

УДК 548.0

О. М. Аракелян

## Эффекты оптической необратимости в средах с отрицательной компонентой диэлектрического тензора

(Представлено академиком Д.М. Седракяном 7/IX 2007)

**Ключевые слова:** *естественная гиротропия, необратимость волн, оптическая асимметрия*

1. **Введение.** Как известно, поверхности волновых векторов (ПВВ), рассматриваемые в традиционной оптике, замкнуты и центросимметричны [1,2]. Например, для одноосных кристаллов ПВВ - сфера и эллипсоид. Эти два свойства (замкнутость и центросимметричность) считаются столь естественными, что в литературе даже не упоминаются. Замкнуты не только ПВВ, но также и поверхность Френеля, характеристические поверхности (ХП) тензоров  $\epsilon_{ij}$  и  $\epsilon_{ij}^{-1}$ .

Начиная с 1960-х гг. в научной литературе рассматриваются среды, ПВВ которых по форме отличаются от вышеуказанных. В одних случаях авторы указывают на ту или иную особенность ПВВ, в других случаях ПВВ рассматриваются более обстоятельно [3-5]. Нередко ПВВ вообще не рассматриваются [6]. Эти среды, как будет показано ниже, описываются поверхностями волновых векторов с необычной для классической оптики формой. Незамкнутость и нецентросимметричность, а также другие связанные с ними особенности придают среде новые свойства, также необычные для классической оптики. Перечислим ПВВ с новыми формами:

1) замкнутые центросимметричные ПВВ со смещенным физическим центром (магнитоэлектрические среды [7]);

2) замкнутые нецентросимметричные ПВВ (естественно-гиротропные среды в присутствии магнитооптической активности [4,8]);

3) замкнутые центросимметричные инверсные ПВВ (изотропные среды с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями  $\epsilon$  и  $\mu$  [6]);

4) открытые центросимметричные ПВВ (немагнитные среды с разными знаками компонент тензора диэлектрической проницаемости [3,5]);

5) открытые нецентросимметричные ПВВ (рассмотрены ниже).

Предметом исследования в настоящей работе являются среды с замкнутой и открытой нецентросимметричной ПВВ.

**2. Среда с замкнутой нецентросимметричной ПВВ.** Такими ПВВ описываются естественно-гиротропные среды в присутствии магнитооптической активности. Нецентросимметричностью ПВВ обусловлено установленное сравнительно недавно явление необратимости волн [4,8], заключающееся в нарушении общеизвестного принципа обратимости световых лучей (т.е. одинаковости скорости света для взаимно противоположных направлений распространения). Необратимость приводит к асимметрии ряда оптических свойств, а именно, оптические характеристики становятся неодинаковыми для взаимно противоположных направлений прохождения света. Такими характеристиками являются, например, поворот плоскости поляризации, коэффициент пропускания, круговой дихроизм.

Одними из представителей естественно-гиротропных сред являются холестерические жидкие кристаллы, гиротропия которых обусловлена спиральной структурой.

В настоящей работе приведено точное решение задачи наклонного прохождения электромагнитной волны через слой холестерических жестких кристаллов (ХЖК) в присутствии внешнего магнитного поля. Отметим, что наклонное прохождение электромагнитной волны через слой со спиральной структурой рассматривалось в [9], а в присутствии магнитооптической активности - в [10]. В обоих случаях задача решена приближенно. Точное решение наклонного прохождения впервые получено в [11] в отсутствие внешнего магнитного поля, на основании метода сложения слоев Амбарцумяна [12].

Спиральные среды в присутствии внешнего магнитного поля, как известно [4], описываются материальными уравнениями

$$\mathbf{D} = \hat{\epsilon}\mathbf{E} + i[g\mathbf{E}], \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$$

где

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \bar{\epsilon} + \frac{\Delta\epsilon}{2} \cos 2az & -\frac{\Delta\epsilon}{2} \sin 2az + ig & 0 \\ \bar{\epsilon} + \frac{\Delta\epsilon}{2} \cos 2az & -\frac{\Delta\epsilon}{2} \sin 2az + ig & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$\bar{\epsilon} = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$ ,  $\Delta\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$ ,  $\epsilon_3 = \epsilon_{zz}$ ,  $\epsilon_1, \epsilon_2$  - главные значения тензора  $\epsilon_{ij}$  в плоскости  $xy$ ,  $\epsilon_3 = \epsilon_{zz}$ ,  $a = \frac{2\pi}{\sigma}$ ,  $\sigma$  - шаг спирали. Магнитную проницаемость будем считать скалярной, равной единице. Вектор  $g$ , описывающий магнитооптическую активность, направлен вдоль оси спирали (ось  $z$ ).

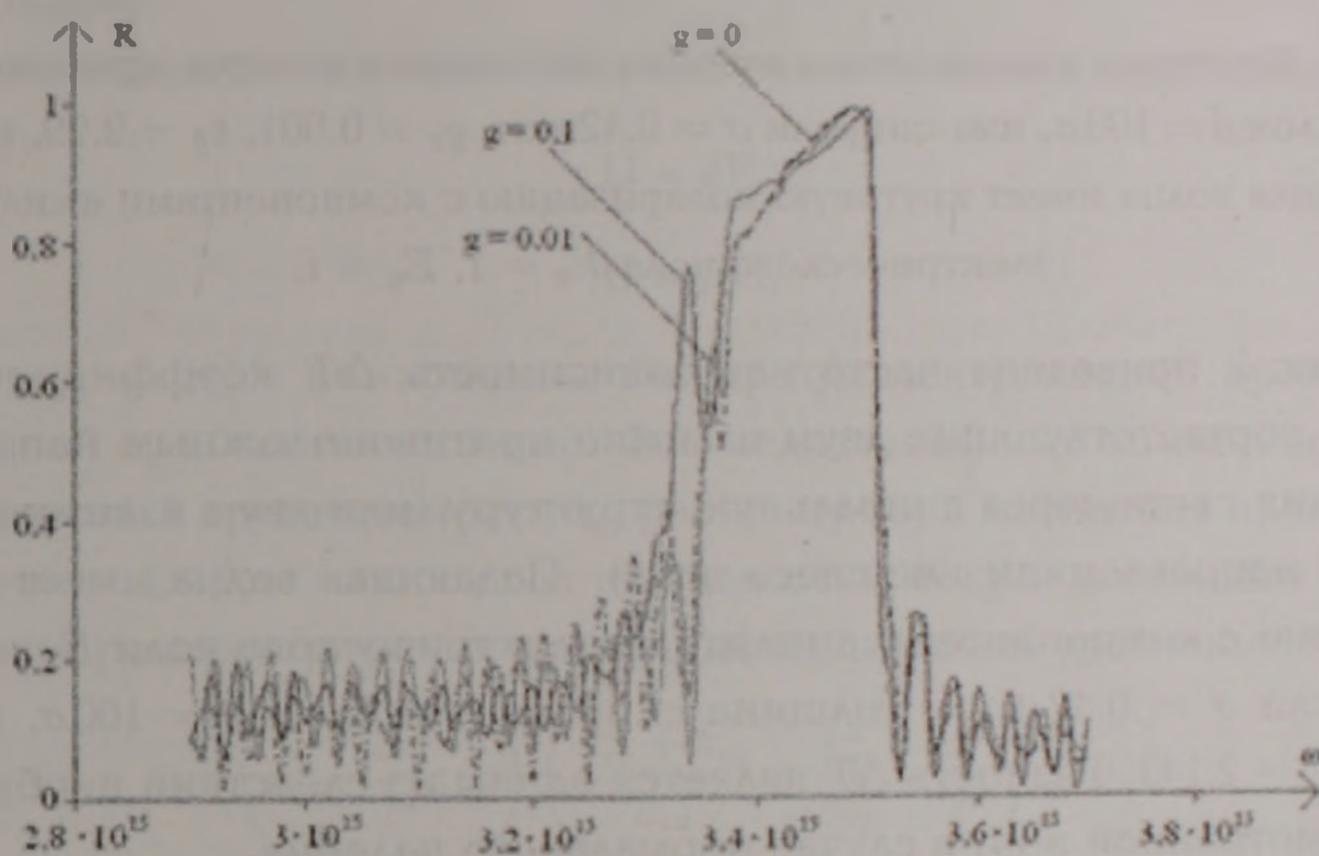


Рис. 1. Частотная зависимость энергетического коэффициента отражения  $R$  при наклонном падении ( $\theta = 45^\circ$ ) для разных значений внешнего магнитного поля. Шаг спирали  $\sigma = 0.42$  мкм,  $\epsilon_{\parallel} = 2.29$ ,  $\epsilon_{\perp} = 2.143$ , толщина спирального слоя  $d = 100\sigma$ .

На рис. 1 представлены частотные зависимости энергетического коэффициента отражения  $R$  при наклонном падении для разных значений внешнего магнитного поля. Угол падения  $\theta = 45^\circ$ .

Падающая волна имеет круговую поляризацию с компонентами амплитуды электрического поля  $E_x = 1$ ,  $E_y = i$ . Шаг спирали  $\sigma = 0.42$  мкм, компонента тензора диэлектрической проницаемости в направлении директора  $\epsilon_{\parallel} = 2.29$ , в направлениях, перпендикулярных к директору,  $\epsilon_{\perp} = 2.143$ , толщина спирального слоя  $d = 100\sigma$ .

Как видно из рис. 1 и 2, при наклонном падении наблюдается смещение области дифракционного отражения в сторону больших частот (для сравнения

см. [11]). Объяснение этому свойству при  $g = 0$ , данное в [11], остается в силе также в рассматриваемом здесь случае  $g \neq 0$ .

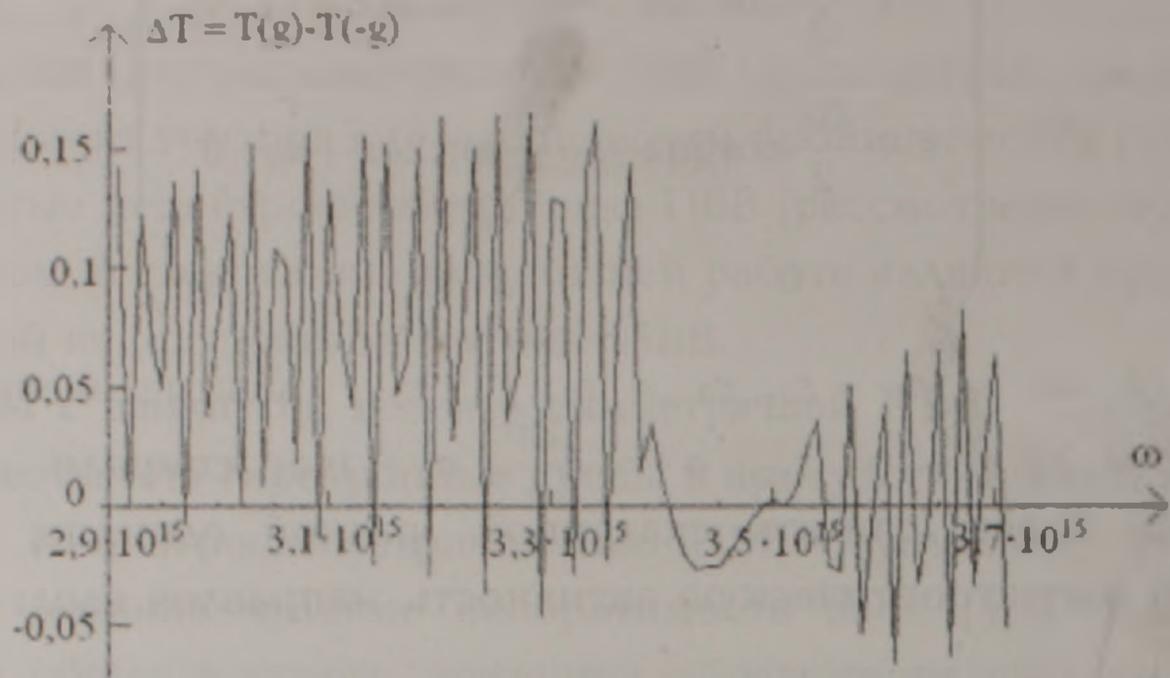


Рис. 2. Частотная зависимость разности  $\Delta T$  коэффициентов прохождения. Толщина слоя  $d = 100 \sigma$ , шаг спирали  $\sigma = 0.42 \text{ мкм}$ ,  $g_z = 0.001$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 2.29$ ,  $\epsilon_{\perp} = 2.143$ ; падающая волна имеет круговую поляризацию с компонентами амплитуды электрического поля  $E_x = 1$ ,  $E_y = i$ .

На рис. 2 приведена частотная зависимость  $\Delta T$  коэффициентов прохождения, соответствующих двум взаимно противоположным направлениям прохождения света через спиральную структуру (или двум взаимно противоположным направлениям внешнего поля). Падающая волна имеет круговую поляризацию с компонентами амплитуды электрического поля  $E_x = 1$ ,  $E_y = i$ . Шаг спирали  $\sigma = 0.42 \text{ мкм}$ , толщина спирального слоя  $d = 100 \sigma$ ,  $g = 0.001$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 2.29$ ,  $\epsilon_{\perp} = 2.143$ . Разность  $\Delta T$  является одним из следствий необратимости волн, рассмотренной в [4] в случае нормального падения.

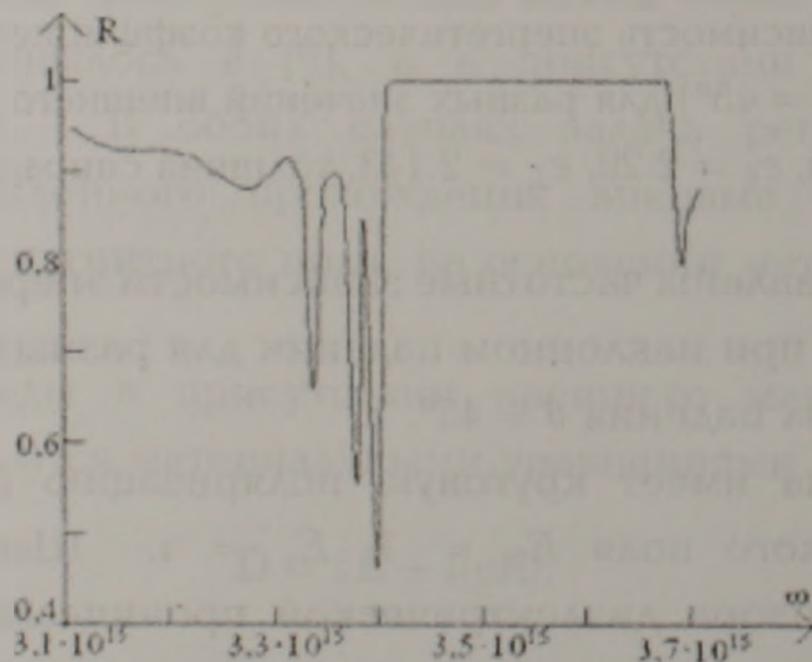


Рис. 3. Частотная зависимость энергетического коэффициента отражения  $R$  при наклонном падении ( $\theta = 45^\circ$ ), в случае  $\epsilon_{\parallel} = -2.29$ ,  $\epsilon_{\perp} = 2.143$ , шаг спирали  $\sigma = 0.42 \text{ мкм}$ ,  $d = 100 \sigma$ ,  $g_z = 0.001$ ; падающая волна имеет круговую поляризацию с компонентами амплитуды электрического поля  $E_x = 1$ ,  $E_y = i$ .

Рис. 3 соответствует случаю, когда одна из компонент тензора диэлектрической проницаемости отрицательна:  $\epsilon_{\parallel} = -2.29$ ,  $\epsilon_{\perp} = 2.143$ , угол падения  $\theta = 45^\circ$ . Падающая волна имеет ту же поляризацию, что и на рис. 2, толщина слоя  $d = 100\sigma$ ,  $g = 0.001$ . Присутствие отрицательной компоненты тензора диэлектрической проницаемости приводит к большим значениям коэффициента отражения [13].

**3. Среды с открытой нецентросимметричной ПВВ.** В работе [3] впервые были рассмотрены среды, для которых компоненты тензора диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ij}$  имеют разные знаки. В [3] показано, что если у тензора диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ij}$  кристалла имеются как положительные, так и отрицательные компоненты, то ПВВ оказываются не замкнутой поверхностью, как обычно имеет место в оптике, а открытой поверхностью - гиперболоидом.

В случае одноосного кристалла имеем материальные уравнения

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \bar{\epsilon}\mathbf{E}, \\ \mathbf{B} &= \mu\mathbf{H}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} \neq \epsilon_{zz}$  - компоненты тензора диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ij}$  вдоль осей  $x, z$ , соответственно. Все недиагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ij}$  равны нулю, а магнитная проницаемость скалярна,  $\mu = 1$ . Для таких сред зависимость модуля волнового вектора от направления распространения дается дисперсионным уравнением

$$\left(k_0^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\epsilon_{xx}\right) \left(\frac{k_{ex}^2 + k_{ey}^2}{\epsilon_{zz}} + \frac{k_{ez}^2}{\epsilon_{xx}} - \frac{\omega^2}{c^2}\right) = 0, \quad (4)$$

где  $k_0$  - модуль волнового вектора обыкновенной волны,  $k_{ex}, k_{ey}, k_{ez}$  - проекции волнового вектора необыкновенной волны на оси  $x, y, z$ ,  $\omega$  - частота волны, ось  $z$  направлена вдоль оптической оси кристалла. Если  $\epsilon_{xx} > 0$  и  $\epsilon_{zz} > 0$ , то, как видно из (4), ПВВ - сфера и эллипсоид. Если одна из компонент  $\epsilon_{ij}$  отрицательна, то эллипсоид превращается в гиперболоид (см. [5]).

Известно, что нецентросимметричность возникает в присутствии естественной гиротропии и магнитооптической активности. Поэтому при наблюдении разных знаков у компонент  $\epsilon_{ij}$  кристалл, обладающий также естественной гиротропией, в присутствии внешнего магнитного поля должен описываться открытой нецентросимметричной ПВВ. Такой кристалл описывается следующими материальными уравнениями:

$$\mathbf{D} = \bar{\epsilon}\mathbf{E} + i\gamma[\mathbf{kE}] + i[\mathbf{gE}], \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H},$$

где  $\gamma$  описывает естественную гиротропию,  $g$  - магнитооптическую активность. В этом случае дисперсионное уравнение имеет вид

$$\left(\frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_{xx} - k_0^2\right)\left(\frac{\omega^4}{c^4}\varepsilon_{xx}\varepsilon_{zz} - \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_{xx}k_x^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_{zz}k_z^2\right) - \left(\frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_{zz} - k_x^2\right)\frac{\omega^2}{c^2}(\gamma k_z + g)^2 = 0. \quad (6)$$

В уравнении (6) имеется проекция  $k_z$  волнового вектора в нечетной степени. Поэтому дисперсионное уравнение неинвариантно относительно преобразования  $k \rightarrow -k$ . Это означает, что ПВВ не обладает центром симметрии, т.е. имеет место необратимость волн.

Работа выполнена при постоянном внимании проф. О. С. Ерицяна, за что приношу ему свою благодарность.

Ереванский государственный университет

О. М. Аракелян

### Эффекты оптической необратимости в средах с отрицательной компонентой диэлектрического тензора

Рассмотрены однородные кристаллы и холестерические жидкие кристаллы (ХЖК) с отрицательной компонентой тензора диэлектрической проницаемости. Показано, что поверхность волновых векторов для однородного кристалла, будучи открытой, в присутствии естественной гиротропии и магнитооптической активности является также нецентросимметричной. Рассмотрено наклонное прохождение через магнитоактивный слой ХЖК. Приведены частотные зависимости разности коэффициентов прохождения, описывающие оптическую необратимость.

Ն. Մ. Առաքելյան

### Օպտիկական անշրջելիության էֆեկտները դիէլեկտրական թենզորի բացասական կոմպոնենտով միջավայրերում

Դիտարկված են համասեռ անիզոտրոպ միջավայրեր և խոլեստերիկային հեղուկ բյուրեղներ, որոնց դիէլեկտրական թափանցելիության թենզորի կոմպոնենտներից մեկը բացասական է: Տույց է տրված, որ ալիքային վեկտորների մակերևույթները լինելով բաց, բնական գիրոտրոպիայի և մագնիսաօպտիկական ակտիվության առկայության դեպքում նաև անկենտրոնահամաչափ են: Բերված գծանկարը արտահայտում է անցման գործակիցների տարբերության կախումը հաճախությունից թեթև անցման դեպքում, որն էլ նկարագրում է օպտիկական անշրջելիությունը:

## Effects Optical Irreversibility in Media with the Negative Component of the Dielectric Tensor

The homogeneous crystals and cholesteric liquid crystals (CLC) at the presence of negative components of the dielectric permittivity tensor are considered. It is shown that the surface of wave vectors for a homogeneous crystal, being open, at the presence of a natural gyrotropy and magneto - optical activity is also non-centrosymmetric. The oblique passing through a magnetoactive layer of CLC is considered. The frequency dependences of a difference of transmission coefficients describing the optical irreversibility are presented.

### Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М. Наука. 1982.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М. Наука. 1970.
3. Ерицян О.С. - Кристаллография. 1978. Т. 33. С. 461.
4. Ерицян О.С. Оптика гиротропных сред и холестерических жидких кристаллов. Ереван. Айастан. 1988.
5. Ерицян О.С., Аракелян О.М. - Изв. НАН Армении. Физика. 2003. Т. 38. С. 312.
6. Веселаго В.Г. - УФН. 1967. Т. 92. С. 517.
7. Любимов В.Н. - Кристаллография. 1968. Т. 13. С. 1008.
8. Ерицян О.С. - Изв. АН Арм.ССР. Физика. 1968. Т. 3. С. 217.
9. Беляков В.А., Сонин А.С. Оптика холестерических жидких кристаллов. М. Наука. 1982.
10. Киеня В.А., Семченко И.В. - Кристаллография. 1994. Т. 39. С. 514.
11. Ерицян О.С., Папоян А.А., Аракелян О.М. - Изв. НАН Армении. Физика. 2005. Т. 40. С. 346.
12. Амбарцумян В.А. Научные труды, т. I. Ереван, Изд. АН Арм.ССР. 1960.
13. Ерицян О.С., Папоян А.А., Аракелян О.М., Лалаян А.А., Костанян Р.Б. - Изв. НАН Армении. Физика. 2006. Т. 41. С. 178.