Известия НАН Армении, Физика, т.48, №3, с.178-185 (2013)

УДК 621.372

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОСТОРОННЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

Т.К. ДАДАЛЯН

Ереванский государственный университет, Армения
e-mail: tigran.dadalyan@ysu.am

(Поступила в редакцию 30 ноября 2012 г.)

Экспериментально изучено влияние граничных условий на оптические свойства слоя холестерического жидкого кристалла (ХЖК). В частности, получен образец, который прозрачен для света с круговой поляризацией, падающего с одной стороны, и вносит потери в спектр пропускания света (в интервале длин волн примерно 100 нм), падающего с противоположной стороны, то есть работает как оптический диод. В спектре отражения образца имеются две области селективного отражения. Спектральным положением обеих областей селективного отражения и пропускания света можно управлять с помощью температуры ХЖК.

1. Введение

Благодаря своим замечательным оптическим свойствам холестерические жидкие кристаллы (ХЖК) являются предметом интенсивных исследований во многих областях оптики, таких как нелинейная оптика, фотоника, физика лазеров. Такой живой интерес к ХЖК вызван тем, что в силу их структурных и физических особенностей с их помощью можно миниатюризировать оптические компоненты, которыми можно управлять параметрами светового излучения. На их основе были получены оптические диоды, поляризационные фильтры, оптические микрорезонаторы и лазеры, а также ЖК индикаторы [1-5].

В слое ХЖК молекулы закручиваются, образуя периодическую спиралевидную структуру. Из-за анизотропии молекул образуется периодическая модуляция коэффициента преломления. Дистанция, на которой ориентация молекул повторяется, называется шагом спирали ХЖК. Таким образом, когда шаг спирали порядка величины длины волны видимого света, ХЖК представляет собой дифракционную решетку, которая отражает свет с круговой поляризацией, совпадающей с направлением вращения спирали ХЖК, в интервале длин волн $n_0 p < \lambda < n_e p$ (где n_0 и n_e – обыкновенный и необыкновенный показатели преломления) и пропускает свет с обратной круговой поляризацией. Это свойство ХЖК называется селективным отражением света, а область селективного отражения часто называют фотонно запрещенной зоной (ФЗЗ) [6]. Как видно из

формулы, спектральное положение ФЗЗ зависит от шага спирали, который в ХЖК очень чувствителен к внешним воздействиям, таким как температура, электромагнитные поля и т.д. [6]. Таким образом, управляя шагом спирали ХЖК, можно контролировать спектральное положение области селективного отражения, т.е. спектральное положение и ширину ФЗЗ. Учитывая вышеупомянутые свойства, ХЖК иногда также называют одномерными фотонными кристаллами [7,8].

С точки зрения применения представляют интерес оптические диоды, которые пропускают свет с круговой поляризацией с одной стороны в определенном промежутке длин волн, и непрозрачны с обратной стороны, то есть проявляют необратимость пропускания света. При этом можно сдвинуть эту область непропускания света в длинноволновую или коротковолновую части спектра с помощью температуры, электромагнитных полей и т.д. В опубликованных работах оптический диод получают, индуцируя анизотропный дефект в слое ХЖК. Это можно сделать либо с помощью электрического поля, либо сопоставив слои нематического жидкого кристалла (НЖК) и ХЖК, или сопоставив два слоя ХЖК с разными шагами [1,9-12]. Таким образом, получение необратимости пропускания света сводится к индуцированию либо дефекта, либо разрыва в шаге спирали ХЖК, и можно предположить, что это можно сделать и с помощью соответствующей обработки подложек ХЖК ячейки, поскольку спектральные характеристики слоя ХЖК во многом зависят именно от граничных условий, диктуемых подложками ячейки.

Целью данной работы являлось изучение зависимости оптических характеристик пленки ХЖК при разных условиях ориентаций, налагаемых подложками ХЖК ячейки. В частности, рассмотрены спектры пропускания и отражения света структуры ХЖК в ячейке, одна из подложек которой задает планарную ориентацию молекул ХЖК, а вторая подложка не обработана никакими ориентирующими средствами, т.е. на другой границе слоя ХЖК молекулы свободны в ориентации.

2. Материалы и экспериментальная установка

ХЖК, использованный в ходе экспериментов, был смесью нематического жидкого кристалла E7 и хиральных добавок холестерил пеларгоната и холестерил олеата. Ячейка состояла из двух стеклянных подложек, зазор между которыми составлял 20 мкм. Чтобы очистить поверхность подложек, они были продержаны в очистительном растворе, содержащем серную кислоту и хромпик, затем тщательно вымыты. Для придания ориентации молекулам ХЖК в ячейке, одна подложка была обработана натиранием, чтобы длинные оси молекул ЖК выстроились параллельно плоскости подложки в одном и том же направлении (планарная ориентация), а вторая подложка была использована без специальной обработки для ориентации молекул ХЖК, т.е. на другой границе слоя ХЖК молекулы свободны в ориентации. Ячейка была заполнена ХЖК, нагретым до изотропной фазы, капиллярным методом, при температуре 50°C. По-

сле заполнения ячейка была оставлена на два дня, чтобы молекулы ЖК образовали планарную спиральную структуру. Схематическое изображение ячейки представлено на рис.1.

Рис.1. Схематическое изображение ХЖК ячейки. Расстояние между подложками поддерживалось с помощью пленок (два черных круга на рисунке) толщиной $d = 20$ мкм.

Схема экспериментальной установки, с помощью которой измерялись спектры отражения и пропускания ХЖК, показана на рис.2. Из вольфрамо-криптоновой лампы (1) свет падает на широкополосный круговой поляризатор, который состоит из поляризатора (2) и ромба Френеля (3). Свет с круговой поляризацией коллимируется с помощью объектива (4) на ячейку (7), которая расположена в термостате. Эллиптичность круговой поляризации света составляла ~ 0.9. Диаметр пучка света составлял 3 мм. С помощью полупрозрачного зеркала (5) свет, отраженный от ячейки, попадает в оптоволокно и передается к спектрофотометру. Свет, прошедший сквозь ячейку, также проводится к спектрофотометру с помощью оптического волокна.

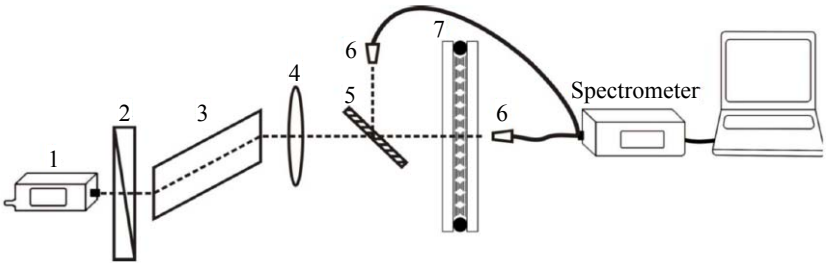

Рис.2. Схема экспериментальной установки. 1 – вольфрамо-криптоновая лампа, 2 – поляризатор, 3 – ромб Френеля, 4 – объектив, 5 – полупрозрачное зеркало, 6 – оптоволокно, 7 – ячейка.

Измерения спектров отражения и пропускания осуществлялись с помощью спектрофотометра Stellar Net, Black Comet с оптическим разрешением ~ 1 нм. Диаметр оптических волокон составлял 400 мкм.

В экспериментах по измерению температурных особенностей отражения неполяризованного света слоем ХЖК было использовано оптоволокно специальной конфигурации: с помощью группы волокон свет доставлялся к образцу, а отражение собиралось в центральное волокно, вокруг которого были расположены упомянутые осветительные волокна, и доставлялся к спектрометру.

Температура ячейки задавалась с помощью термостата, управляемого термоэлектрическим модулем Пельтье, с точностью до 0.5°C.

3. Экспериментальные результаты

Для изучения оптических свойств ХЖК структуры, сформировавшейся под воздействием несимметричных граничных условий, описанных выше, были измерены спектры пропускания и отражения света с обеих сторон ХЖК ячейки.

На рис.3 представлены спектры пропускания ХЖК ячейки для света с левой круговой (ЛК) поляризацией, правой круговой (ПК) поляризацией и неполяризованного света. На рис.3a представлены результаты измерений для света, падающего со стороны обработанной для планарной ориентации молекул ХЖК подложки, а графики на рис.3b, соответственно, получены с помощью света, падающего со стороны необработанной подложки.

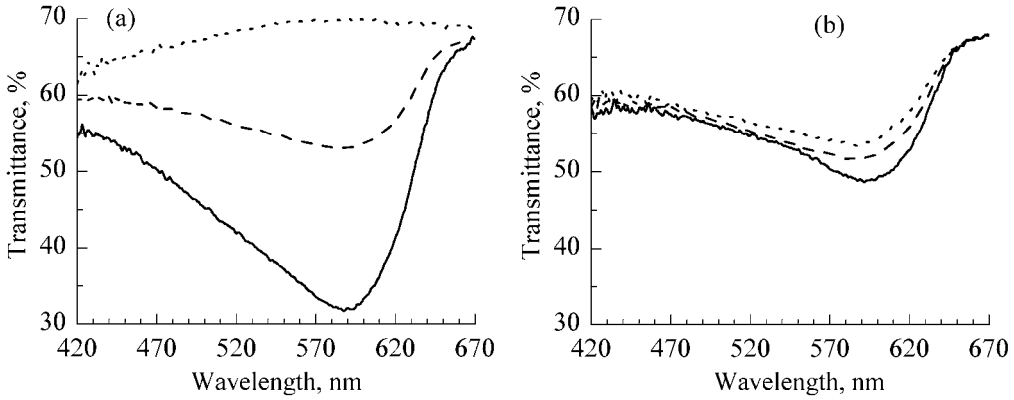

Рис.3. Спектры пропускания ХЖК ячейки неполяризованного (штриховая линия), ЛК (пунктирная линия) и ПК (сплошная линия) поляризованного света, падающего со стороны обработанной (a) и необработанной (b) подложки. Температура ячейки 26°C.

Из рис.3a видно, что свет с ЛК поляризацией, падая со стороны той подложки ячейки, на которой молекулы ориентированы планарно, проходит сквозь слой ХЖК без заметных потерь, а с обратной стороны он претерпевает некоторые потери в интервале длин волн 520–630 нм. В тех же условиях свет с ПК поляризацией, падая со стороны обработанной подложки, испытывает большие потери, а для падающего света со стороны необработанной подложки эти потери невелики. На рис.3 также видно, что пропускание ХЖК слоя для неполяризованного, ПК и ЛК поляризованного света, падающего со стороны необработанной подложки, примерно одного порядка.

Спектры отражения ХЖК с обеих сторон подложек ячейки для света с ЛК и ПК поляризациями, представлены на рис.4 и 5. Из рис.4a,b и 5a,b видно, что спектры отражения света имеют две области отражения: один низкий и широкий на длине волны 450 нм и второй, более узкий с максимумом на длине волны 625 нм. Также видно, что края длинноволновой области отражения сдвинуты друг относительно друга, что может быть вызвано геометрией эксперимента.

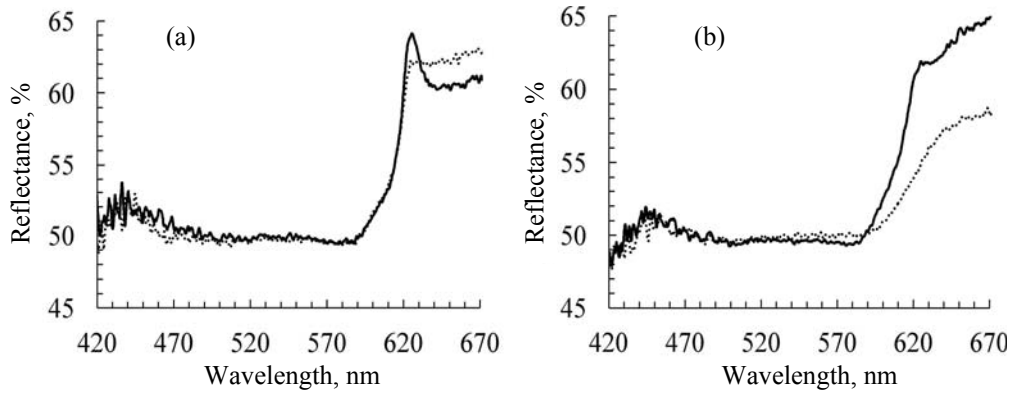

Рис.4. Спектры отражения ХЖК ячейки ЛК (пунктирная линия) и ПК (сплошная) поляризованного света, падающего со стороны обработанной (a) и необработанной (b) подложки. Температура ячейки 26°C.

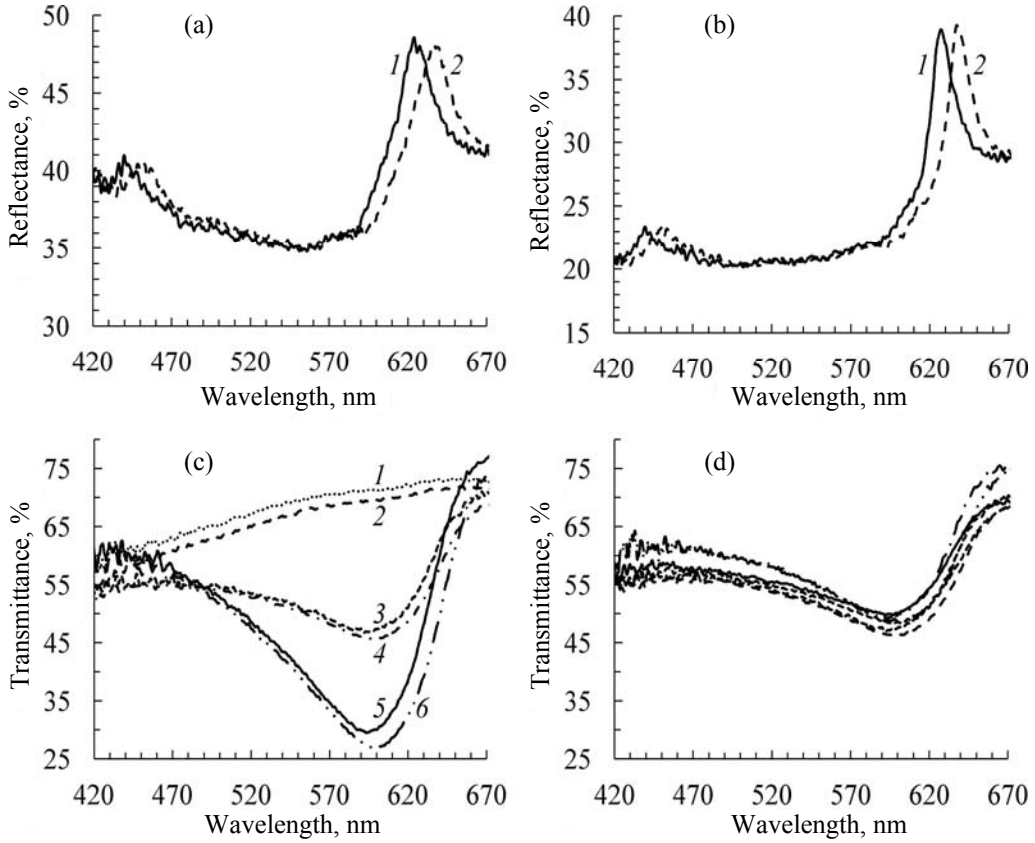

Рис.5. (a,b) Спектры отражения неполяризованного света от ячейки при температурах 24°C (2) и 26°C (1); (c,d) спектры пропускания ячейки для ЛП (1,2), ПК (5,6) и неполяризованного (3,4) света. Температура ячейки 24°C (1,4,6) и 26°C (2,3,5). Свет падает со стороны обработанной (a,c) и необработанной (b,d) подложки.

Из рис.4a,b видно, что для света с ЛК поляризацией явно выраженной области отражения не наблюдается. Также видно, что для света с ПК поляризацией область селективного отражения явно выражена для света, падающего со стороны обработанной подложки (a), что соответствует меньшему пропусканию ПК поляризованного света в этом направлении (см. рис.3a).

Вышеупомянутые результаты, касающиеся спектров пропускания и второй области отражения в спектре отраженного света, повторяются при других температурах ячейки. Результаты измерения спектров пропускания ячейки света с теми же поляризациями, но при других температурах, а также температурная зависимость спектра отражения ХЖК с обеих сторон ячейки для неполяризованного света показаны на рис.5c,d и a,b, соответственно.

На рис.5 можно видеть, что с повышением температуры наблюдается сдвиг кривых спектров пропускания и отражения в коротковолновую часть видимого спектра. Тот же сдвиг наблюдается для второй области отражения на коротких длинах волн.

4. Обсуждение и заключение

В ходе экспериментов были изучены спектральные свойства ХЖК структуры, которая сформировалась под ориентирующим влиянием одной из подложек ЖК ячейки.

Свет с ПК поляризацией проходит сквозь ячейку со стороны обработанной подложки с большими потерями, а спектр отражения показывает, что у света, отраженного с этой стороны, явно выраженный пик селективного отражения отсутствует. С другой стороны ячейки свет проходит без больших потерь, а у отраженного света есть явно выраженный пик.

Спектры отражения и пропускания неполяризованного света с обеих сторон образца почти совпадают, только ширина полосы отражения со стороны обработанной подложки немного больше ширины полосы отражения с другой стороны.

У отраженного света с ЛКП явно выраженный пик полосы отражения отсутствует с обеих сторон образца. Со стороны обработанной подложки образец почти прозрачен для света, а падающий свет с обратной стороны претерпевает небольшие потери (последнее по всей вероятности не может быть связано с эллиптичностью поляризации света). Фактически для ЛК поляризованного света образец работает как оптический диод.

Несоответствие ширины полосы отражения и области низкого пропускания образца, а также тот факт, что края длинноволновых и коротковолновых границ этих областей не совпадают, говорит о том, что в структуре ХЖК присутствуют некоторые неоднородности. Об этом свидетельствуют и результаты исследования образца поляризационным микроскопом, которые показали, что в ходе изготовления ХЖК ячейки в ней образовались маленькие пузырьки воздуха размером меньше 10 мкм. На рис.6 показана фотография ХЖК ячейки, сделанная поляризационным микроскопом со скрещенными поляризатором и ана-

лизатором. Пузырьки воздуха распределены неравномерно по всей площади ХЖК пленки, а на рис.6 представлено наиболее большое скопление пузырьков, которые равномерно окрашены в черный цвет. Для измерения спектров пропускания и отражения света, выбиралась область ХЖК пленки с наименьшим количеством пузырьков воздуха, но результаты оставались одинаковыми.

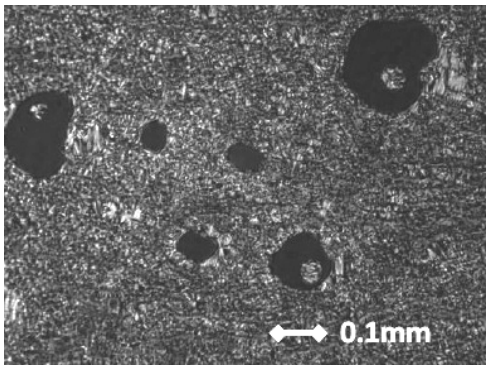

Рис.6. Микрофотография ХЖК пленки, сделанная между скрещенными поляризатором и анализатором поляризационного микроскопа. Пузырьки воздуха имеют черный цвет.

Не выясненной остается причина возникновения второй области отражения в области 420–470 нм. Вторая область отражения отстоит от длинноволновой области селективного отражения примерно на 180 нм и наблюдается в других экспериментах; таким образом, она не связана с эффектом, наблюдаемым здесь.

Таким образом, экспериментально наблюдается некоторое нарушение в структуре ХЖК из-за граничных условий, налагаемых подложками ячейки или возникших в ходе изготовления ячейки. Вследствие этих нарушений, образец ведет себя как оптический диод для света с ЛК поляризацией. Для выяснения причин возникновения коротковолновой полосы отражения необходимы новые тестовые эксперименты и дополнительные исследования.

Автор выражает благодарность профессору Р.Б. Алавердяну за помощь и консультацию, оказанную в ходе экспериментов, в процессе обработки результатов и подготовки статьи.

Работа выполнена при поддержке гранта 11c194, предоставленного Государственным Комитетом по Науке РА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **O.Kasano, M.Kitasho, et. al.** Adv. Matter., **15**, 974 (2003).
2. **M.Song, B.Park, Y.Takanishi.** Thin Solid Films, **509**, 49 (2006).
3. **Y.J.Kim, Sin-Doo Lee.** Appl. Phys. Lett., **72**, 1978 (1998).
4. **I.Dozov, I.Penchev.** J. Physique, **47**, 373 (1986).
5. **M.R.Lewis, C.K.Wiltshire.** Appl. Phys. Lett., **51**, 1197, (1987).
6. **P.E. de Gennes.** The Physics of Liquid Crystals. Oxford, Clarendon, 1974.

7. **V.P.Bykov.** Sov. Phys. JETP, **35**, 269 (1972).
8. **E.Yablonovitch.** Phys. Rev. Lett, **58**, 2059 (1987).
9. **R.B.Alaverdyan, A.H.Gevorgyan, A.D.Chilingaryan, Yu.S.Chilingaryan**, Quantum Electron., **38**, 497 (2008).
10. **J.Hwang, M.H.Song, B.Park, et al.** Nat. Mater., **4**, 383 (2005).
11. **A.H.Gevorgyan, A.N.Kocharian.** Opt. Communn., **285**, 2854 (2012).
12. **K.R.Allahverdyan, A.H. Gevorgyan, et al.** Pis'ma v ZhETF, **96**, 778 (2012).

ԽՈԼԵՍՏԵՐԻԿ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂԱԿԱՆ ԲԱՐԱԿ ԹԱՂԱՆԹԻ ՄԻԱԿՈՂՄԱՆԻ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԹԱՓԱՆՑԻԿՈՒԹՅԱՆ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Տ.Կ. ԴԱԴԱԼՅԱՆ

Ուսումնասիրված է խոլեստերիկ հեղուկ բյուրեղի բարակ թաղանթի օպտիկական հատկությունների վրա եզրային պայմանների ազդեցությունը: Մասնավորապես՝ ստացվել է նմուշ, որը թափանցիկ է մի կողմից ընկնող շրջանային բևեռացմամաբ լույսի համար և կորուստներ է առաջացնում հակառակ կողմից ընկնող լույսի թափանցման սպեկտրում 100 նմ լայնությամբ ալիքի երկարությունների տիրույթում: Նմուշի անդրադարձման սպեկտրում դիտվել են ընտրողաբար անդրադարձման երկու տիրույթ: Փորձերը ցույց են տվել նաև, որ ջերմաստիճանի փոփոխությամբ հնարավոր է ղեկավարել ինչպես ընտրողաբար անդրադարձման տիրույթները, այնպես էլ նմուշի թափանցման սպեկտրը:

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ONE-SIDED OPTICAL TRANSPARENCY OF CHOLESTERIC LIQUID CRYSTAL THIN FILM

T.K. DADALYAN

Influence of boundary conditions on optical properties of a cholesteric liquid crystal thin film has been investigated. In particular, a sample was obtained which is transparent for light with circular polarization incident from one side and brings loses in the spectrum of transmission of light within 100 nm wide wavelength range when light is incident from the opposite direction, i.e. shows optical diode behavior. Two selective reflection bands were detected in the reflection spectrum of the sample. Studies showed that the spectral position of both reflection bands and transmission spectrum of the sample could be controlled with temperature.