and Electronics, 1994. Vol.39. No.10. pp.1457-1470.
11. Lakhtakia A., Varadan V.V., Varadan V.K. Field equations, Huy-gens's principle, integral equations, and theorems for radiation and scattering of electro-magnetic waves in isotropic chiral media // Journal of the Optical Soc. Of America, 1988. V.5. No.2. pp.175-184.
12. Katsenelenbaum B.Z., Korshunova E.N., Sivov A.N., Shatrov A.D. Chiral electrodynamic objects // Successes of Physical Sciences, 1997. Vol.167. No. 11. pp.1201-1212.
13. Prudêncio F.R., Silveirinha M.G. Optical isolation of circularly polarized light with a spontaneous magnetoelectric effect // Phys. Rev. A., 2016. V.93. P.043846.
14. Semchenko I.V., Tretyakov S.A., Serdyukov A.N. Research on chiral and bianisotropic media in Byelorussia and Russia in the last ten years // Progress In Electromagnetics Research, 1996. V.12. pp. 335-370.
15. Aralkin M.V., Dementyev A.N., Osipov O.V. Mathematical models of chiral metamaterials based on multi-input conducting elements // Physics of wave processes and radio engineering systems, 2020. Vol. 23. No. 1. pp. 8-19.

16. Aralkin M.V., Dementyev A.N., Osipov O.V. Research electromagnetic characteristics of planar chiral metastructures based on composite spiral components taking into account the heterogeneous Bruggeman model // Physics of wave processes and radio-technical systems, 2020. Vol. 23. No. 3. pp. 44-55.
 17. Sushko M.Ya., Kriskiv S.K. Method of compact groups in the theory of dielectric permittivity of heterogeneous systems // Journal of Technical Physics, 2009. Vol.79. Issue 3. pp. 97-101.
 18. Osipov O.V. Propagation of electromagnetic waves in a periodically inhomogeneous structure of alternating chiral layers // Electromagnetic waves and electronScientific systems, 2006. No.12. pp.4-8.
 19. Vinogradova M.B., Rudenko O.V., Sukhorukov A.P. Wave theory. M.: Nauka, 1979.p.383
-