

СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ СЛОИСТОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ С ХАОТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2007 г. Г. В. Симоненко, канд. физ.-мат. наук; Р. А. Моренко; В. В. Тучин, доктор физ.-мат. наук

Саратовский государственный университет, г. Саратов

E-mail: simonenko@optics.sgu.ru

Методом компьютерного моделирования проведено исследование оптических характеристик слоистой анизотропной среды со случайной ориентацией оптических осей структурных элементов. Показано существование областей селективного отражения такой среды при определенном наборе физических параметров образца.

Коды OCIS: 050.1970.

Поступила в редакцию 11.05.2006.

Введение

Оптические характеристики слоистых анизотропных сред с упорядоченной ориентацией оптических осей структурных элементов, к которым в первую очередь относятся ориентированные образцы различных жидкокристаллических структур, изучены достаточно хорошо [1–3]. Например, однородный образец холестерического жидкого кристалла при нормальном падении на него света проявляет свойства спектрального или поляризационного фильтра благодаря объемной дифракции Брэгга–Вульфа [1]. Кроме этого в оптической технике применяются поляризационные фильтры Шольца [4], которые представляют собой набор одноосных пластин, оптические оси которых лежат все в одной плоскости и повернуты относительно друг друга на определенный угол. Возникает вопрос: какими оптическими характеристиками будет обладать анизотропная слоистая структура, в которой оптические оси элементов ориентированы относительно друг друга хаотическим образом? Такие структуры подобны неориентированным образцам жидкого кристалла, а также биологическим материалам, мало рассеивающим свет. В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования оптических характеристик анизотропных слоистых сред со случайной ориентацией оптических осей структурных элементов.

Метод расчета оптических характеристик

Как правило [2–8], для точного численного расчета спектров пропускания и отражения слоистых плоскопараллельных анизотропных сред используется метод комплексных матриц 4×4 , часто именуемый методом Берремана [2]. Вычисление оптических характеристик такого материала базируется на методе, предложенном в работах [3, 8]. Согласно

этим работам коэффициенты пропускания и отражения света можно найти, используя соотношение

$$\Psi_t(L) = P(L, 0)(\Psi_i(0) + \Psi_r(0)), \quad (1)$$

$$\text{где } \Psi = \begin{bmatrix} E_x \\ H_y \\ E_y \\ -H_x \end{bmatrix} \text{ — вектор-столбец световой волны, ко-}$$

торая распространяется в некотором направлении, составляющем произвольный угол с осью Z декартовой системы координат XYZ , выбранной таким образом, что ось Z перпендикулярна поверхности образца. Индексы t , i и r относятся к векторам для прошедшей, падающей на образец и отраженной от него световым волнам соответственно. Матрица распространения $P(L, 0)$, характеризующая анизотропную слоистую среду, вычисляется стандартным образом — путем разбиения всего неоднородного анизотропного образца на квазиоднородные слои. В этом случае $P(L, 0)$ записывается в виде

$$P(L, 0) = \prod_{i=1}^n P_i(z_i, z_{i-1}), \quad (2)$$

где L — толщина всего образца анизотропной среды, $P_i(z_i, z_{i-1})$ — матрица распространения однородного анизотропного слоя толщиной $h = z_i - z_{i-1}$. Следуя работе [7], матрицу распространения для однородного анизотропного слоя можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} P_i(z_i - z_{i-1}) = \\ = I - j \frac{\omega h}{c} \Delta - \frac{(\omega h)^2}{2c^2} \Delta^2 + j \frac{(\omega h)^3}{3!c^3} \Delta^3 + \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где I — единичная 4×4 -матрица, j — мнимая единица, ω — циклическая частота света, c — скорость све-

та в вакууме, Δ – дифференциальная 4×4 -матрица распространения для однородной одноосной пластины [7].

Решая уравнение (1) относительно $\psi_i(L)$, можно найти пропускание света через такую систему. Если на образец падает когерентный свет, характеризующийся p - и s -компонентами, то его пропускание можно определить некогерентно, складывая пропускания соответствующих поляризаций. Аналогично решая ту же систему уравнений относительно $\psi_i(L)$, можно определить коэффициент отражения света для такой структуры. Если на образец падает некогерентный свет, то коэффициенты пропускания и отражения вычисляются путем усреднения по нескольким близким длинам волн.

Результаты

На рис. 1–4 представлены результаты компьютерного моделирования оптических характеристик анизотропной среды в зависимости от физических постоянных образца: оптическая анизотропия Δn (разность между показателями преломления необыкновенной и обыкновенной волн), интервал углов разориентации оптических осей структурных элементов образца α и толщина образца L . В расчетах считалось, что показатель преломления для обыкновенного луча равен 1,46. Под интервалом углов разориентации оптических осей образца понимается разброс азимутальных углов ориентации оптических осей структурных элементов. При этом считалось, что величина этого угла равна случайному числу из интервала $0-\alpha$, величина α изменялась в пределах от 0 до 90° , а все оптические оси структурных элементов находятся в одной плоскости, которая параллельна поверхности образца. Все вычисления проводились для образца, в котором число структурных элементов равно 1000. В качестве оптических характеристик нами рассматривались спектры отражения и пропускания среды и средние по спектру коэффициенты отражения R и пропускания T , которые определялись с помощью известных выражений [5]

$$R = \frac{\int_{380}^{800} R(\lambda) D(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{800} D(\lambda) d\lambda}, \quad T = \frac{\int_{380}^{800} T(\lambda) D(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{800} D(\lambda) d\lambda},$$

где $R(\lambda)$, $T(\lambda)$ – спектральные коэффициенты отражения и пропускания образца соответственно, $D(\lambda)$ – спектр излучения источника.

Как видно из рис. 1, оптическая анизотропия образца влияет на величину его коэффициентов про-

пускания и отражения немонотонным образом, что объясняется зависимостью многолучевой интерференции, возникающей в слоистой среде от величины Δn . При больших значениях анизотропии образца коэффициент отражения резко возрастает, что объясняется увеличением отражения на границах раздела сред с различными значениями показателей преломления, обусловленными различной ориентацией оптических осей структурных элементов среды. С другой стороны, из рис. 2 видно, что с ростом интервала углов разориентации оптических осей коэффициент отражения образца растет, а коэффициент пропускания падает. Это также объясняется увеличением отражения на границах раздела сред с различными значениями показателей преломления, обусловленными различной ориентацией оптических осей структурных элементов среды.

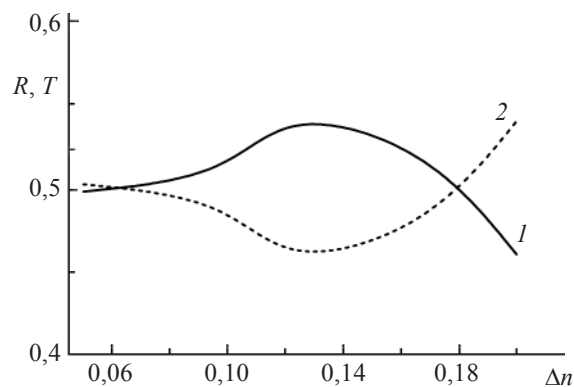


Рис. 1. Зависимости среднего пропускания I и среднего отражения 2 от анизотропии образца при угле разориентации оптических осей 90° .

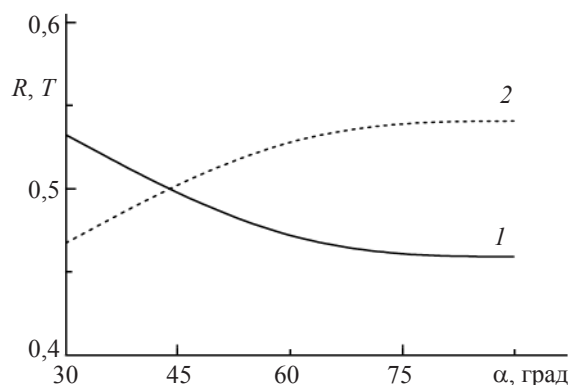


Рис. 2. Зависимости коэффициентов среднего пропускания I и среднего отражения 2 от интервала углов хаотической ориентации при оптической анизотропии 0,2.

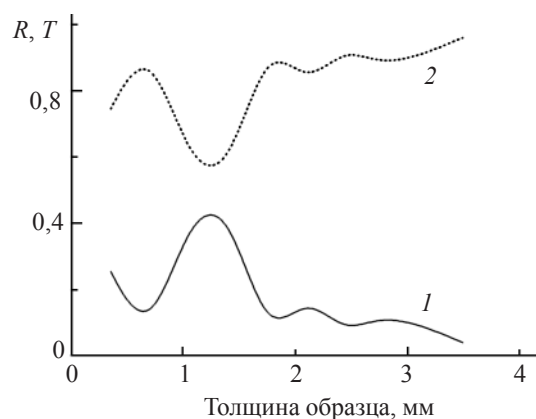


Рис. 3. Зависимости среднего пропускания I и среднего отражения 2 от толщины образца при угле разориентации оптических осей 90° и оптической анизотропии $0,2$.

Зависимости коэффициентов пропускания и отражения от толщины образца, представленные на рис. 3, носят осциллирующий характер с уменьшающейся амплитудой. Осциллирующий характер этих зависимостей объясняется многолучевой интерференцией света в слоистой среде, когда интенсивность света, отраженного от образца или прошедшего через него, в общем случае определяется функцией $\cos^2\delta$, где δ – фазовый набег интерферирующих волн прямо пропорционален толщине образца. Уменьшение же коэффициента пропускания (в среднем) связано с увеличением отражения от границ раздела слоистой среды с ростом толщины образца, так как увеличение толщины образца однозначно связано с ростом числа слоев в среде. Аналогично объясняется и рост коэффициента отражения (в среднем) от толщины образца. С точки зрения прикладного аспекта полученных данных интересным является спектральная зависимость коэффициента отражения (пропускания) при различных толщинах образца, которые показаны на рис. 4. Как следует из этого рисунка, существуют такие толщины слоистой анизотропной среды с хаотической ориентацией оптических осей, при которых ее коэффициент отражения близок к 1 во всем видимом диапазоне, что отличает эту структуру от других типов интерференционных фильтров. Таким образом, можно говорить, что подобная структура может быть использована в качестве широкополосного фильтра во всем видимом диапазоне длин волн света. При этом следует заметить, что ширина полосы отражения и положение максимума отражения в основном определяется толщиной слоистой анизотропной среды со случайной ориентацией оптических осей структурных элементов.

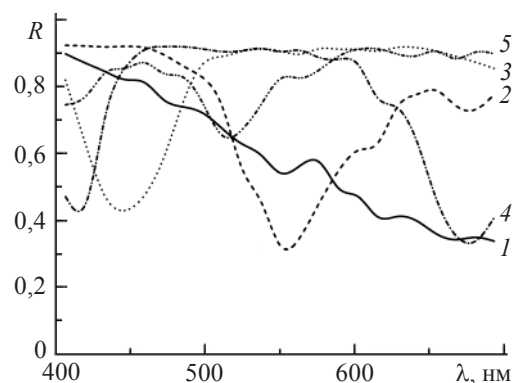


Рис. 4. Спектры отражения от слоистой анизотропной среды для различных значений толщины образца при угле разориентации оптических осей 90° и оптической анизотропии $0,2$. 1 – толщина образца $1,05$, 2 – $1,4$, 3 – $1,75$, 4 – $2,45$, 5 – $2,8$ мм.

Заключение

Методом компьютерного моделирования проведено исследование оптических характеристик слоистой анизотропной среды со случайной ориентацией оптических осей структурных элементов. Найдено, что при определенном наборе физических параметров образца существует область селективного отражения такой среды, ширина которой может быть равна всему видимому диапазону длин волн света. Ширина области селективного отражения и положение максимума отражения в основном определяется толщиной слоистой анизотропной среды со случайной ориентацией оптических осей структурных элементов.

Работа выполнена в рамках Тематического плана научно-исследовательских работ СГУ по заданию Федерального агентства по образованию РФ № 1.4.06 и в рамках Аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)” РФ (код проекта РНП.2.1.1.4473).

ЛИТЕРАТУРА

1. Де Жен П. Жидкие кристаллы. М.: Мир, 1981. 312 с.
2. Berreman D.W. Optics in stratified and anisotropic media: 4x4 matrix formulation // JOSA. 1972. V. 62. P. 502–510.
3. Сухариев А.С., Симоненко Г.В., Куйбарова В.А. Влияние параметров поляроидов на электрооптические характеристики и параметры ЖКИ на твист-эффекте // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1989. В. 4(127). С. 28–30.
4. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.

5. Chigrinov V., Kwok H.S., Yakovlev D., Simonenko G., Tsoy V. LCD optimization and modeling // J. Soc. Inf. Display. 2004. V. 12. P. 183–187.
 6. Chigrinov V., Podyachev Yu., Simonenko G., Yakovlev D. The Optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE – LCD software // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2000. V. 351. P. 17–25.
 7. Аззам Р., Башира Н. Эллипсометрия и поляризованный свет // М.: Мир, 1981. 584 с.
 8. Цой В.И. Методика расчета оптических свойств жидкокристаллических индикаторов, работающих на основе двулучепреломления закрученных структур // Тез. докл. 5-ой конф. соц. стран по жидким кристаллам. Одесса, 10–15 октября 1983 г. Т. 1. Ч. 2. С. 84.
-