

# Спектр отражения холестерического жидкого кристалла с дефектами структуры

А. В. Шабанов, С. Я. Ветров<sup>\*1)</sup>, А. Ю. Карнеев

Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения РАН, 660036 Красноярск, Россия

<sup>\*</sup> Красноярский государственный технический университет, 660074, Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 17 мая 2004 г.

После переработки 22 июня 2004 г.

Получено выражение для коэффициента отражения света круговой поляризации, нормально падающего на пленку холестерического жидкого кристалла с непостоянным шагом спирали. Показано, что в случае одного дефекта (локального изменения шага спирали) в спектре отражения света от холестерика возникает провал, соответствующий дефектной моде. Новые качественные особенности в спектре отражения холестерика проявляются, в случае двух дефектов структуры, при изменении расстояния между ними.

PACS: 61.72.Ji, 78.20.Jq, 78.66.–w

В диэлектрических средах, известных как фотонные кристаллы (ФК), с периодическим изменением диэлектрических свойств на пространственном масштабе порядка оптической длины волны может быть реализован принципиально новый электромагнитный эффект. Это явление локализации света в дефектных модах с дискретными частотами, лежащими в запрещенных зонах невозмущенного фотонного кристалла [1, 2]. Дефектные моды могут использоваться при создании узкополосных фильтров [3, 4], для информационных и коммуникационных технологий [5, 6], для низкопороговых лазеров [7]. В последнее время вызывают интерес холестерические жидкие кристаллы (ХЖК), которые являются одномерными ФК с фотонной запрещенной зоной для света, распространяющегося вдоль оси спирали ХЖК с круговой поляризацией, совпадающей со знаком холестерической спирали [8]. Световые волны с противоположной круговой поляризацией проходят через среду холестерика почти без изменения. Для ХЖК предложены два способа введения дефекта: тонкий слой изотропного вещества, внедренный между двумя слоями холестерика [9], и дефект, вызванный фазовым скачком холестерической спирали на границе раздела двух слоев пленки холестерического полимера [10]. Экспериментальное доказательство того, что в ХЖК дефектная мода может быть индуцирована введением фазового скачка спирали, приведено в [11].

В данной работе исследуется спектр отражения ХЖК с дефектом нового типа – локальным изменением шага спирали. Изучены также особенности в

спектре отражения холестерика с двумя дефектами структуры в зависимости от расстояния между ними. Рассматриваемая нами структура представляет собой пленку ХЖК, на толщине которой укладывается  $N$  шагов спирали, а внешняя среда изотропна и характеризуется усредненным показателем преломления для исследуемого холестерика  $n = \frac{1}{2}(n_{\parallel} + n_{\perp})$ . Предполагается, что локально шаг спирали может отличаться от шага идеального ХЖК  $P$ , соразмерного с длиной волны света. Будем считать структуру правовращающей, а свет, поляризованный по кругу вправо, нормально падает на пленку и распространяется вдоль оси спирали. Геометрия задачи, заданная выше, позволяет адаптировать для наших целей простой метод исследования, развитый для дифракции рентгеновских лучей в идеальных кристаллах, который с успехом использовался для описания спектра отражения идеально организованного ХЖК [12]. В общем случае поставленная задача имеет решение в рамках строгого подхода, основанного на теории электромагнетизма с использованием метода, развитого для описания оптических свойств неоднородных анизотропных слоистых сред [13]. Однако в рассматриваемом случае, когда свет падает нормально к поверхности пленки и распространяется вдоль оси спирали, решение задачи упрощается. Результаты же расчетов коэффициента отражения, выполненные для идеального холестерика, в случае отсутствия диэлектрических границ, по динамической теории дифракции (рис.1) и в рамках строгого подхода, основанного на теории электромагнетизма, практически совпадают [8, 12]. Кроме того, когда внешняя среда вне хо-

<sup>1)</sup>e-mail: chery@escapenet.ru

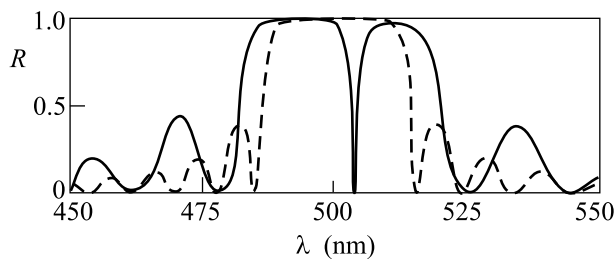


Рис.1. Зависимость коэффициента отражения от длины волны при нормальном падении света на ХЖК. Штриховая кривая соответствует идеальной структуре, сплошная – структуре с дефектом. Параметры идеального ХЖК:  $n = 1.5$ ,  $\delta n = 0.07$ ,  $\lambda_0 = nP = 500$  нм, толщина пленки  $25P$ . Толщина дефектного шага спирали, расположенного в центре среды,  $P_D = 0.8P$

лестерика изотропна с показателем преломления для исследуемого холестерика  $n = \frac{1}{2}(n_{\parallel} + n_{\perp})$ , френелевское отражение от поверхности пленки и интерференционные полосы от граничных поверхностей слабые. Экспериментально такие условия осуществить легко. В рамках динамической модели отражение света от холестерика определяется только дифракцией на его структуре, что позволяет корректно исследовать влияние дефектов на спектры отражения. Динамическая теория не применима для очень малых толщин пленки или если расстояние, на котором амплитуда падающей волны уменьшается в  $e$  раз,  $l = Pn / \pi \delta n$ , где  $\delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$  – двулучепреломление квазинематического слоя, сравнимо с шагом спирали.

Будем считать далее, что ХЖК состоит из неэквидистантных параллельных плоскостей, отстоящих одна от другой на расстоянии, равном шагу спирали, изменяющемуся вдоль оси спирали. То есть, каждая плоскость заменяет собой  $m$  слоев, амплитудный коэффициент отражения плоскости имеет вид [12]

$$r = -iQ = -i\pi\delta n/n. \quad (1)$$

Для учета эффекта многократных отражений от плоскостей необходимо записать разностные уравнения. Пусть  $A_l$  и  $B_l$  – комплексные амплитуды падающей и отраженной волн в точке непосредственно над  $l$ -й плоскостью, тогда разностные уравнения в случае холестерика с непостоянным шагом спирали имеют вид

$$\begin{aligned} B_l &= -iQA_l + \exp(-i\varphi_l)B_{l+1}, \\ A_{l+1} &= \exp(-i\varphi_l)A_l - iQ\exp(-2i\varphi_l)B_{l+1}, \\ l &= 0, 1, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (2)$$

где разность фаз  $\varphi_l$ , которая возникает при прохождении расстояния между плоскостями, имеет вид

$\varphi_l = 2\pi nP_l/\lambda$  [12]; здесь  $\lambda$  – длина волны света в вакууме,  $P_l$  – шаг спирали, соответствующий  $l$ -й плоскости. Заметим, что (2) сводится к разностным уравнениям идеального ХЖК [12], если опустить индекс  $l$  в выражении для разности фаз  $\varphi_l$ . При выводе (2) мы считали коэффициент отражения одинаковым с обеих сторон плоскости.

Система уравнений (2) может быть представлена как матричное уравнение:

$$\begin{pmatrix} B_l \\ A_l \end{pmatrix} = \hat{T}_l \begin{pmatrix} B_{l+1} \\ A_{l+1} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

здесь трансфер-матрица имеет вид

$$\hat{T}_l = \begin{pmatrix} e^{-i\varphi_l} & -iQe^{i\varphi_l} \\ iQe^{-i\varphi_l} & e^{i\varphi_l} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Из (3) следует, что амплитуды  $A_0$ ,  $B_0$  связаны с  $A_N$  и  $B_N$  следующим образом:

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \hat{M} \begin{pmatrix} B_N \\ A_N \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где

$$\hat{M} = \hat{T}_0, \hat{T}_1, \dots, \hat{T}_{N-1}. \quad (6)$$

Энергетический коэффициент отражения  $R(\lambda)$  определяется при условии, что отсутствует отражение с правой стороны образца ХЖК, выражением

$$R(\lambda) = \left| \left( \frac{A_0}{B_0} \right)_{B_N=0} \right|^2. \quad (7)$$

Используя (5), получаем:

$$R(\lambda) = \left| \frac{M_{12}}{M_{22}} \right|^2, \quad (8)$$

где  $M_{12}$ ,  $M_{22}$  – элементы матрицы  $\hat{M}$ .

Исследуем теперь особенности спектра отражения ХЖК с одним и двумя дефектами структуры с помощью численного решения уравнения для коэффициента отражения (8) при вариации параметров ФК. В дальнейшем параметры затравочной структуры, удовлетворяющие условиям применимости динамической модели, полагаем такими же, как и в [12] при исследовании идеальной пленки ХЖК толщиной  $25P$ :  $n = 1.5$ ,  $\delta n = 0.07$ ,  $\lambda_0 = nP = 0.5$  мкм.

На рис.1 приведена зависимость коэффициента отражения ХЖК пленки от длины волны, изменяющейся в диапазоне существования запрещенной зоны, для идеальной ХЖК пленки и в случае, если шаг

спирали в центре пленки уменьшен по сравнению с шагом идеальной структуры и равен  $0.8P$ . Границы спектрального диапазона запрещенной зоны идеального холестерика определяют длины волн  $\lambda_1 = 485$  нм и  $\lambda_2 = 515$  нм. Значение коэффициента отражения для ХЖК без дефекта в полосе селективного отражения достигает единицы и уменьшается с уменьшением, как толщины пленки, так и анизотропии холестерика  $\delta n$ . Как видно из рисунка, в центре запрещенной зоны возникает провал, обусловленный дефектом структуры, а ширина запрещенной зоны ХЖК с дефектом возросла по сравнению с шириной зоны идеального холестерика. Осцилляции коэффициента отражения по мере удаления длины волны от области селективного отражения обусловлены дифракцией света на ограниченном объеме, и для полуограниченного пространства, занятого холестериком, такие осцилляции коэффициента отражения отсутствуют [12].

Спектр отражения ХЖК с двумя одинаковыми дефектами структуры при различных расстояниях между ними приведен на рис.2. Рисунок демонстрирует, что по мере увеличения расстояния

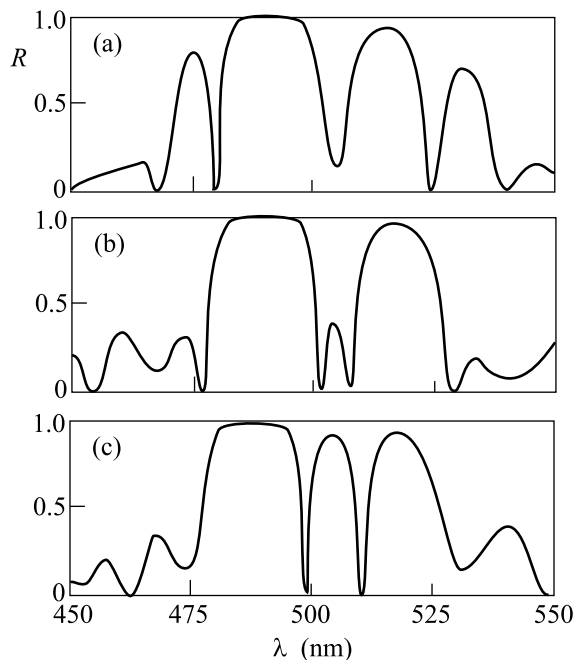


Рис.2. Зависимость коэффициента отражения от длины волны при нормальном падении света на ХЖК с двумя одинаковыми дефектами структуры. Значения параметров идеальной структуры те же, что для рис.1; расстояние между дефектами, симметрично расположенными относительно центра пленки: (a)  $13P$ , (b)  $9P$ , (c)  $5P$ .

между дефектами или, иначе, при уменьшении взаимного влияния электромагнитных мод, локализованных на дефектах, спектр отражения качественно меняется. В области селективного отражения два провала, индуцируемые дефектами, сливаются в один, то есть возникает вырождение частот электромагнитных мод, локализованных на дефектах, меняются положения границ спектрального диапазона запрещенной зоны. Существенное изменение претерпевают осцилляции коэффициента отражения для длин волн вблизи области селективного отражения, например, для длин волн меньших 480 нм и больших 525 нм на рис.2а.

На рис.3 приведен спектр отражения ХЖК с двумя различными дефектами с шагом спирали  $0.8P$  и шагом  $0.9P$ . Дефекты относительно центра пленки

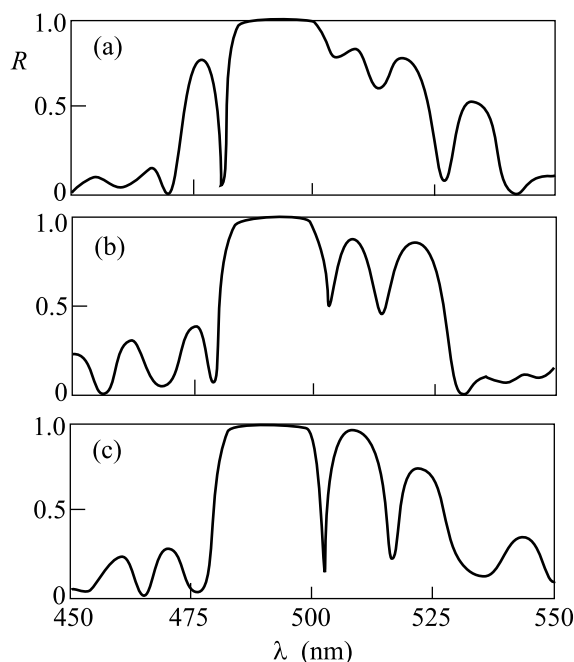


Рис.3. Зависимость коэффициента отражения от длины волны при нормальном падении света на ХЖК с двумя разными дефектами структуры:  $0.8P$ ,  $0.9P$ . Значения остальных параметров те же, что для рис.2

ки удалены на практически равные расстояния, такие же как и в случае двух одинаковых дефектов (рис.2). Из рисунка видно, что провалы в полосе селективного отражения не сливаются при разнесении дефектов вплоть до расстояния, равного  $13P$  (рис.3а). То есть не возникает вырождения частот дефектных мод. Кроме того, как видно из сравнения рисунков 3b, 3c и 2b, 2c, глубины провалов меньше для ХЖК с разными дефектами. Это основные особенности, которые отличают эти спектры от спектров отражения,

приведенных на рис.2, указывающих на резонансный характер взаимного влияния электромагнитных дефектных мод в холестерике с одинаковыми дефектами.

Работа выполнена при частичном финансировании по грантам Президиума РАН # 8.1, ОФН РАН # 2.10.2, ККФН # 12F0094С, интеграционному проекту СО РАН # 18, молодежному проекту СО РАН # 14.

1. E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).
2. J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals*, Princeton Univ., Princeton, 1995.
3. E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, R. D. Meade et al., Phys. Rev. Lett. **67**, 3380 (1991).
4. С. Я. Ветров, А. В. Шабанов, ЖЭТФ **120**, 1126 (2001).
5. А. М. Желтиков, УФН **172**, 743 (2002).
6. С. О. Коноров, О. А. Колеватова, А. Б. Федотов и др., ЖЭТФ **123**, 975 (2003).
7. O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer et al., Science **284**, 1819 (1999).
8. В. А. Беляков, А. С. Сонин, *Оптика холестерических жидких кристаллов*, М.: Наука, 1982.
9. Y-C. Yang, C-S Kee, J-E Kim et al., Phys. Rev. **E60**, 6852 (1999).
10. V.I. Kopp and A. Z. Genack, Phys. Rev. Lett. **89**, 033901 (2002).
11. J. Schmidtke, W. Stille, and H. Finkelmann, Phys. Rev. Lett. **90**, 083902 (2003).
12. С. Чандрасекар, *Жидкие кристаллы*, М.: Наука, 1980 [S. Chandrasekhar, *Liquid Crystals*, Cambridge University Press, 1977].
13. С. П. Палто, ЖЭТФ **119**, 638 (2001).