

Том II, с. 422–425

УДК: 537.876.46

ОТРАЖЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ГРАНИЦЕ НЕОДНОРОДНОГО КИРАЛЬНОГО СЛОЯ С ДИСПЕРСИЕЙ

Н. М. Моисеева, А. В. Моисеев

Волгоградский государственный университет, 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 100
E-mail: moiseeva@volsu.ru

Аннотация. Рассматривается наклонное падение электромагнитных импульсов специальной формы на плоский неоднородный киральный слой с дисперсией и поглощением. Частота несущей гармоники для импульсов специальной формы: гауссова, гигантского и треугольного равна собственной частоте среды с дисперсией. Для расчета волн в неоднородном киральном слое применяется решение в виде матрицы Коши 4x4, полученное с помощью приближения Вентцеля-Крамера-Бриллюэна. Показано влияние киральности на кросс-поляризацию при отражении. Показано влияние дисперсии оптических свойств, а также дисперсии параметра киральности среды на форму огибающей сигналов для различных углов падения.

Ключевые слова: распространение электромагнитных волн; планарные структуры; киральные материалы; метаматериалы; матрица отражения; метод ВКБ; кросс-поляризация света; дисперсия оптических свойств; спектр сигнала; форма огибающей сигнала

REFLECTION OF OPTICAL SIGNALS ON THE BORDER OF HETEROGENEOUS CHIRAL LAYER WITH DISPERSION

N. M. Moiseeva, A. V. Moiseev

Abstract. An oblique incidence of electromagnetic pulses of a special form on a flat inhomogeneous chiral layer with dispersion and absorption had considered. The frequency of the harmonic carrier for pulses of a special form: Gaussian, giant and triangular is equal to the natural frequency of the medium with dispersion. The solution in the form of the 4x4 Cauchy matrix, obtained using the Wentzel-Kramers-Brillouin approximation, is used to calculate the waves in an inhomogeneous chiral layer. The effect of chirality on cross-polarization upon reflection is shown. The effect of the dispersion of optical properties, as well as the dispersion of the chirality parameter of the medium on the shape of the envelope of the signals for different angles of incidence, is shown.

Keywords: electromagnetic wave propagation; planar structures; chiral materials; metamaterials; reflection matrix; WKB method; cross polarization of light; dispersion of optical properties; signal spectrum; signal envelope

Введение

В настоящее время растет интерес исследователей к киральным средам. Управление поляризацией электромагнитных волн (ЭМВ) является актуальной задачей для разработки новой элементной базы фотоники, а также для развития бесконтактных оптических методов исследования биологических тканей. Возможности для «избирательного отражения круговых поляризаций света» появляются при использовании киральных материалов [1]. Благодаря субволновым структурам, включенным в метаматериал, их ориентации, взаимного относительного расположения метаповерхностей, возможно проектирование и реализация новых поляризационных и фильтрующих устройств [2]. Задача о распространении света в киральных средах актуальна для оптической микроскопии биологических тканей. Биологические ткани содержат киральные органические молекулы; это свойство, используется поляризационной микроскопией для получения изображений label-free [3], развитие математических методов процесса распространения электромагнитных волн необходимо для анализа изображений. Применение киральных материалов в устройствах для двойных изображений имеет значение для 3D дисплеев, оптической памяти и

борьбы с контрафактом [4], для управления характеристиками лазерного излучения [5]. Первая макроскопическая модель взаимодействия света и киральной среды была создана в 1920 г. [6]. В диэлектрик помещались случайно ориентированные киральные проводники, вместо видимого света использовались микроволны. Современные киральные материалы строятся по тем же принципам, но был развит математический аппарат [7], расширились области применения [1-5, 7]. При распространении электромагнитного излучения в киральной среде происходит постоянное взаимодействие волн s- и p- поляризации, поэтому стандартные методы расчета для изотропных сред становятся неприменимыми. Для расчета многослойных структур, где наблюдается кросс-поляризация света, Берреманом был разработан метод дифференциальной матрицы 4×4 ; его целью было решение проблемы отражения и пропускания холестерическими жидкими кристаллами с непрерывно меняющимся плоским упорядочением [8]. Обзор матричных методов расчета современных оптических материалов, применяемых в настоящее время, а также используемых модификаций этих методов приведен в книге [9]. Применяемые методы обычно сводятся либо к нахождению эффективных значений параметров среды: в этом случае неоднородность не учитывается, либо к разбиению неоднородной среды на множество однородных слоев: в этом случае появляются искусственные разрывы полей на границах слоев.

Целью настоящей работы является математическое моделирование отражения оптических сигналов специальной формы от границы плоского неоднородного кирального слоя. Для расчета матриц отражения киральной неоднородной среды применяется матричная форма метода Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна [10]. Данная матрица решения имеет размерность 4×4 и учитывает неоднородность среды.

Математическая модель

Будем рассматривать наклонное падение на плоский неоднородный киральный слой с дисперсией оптического сигнала в виде:

$$E^{(i)}(r, t) = \begin{pmatrix} E_p^{(i)}(r) & E_s^{(i)}(r) \end{pmatrix}^T A_t(t) \cdot \exp(i\omega_c t). \quad (1)$$

Зависимость диэлектрической проницаемости среды от частоты для одиночного резонанса [11]:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_b + \frac{\Omega_\varepsilon \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma}, \\ \mu &= \mu_b + \frac{\Omega_\mu \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma}, \\ \chi(\omega, z) &= \frac{\Omega_\chi \omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \cdot f(z). \end{aligned} \quad (2)$$

Параметры киральной среды [11], принимают следующие значения: $\varepsilon_b = 3,1738$, $\mu_b = 0,9799$, $\omega_0 = 2\pi \cdot 1,8651 \cdot 10^{12} \text{ A}^{-1}$, $\gamma = 0,05519\omega_0$, $\Omega_\varepsilon = 0,1537$, $\Omega_\mu = 0,0627$, $\Omega_\chi = 0,0986$. Толщина слоя $d = \frac{2\pi c}{\omega_c \sqrt{\varepsilon_b \mu_b}}$. Пусть $\omega_c = \omega_0$. Параметр киральности зависит от частоты и от координаты, $f(z) = \cos(\kappa z)$. Известно, что свойства среды зависят от частоты, поэтому матричные коэффициенты отражения для слоя с заданными параметрами будут функциями частоты и угла падения:

$$R(\omega, \theta_i) = \begin{pmatrix} R_{pp}(\omega, \theta_i) & R_{ps}(\omega, \theta_i) \\ R_{sp}(\omega, \theta_i) & R_{ss}(\omega, \theta_i) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Коэффициенты матрицы отражения рассчитывались с помощью матрицы Коши [10] найденной методом ВКБ. Зависимости модулей коэффициентов матрицы отражения от угла падения и $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ представлены на рис. 1. Сигнал (1) имеет огибающую $A(t)$ и спектр $S(\omega)$; спектр отраженного сигнала рассчитывается по формуле:

$$\begin{pmatrix} E_p^{(r)}(\omega, \theta_i) \\ E_s^{(r)}(\omega, \theta_i) \end{pmatrix} = R(\omega, \theta_i) \begin{pmatrix} E_p^{(i)} \cdot S(\omega) \\ E_s^{(i)} \cdot S(\omega) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Выполнив обратное преобразование Фурье, получаем s- и p- поляризованные компоненты для отраженного сигнала. Если для падающей волны $|E_p^{(i)}| = |E_s^{(i)}| = 1$ (отн. ед.), то отраженные

сигналы в форме гигантского лазерного импульса и в виде Гауссова импульса будут иметь вид, представленный на графиках рис. 2 а - б (в случае импульса в форме гигантского лазерного) и рис. 3 а - б (в случае импульса гауссовой формы).

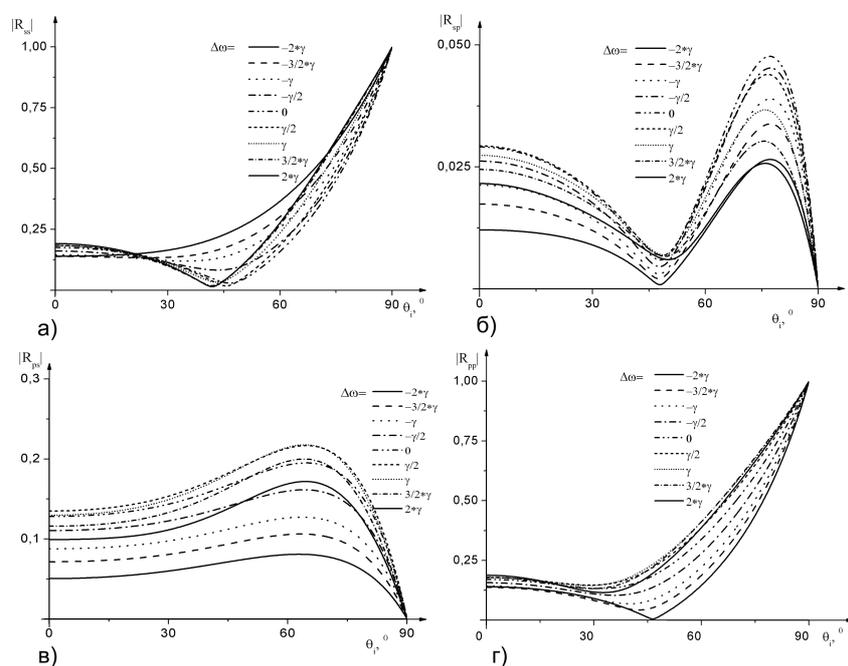


Рис. 1. Зависимость модулей коэффициентов матрицы отражения кирального неоднородного слоя с дисперсией от угла падения θ_i и $\Delta\omega$.

Расчет матричных коэффициентов отражения показал, что при отражении света от киральной среды с дисперсией происходит кросс- поляризация света, угловые спектры амплитудных коэффициентов отражения зависят от частоты ЭМВ.

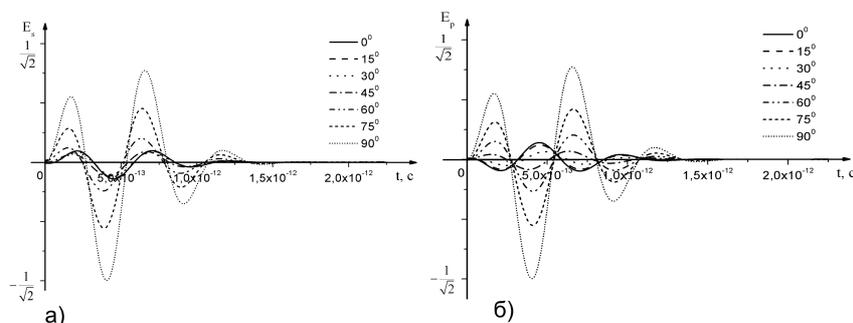


Рис. 2. Отраженный импульс, в форме гигантского лазерного, при различных углах падения для волн: а) s- поляризации, б) p- поляризации.

Расчет показал, что при отражении сигналов специальной формы от кирального неоднородного слоя с дисперсией изменяется не только амплитуда, но также фаза и длительность сигнала.

Заключение

При помощи матричного ВКБ-решения 4×4 для кирального неоднородного слоя с дисперсией получены угловые и частотные спектры коэффициентов матрицы отражения. Матричный метод ВКБ применен для расчета сигналов специальной формы отраженных на границе кирального неоднородного слоя с дисперсией.

Список литературы

1. Semnani B., Flannery J., Ding Z., Maruf R. A., Bajcsy M. Spin-Preserving Chiral Photonic Crystal Mirror // Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest. – 2019. P. FM1B.1.

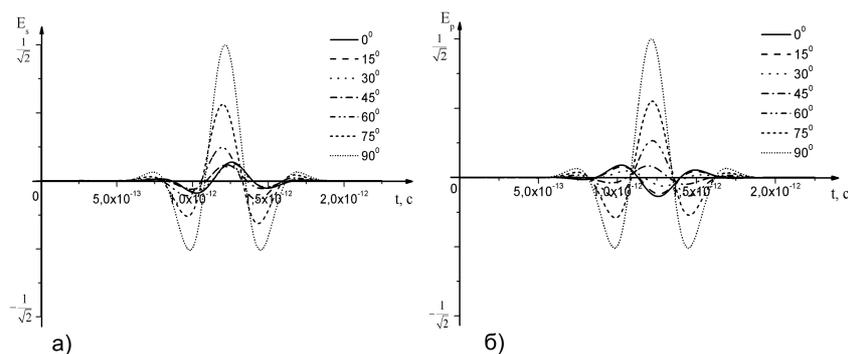


Рис. 3. Отраженный импульс гауссовой формы при различных углах падения для волн: а) s-поляризации, б) р- поляризации.

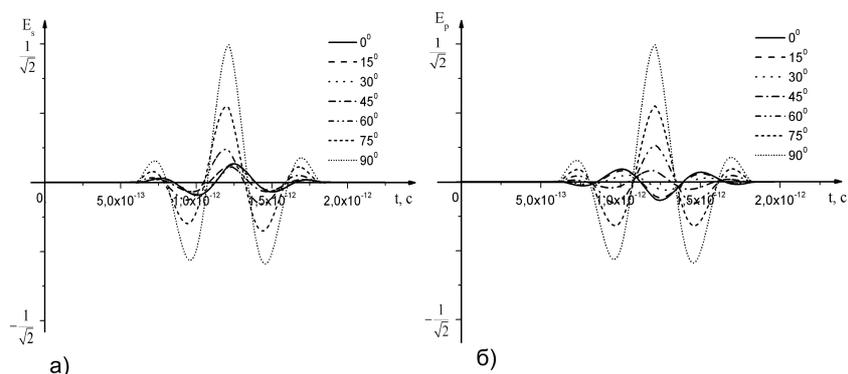


Рис. 4. Отраженный импульс треугольной формы при различных углах падения для волн: а) s-поляризации, б) р- поляризации.

2. Sperrhake J., Decker M., Falkner M., Fasold S., Kaiser T., Staude I., Pertsch T. Semi-analytic modeling of chiral metasurface stacks // Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest. – 2019. P. JTh2A.24.
3. Vettenburg T., Horsley S. A. R., Bertolotti J. Calculating coherent light-wave propagation in large heterogeneous media // Opt. Express. – 2019. – Vol. 27, P. 11946-11967.
4. Lee Sang. H., Lee Sin-H., Kim S.-U., Kang S., Lee Sin-D., Concept of chiral image storage and selection based on liquid crystals by circular polarization // Opt. Express. – 2019. – Vol. 27, P. 11661-11672.
5. Neyts K., Dadalyan T., Acker F. V., Nys I., Beeckman J. Mode coupling by scattering in chiral nematic liquid crystal ring lasing // Opt. Express. – 2019. – Vol. 27, P. 8081-8091.
6. Lindman K.F. Über eine durch ein isotropes System von Spiralförmigen Resonatoren erzeugte Rotationspolarisation der elektromagnetischen Wellen // Annalen der Physik. – 1920. – V. 63. – P. 621-644.
7. Неганов В.А. Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами. – М.: Радио и связь, 2006. – 280 с.
8. Berreman D.W. Optics in stratified and anisotropic media: 4×4 -matrix formulation // Journal of the Optical Society of America. – 1972. – V. 62(4). – P. 502-510.
9. Yakovlev D.A. Modeling and optimization of LCD optical performance. – New Delhi: John Wiley & Sons Ltd., 2015. – 555 p.
10. Moiseeva N.M., Moiseev A. V., Rudenok I. P. Matrix solution 4×4 by the Wentzel-Kramers-Brillouin method for electromagnetic waves reflected on the boundary of inhomogeneous chiral layer // Journal of Physics: Conference Series. – V. 1096. – P. 012146.
11. Zhao R., Koschny T., Soukoulis C.M. Chiral metamaterials: Retrieval of the effective parameters with and without substrate // Opt. Express. 2010; - V. 18(14). P. - 14553-67.