УДК 548.0

ЯЧЕЙКА НЖК-ХЖК-НЖК КАК ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫЙ ВРАЩАТЕЛЬ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

А.А. $ГЕВОРГЯН^1$, К.Б. $ОГАНЕСЯН^2$

¹Ереванский государственный университет, Армения

²Ереванский физический институт им. А.И. Алиханяна

(Поступила в редакцию 17 февраля 2010 г.)

Рассмотрено жидкокристаллическое оптическое устройство, сделанное из оптически анизотропной гетероструктуры. Устройство состоит из слоя холестерического жидкого кристалла (ХЖК), сэндвиченного с обеих сторон одинаковыми фазосдвигающими анизотропными слоями нематического жидкого кристалла (НЖК). В данной структуре слои НЖК являются четвертьволновыми пластинками. Задача решена модифицированным методом сложения слоев Амбарцумяна и методом матриц Мюллера. Исследованы особенности спектров отражения, собственных поляризаций, вращения плоскости поляризации и эллиптичности поляризации. Показано, что данное устройство может работать как модулятор света, как система для получения линейно-поляризованного света с электрически управляемым вращением плоскости поляризации (что особенно важно для оптической связи), а также как устройство для получения линейно поляризованного света из неполяризовнного.

1. Введение

Многослойные жидкокристаллические ячейки – самые известные структурные элементы для развития современных технологий по электромагнито-акусто-оптическим системам. Эти ячейки находят широкое применение в качестве управляемых вращателей плоскости поляризации [1-6], а также как линамические фазовращатели, ахроматические миниатюризованные жидкокристаллические устройства для дисплеев [7,8], управляемые фильтры [9-11], беззеркальные лазеры на красителях [12-15], оптические диоды [16,17], и т.д. Главными особенностями этих устройств являются их легкая управляемость, малые потери и размеры. В работах [17-21] детально исследованы новые оптические гетеропереходы анизотропных структур, состоящих из слоя НЖК, сэндвиченных между двумя слоями ХЖК. В этих работах рассматривался такой анизотропный слой, который является полуволновой пластинкой. Ниже мы рассмотрим гетеропереход НЖК-ХЖК-НЖК, в котором анизотропный слой является четвертьволновой пластинкой, и покажем, что данная система также обладает уникальными полезными свойствами.

2. Результаты и обсуждение

Рассмотрим отражение и прохождение света через систему НЖК–ХЖК– НЖК (рис.1). Прохождение плоской поляризованной волны через данную систему мы будем анализировать модифицированным методом сложения слоев Амбарцумяна [19,22]. Пусть на систему по нормали падает волна с комплексной амплитудой \mathbf{E}_i . Обозначив комплексные амплитуды отраженного и прошедшего полей через \mathbf{E}_r и \mathbf{E}_t , разлагая их по базисным *p*- и *s*-поляризациями

$$\mathbf{E}_{i,r,t} = E_{i,r,t}^{p} \mathbf{n}_{p} + E_{i,r,t}^{s} \mathbf{n}_{s} = \begin{pmatrix} E_{i,r,t}^{p} \\ E_{i,r,t}^{s} \end{pmatrix} (\mathbf{n}_{p} \ \mathbf{u} \ \mathbf{n}_{s} - \text{орты } p \text{- } \mathbf{u} \text{ s-поляризации}), \text{ предста-$$

вим решение задачи в виде

$$\mathbf{E}_{r} = \hat{R} \mathbf{E}_{i}, \ \mathbf{E}_{t} = \hat{T} \mathbf{E}_{i}, \tag{1}$$

где \hat{R} и \hat{T} – 2×2 матрицы отражения и пропускания данной системы. Согласно [19,22], если имеется система, состоящая из двух приложенных друг к другу "слева направо" слоев "А" и "В", то матрицы отражения и пропускания системы "A+B" R_{A+B} и T_{A+B} определяются через аналогичные матрицы составляющих слоев матричными уравнениями

$$\widehat{R}_{A+B} = \widehat{R}_A + \widetilde{\widehat{T}}_A \widehat{R}_B \left(\widehat{I} - \widetilde{\widehat{R}}_A \widehat{R}_B\right)^{-1} \widehat{T}_A,$$

$$\widehat{T}_{A+B} = \widehat{T}_B \left(\widehat{I} - \widetilde{\widehat{R}}_A \widehat{R}_B\right)^{-1} \widehat{T}_A,$$
(2)

где \hat{I} – единичная матрица, "тильдой" обозначены соответствующие матрицы отражения и пропускания в случае обратного направления распространения. Для получения матрицы отражения и пропускания системы НЖК–ХЖК–НЖК мы, применяя формулу (2), сначала слой ХЖК сшиваем к слою НЖК с его левой стороны, а затем к полученной системе опять с левой стороны сшиваем второй слой НЖК.





Теперь непосредственно перейдем к обсуждению полученных результатов. На рис.2 представлены спектры отражения при падении на систему

НЖК-ХЖК-НЖК света с ортогональными линейными и круговыми поляризациями (a), с собственными поляризациями (b), а также спектры азимута и эллиптичности первой и второй собственных поляризаций (с и d, соответственно). Собственные поляризации (СП) – это две поляризации падающей волны, которые не меняются при прохождении света через систему [22,23]. СП и собственные значения (амплитудные коэффициенты пропускания при падении на систему света с СП) дают много информации об особенностях взаимодействия света с системой, и поэтому в оптике важное значение имеет вычисление СП и собственных значений для каждой данной оптической системы. Из определения СП следует, что они должны быть связаны с поляризациями внутренних волн (собственных мод), возбуждаемых в среде. В общем случае, естественно, есть и определенные отличия: существуют только две СП, тогда как число собственных мод может быть больше двух, причем поляризации всех этих мод могут отличаться друг от друга (например, для невзаимных сред). В СП учтено влияние диэлектрических границ. В частности, как известно, при нормальном падении света СП ХЖК и гиротропных сред практически совпадают с ортогональными круговыми поляризациями, тогда как для негиротропных сред они совпадают с ортогональными линейными поляризациями. Из сказанного следует, что исследование особенностей СП особенно важно в случае неоднородных сред, для которых точное решение залачи неизвестно.

Как видно из рис.2 отличие от отдельного слоя ХЖК (который имеет селективное по отношению к круговым поляризациям дифракционное отражение, т.е. в фотонной запрещенной зоне (ФЗЗ) свет с одной круговой поляризацией полностью отражается, а свет с обратной круговой поляризацией полностью проходит) данная система проявляет свойства селективности по отношению к линейным поляризациям: свет с линейной вдоль оси *х* поляризацией в ФЗЗ претерпевает полное отражение, а свет с линейной вдоль оси *х* поляризацией полностью проходит. Эти свойства рассматриваемой системы можно объяснить, если учтем следующие обстоятельства. При распространении света через анизотропный кристалл из-за анизотропии появляется дополнительная разность фаз. Вследствие этого, если (в частности) кристалл является четвертьволновой пластинкой, то при падении на нее линейно поляризованного света, плоскость поляризации которого составляет угол $\phi = \pi/4$ ($\phi = -\pi/4$) с оптической осью пластинки, прошедший свет имеет правую (левую) круговую поляризацию.

Далее, данная система имеет еще одно уникальное свойство, а именно, СП данной системы не ортогональные (или квазиортогональные) линейные, не круговые и не эллиптические поляризации. В данном случае в ФЗЗ обе СП имеют практически линейную (причем вдоль оси x) поляризацию (рис.2с,d). Именно этим объясняется практически полное отражение света с обеими СП в ФЗЗ (рис.2b).



Рис.2. Спектры отражения при падении на систему НЖК–ХЖК– НЖК света с ортогональными линейными и круговыми поляризациями (a), с СП (b) и спектры азимута (кривая 1) и эллиптичности (кривая 2) первой и второй СП (с и d, соответственно). Падающий на систему свет имеет а) линейную вдоль оси x (кривая 1) и y (кривая 2) поляризации, и правую (кривая 3) и левую (кривая 4) круговые поляризации; b) собственные поляризации. Спираль ХЖК правая. Параметры слоя ХЖК следующие: главные значения локального тензора диэлектрической проницаемости ε_1 =2.29, ε_2 = 2.143, шаг спирали σ = 0.42 мкм, толщина d =70 σ . Параметры слоя ХЖК следующие: коэффициенты преломления n_e =1.746, n_0 = 1.522, толщина d = 0.65 мкм. Угол ϕ =45°.

Теперь рассмотрим влияние изменения угла φ (угла между оптической осью анизотропного кристалла и осью *x* лабораторной системы) на отражение. На рис.3 представлены трехмерные графики зависимости отражения от длины волны и угла φ для системы НЖК–ХЖК–НЖК. Падающий на систему свет имеет линейную вдоль оси *x* (а) и вдоль оси *y* (b) поляризации, а также правую (c) и левую (d) круговые поляризации. Как видно из рисунков, в случае падения света с линейной поляризацией изменение угла φ существенно влияет на отражение света в ФЗЗ. В случае падения на систему света с линейной вдоль оси *x* (*y*) поляризацией коэффициент отражения *R* меняется от 0 до 1 (от 1 до 0) при изменении угла φ от $\pi / 4$ до+ $\pi / 4$. Это означает, что данная система может

работать как идеальный модулятор с глубиной модуляции, равной единице. Так как ориентацией осей молекул НЖК (и, следовательно, ориентацией оптической оси слоя НЖК) можно управлять внешним электрическим полем, то систему НЖК-ХЖК-НЖК можно использовать как электрически управляемый модулятор. Изменение угла φ не влияет на отражение в случае падения на систему света с круговой (причем и левой, и правой) поляризацией (см. рис.3с и d).



Рис.3. Зависимости отражения от длины волны λ и φ для системы НЖК–ХЖК– НЖК. Падающий на систему свет имеет линейную вдоль оси *x* (а) и вдоль оси *y* (b) поляризации, а также правую (c) и левую (d) круговые поляризации. Параметры системы те же, что и на рис.2.

На рис.4 представлены зависимости азимута и эллиптичности одной СП от угла φ для длины волны, находящейся в центре ФЗЗ. Практически такие же зависимости наблюдаются для другой СП. Аналогичные зависимости наблюдаются и для других длин волн в ФЗЗ. Из представленных результатов следует, что система НЖК–ХЖК–НЖК может работать также как система для получения света с электрически управляемым вращением плоскости поляризации. Как известно, большинство элементов оптических систем обычно поляризационно-чувствительны, а сами эти элементы меняют состояние

поляризации света. Каждый из этих элементов выполняет свои функции при заданной входной поляризации света. Поэтому очень важно (особенно для оптической связи) создание оптических элементов для получения сигнала с заданной поляризацией.



Рис.4. Зависимости азимута ψ_1 (кривая 1) и эллиптичности e_1 (кривая 2) первой СП от угла φ для длины волны, находящейся в центре ФЗЗ (λ =0.625 мкм). Параметры системы те же, что и на рис.2.

Перейдем к исследованию особенностей взаимодействия неполяризованного света с рассматриваемой системой. Для описания взаимодействия квазимонохроматичного частично поляризованного света с оптическими системами обычно пользуются формализмом матриц Мюллера. В этом случае решение задачи отражения–пропускания представляется в виде

$$\mathbf{S}_{t} = \hat{M}_{t} \mathbf{S}_{i}, \ \mathbf{S}_{r} = \hat{M}_{r} \mathbf{S}_{i}, \tag{3}$$

где S_i , S_t , S_r – это 4×1 векторы-столбцы Стокса падающей, прошедшей $\mathbf{S}_i = I \{ 1, P \cos(2\Phi_i) \cos(2\Psi_i), \}$ соответственно: отраженной волн, $P\cos(2\Phi_i)\sin(2\Psi_i) P\sin(2\Phi_i)$, I – полная интенсивность падающей волны, Ψ_i – азимут и Φ_i – угол эллиптичности эллипса поляризации полностью поляризованной компоненты в падающей волне, Р – степень поляризации падающей волны, $\mathbf{S}_{r,t} = \left(S_0^{r,t}, S_1^{r,t}, S_2^{r,t}, S_3^{r,t}\right)^T$, $S_0^{r,t}, S_1^{r,t}, S_2^{r,t}, S_3^{r,t}$ – параметры Стокса отраженной и прошедшей волн, соответственно, \hat{M}_{t} , \hat{M}_{r} – 4×4 матрицы Мюллера прошедшей и отраженной волн, соответственно. По известным правилам из 2×2 матриц отражения и пропускания можно получить соответствующие матрицы Мюллера [23]. Интенсивности прошедшего и отраженного света определяются из выражения $I_{t,r} = S_0^{t,r}$. Азимуты $\theta_{t,r}$ и углы поляризации полностью поляризованной эллиптичности $\boldsymbol{\varepsilon}_{t,r}$ эллипсов компоненты в прошедшем

и отраженном свете определяются из условий $\theta_{t,r} = (1/2) \arctan \left(S_2^{t,r} / S_1^{t,r} \right)$,

 $\varepsilon_{t,r} = (1/2) \arctan \left[S_3^{t,r} / (S_1^{t,r} + S_2^{t,r} + S_3^{t,r}) \right],$ а эллиптичности поляризации – из формулы $e_{t,r} = \tan \varepsilon_{i,r}.$



Рис.5. Зависимости интенсивности I_t (а), эллиптичности поляризации e_i (b) и азимута θ_t (c) прошедшего света от длины волны λ и угла φ . Падающий на систему свет полностью неполяризован (P = 0). Параметры системы те же, что и на рис.2.

На рис.5 представлены трехмерные графики зависимости интенсивности I_i (а), эллиптичности поляризации Φ_i (b) и азимута поляризации Ψ_i (c) прошедшего света от длины волны и угла φ для системы НЖК–ХЖК–НЖК. Падающий на систему свет полностью неполяризован (P = 0). Из графиков следует, что интенсивность прошедшего света приблизительно равна половине интенсивности падающего, и она в ФЗЗ практически не зависит от угла φ . Прошедший свет полностью поляризован, в ФЗЗ имеет линейную поляризацию, азимут которой линейно зависит от угла φ . Это означает, что система НЖК–ХЖК–НЖК может служить как устройство для получения линейно поляризо

ванного света из неполяризованного света, причем с возможностью электрического управления азимутом поляризации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного Научно-Технического Центра (МНТЦ грант А-1602).

ЛИТЕРАТУРА

- 1. A.Safrani, I.Abdulhalim. Opt. Lett., 34, 1801 (2009).
- 2. H.Ren, S-T.Wu. Appl. Phys. Lett., 90, 121 (2007).
- 3. F.Yang, L.Ruan, S.A.Jewell, J.R.Sambles. Opt. Express, 15, 4192 (2007).
- 4. J.A.Davis, G.H.Evans, I.Moreno. Appl. Opt., 44, 4049 (2005).
- 5. C.Ye. Opt. Eng., 34, 3031 (1995).
- 6. Z.Zhuang, S-W.Suh, J.S.Patel. Opt. Lett., 24,694 (1999).
- 7. Q-H.Wang, T.X.Wu, X.Zhu, S-T.Wu. Liq. Cryst., 31, 535 (2004).
- 8. M.D.Lavrentovich, T.A.Sergan, J.R.Kelly. Opt. Lett., 29, 1411 (2004).
- 9. D-K.Yang, S-T.Wu. Fundamentals of Liquid Crystal Devices. N.Y., Wiley, 2006.
- 10. A.Lakhtakia, M.McCall. Opt. Commun., 168, 457 (1999).
- 11. H.Sarkissian, B.Ya.Zeldovich, N.V.Tabiryan. Opt. Lett., 31, 1678 (2006).
- 12. V.I.Kopp, B.Fan, H.K.M.Vithana, A.Z.Genack. Opt. Lett., 23, 1707 (1998).
- 13. A.F.Munoz, P.Palffy-Muhoray, B.Taheri. Opt. Lett., 26, 804 (2001).
- 14. T.Matsui, R.Ozaki, K.Fuamoto, et al. Appl. Phys. Lett., 81, 3741 (2002).
- 15. M.H.Song, N.Y.Ha, K.Amemiya, et al. Adv. Mater., 18, 193 (2006).
- 16. A.H.Gevorgyan. Tech. Phys., 47, 1008 (2002).
- 17. J.Hwang, M.H.Song, B.Park, et al. Nature Mat., 4, 383 (2005).
- 18. M.H.Song, B.Park, S.Nishimura, et al. Adv. Funct. Mater., 16, 1793 (2006).
- 19. A.H.Gevorgyan, M.Z.Harutyunyan. Phys. Rev. E, 76, 031701 (2007).
- 20. А.А.Геворгян. Письма в ЖТФ, **32**, №16, 18 (2006). (А.Н.Gevorgyan. Tech. Phys. Lett., **32**, 698 (2006)).
- 21. А.А.Геворгян. Письма в ЖТФ, **34**, №6, 80 (2008). (А.Н.Gevorgyan. Tech. Phys. Lett., **34**, 262 (2008)).
- 22. A.H.Gevorgyan, M.Z.Harutyunyan. J. Mod. Opt., 56, 1163 (2009).
- 23. **R.M.A.Azzam, N.M.Bashara.** Ellipsometry and polarized light. New York, North-Holland, 1977.

NLC-CLC-NLC CELL AS AN ELECTRICALLY TUNABLE POLARIZATION PLANE ROTATOR

A.H. GEVORGYAN, K.B. OGANESYAN

A liquid crystal optical device made of optically anisotropic heterostructure is considered. The device consists of a cholesteric liquid crystal (CLC) layer sandwiched by two phase-shifting anisotropic layers of nematic liquid crystal (NLC). In this structure each of the NLC layers is a quarterwave plate. The problem is solved both by Ambartsumian's method of layer addition and Muller's matrix method. The peculiarities of reflection spectra, eigen polarizations, rotation of polarization plane and polarization ellipticity are studied. It is shown that the subject device can work as a light modulator, or a system for obtaining linearly polarized light with electrically tunable rotation of the polarization plane (which is especially important for optical communication), as well as a device for obtaining the linearly polarized light from a non-polarized one.