

УДК 532.783+535.583.1

КРУГОВОЙ ДИХРОИЗМ В ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

© 2019 г. Б. А. Уманский^{1,*}, И. В. Симдянкин¹¹ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

* E-mail: umanskii@yahoo.com

Поступила в редакцию 28.03.2018 г.

После доработки 29.03.2018 г.

Принята к публикации 27.04.2018 г.

Исследован круговой дихроизм в холестерических жидких кристаллах (ХЖК) в полосах поглощения растворенных в них дихроичных красителей, обладающих как положительным, так и отрицательным линейным дихроизмом. Изучение кругового дихроизма проводилось в зависимости от положения полосы селективного отражения ХЖК по отношению к полосе поглощения красителя. Проведено сравнение индуцированного кругового дихроизма, обусловленного поглощением красителей, с собственным круговым дихроизмом ХЖК, обусловленным дифракцией света на периодической хиральной структуре.

DOI: 10.1134/S0023476119030305

ВВЕДЕНИЕ

Оптические свойства холестерических жидких кристаллов (ХЖК) в последнее время широко изучались как экспериментально [1–11], так и теоретически [12–18]. Наиболее полно результаты теоретических исследований на эту тему изложены в [17]. Оптические свойства ХЖК обусловлены спиральным упорядочением директора (единичного вектора, характеризующего преимущественное направление длинных осей молекул ХЖК), которое создает периодическую модуляцию показателей преломления. Одним из самых удивительных свойств ХЖК является селективное отражение циркулярно поляризованного света, знак поляризации которого совпадает со знаком холестерической спирали. При падении на ХЖК луча света вдоль оптической оси в сравнительно узком интервале длин волн свет одной круговой поляризации отражается от ХЖК, а свет другой (ортогональной) проходит в ХЖК без отражения. Спектральная ширина полосы отражения, которая называется брэгговской полосой, определяется выражением $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \Delta n P$; здесь λ_2 – длина волны, определяющая положение длинноволнового края полосы отражения, λ_1 – коротковолнового, $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ – разность показателей преломления по направлениям, параллельному и перпендикулярному локальному директору ХЖК, P – шаг холестерической спирали. Центр полосы отражения соответствует брэгговской длине волны, которая определяется вы-

ражением $\lambda_B = \bar{n}P$, здесь $\bar{n} = \sqrt{\frac{n_{\parallel}^2 + n_{\perp}^2}{2}}$ – средний показатель преломления среды.

Селективное отражение обусловлено тем, что внутри ХЖК распространяются в прямом и обратном направлениях по две волны с ортогональными круговыми поляризациями. В правозакрученном ХЖК свет с правой циркулярной поляризацией испытывает дифракцию на периодической структуре ХЖК. При распространении в прямом направлении такой свет испытывает сильное затухание и отражается назад. Свет с левой циркулярной поляризацией не дифрагирует в ХЖК и проходит через среду без затухания.

Другим необычным свойством ХЖК является аномально большое вращение плоскости поляризации линейной поляризованного света, которое в тонких слоях достигает нескольких тысяч град/мм. Вращение плоскости поляризации света в среде происходит из-за различия фазовых скоростей волн с правой и левой циркулярными поляризациями [17]. Угол поворота плоскости поляризации φ определяется выражением

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_L - n_R)L, \quad (1)$$

где n_L и n_R – показатели преломления для лево- и правозакрученно поляризованной волны при любой ориентации плоскости поляризации света на входной поверхности ХЖК, L – толщина слоя ХЖК. Это свойство также обусловлено разложением распространяющегося в ХЖК света на четыре собственные волны. Две собственные волны дифрагирующей круговой поляризации имеют

разные скорости и амплитуды. С одной стороны от брэгговской длины волны λ_B в области селективного отражения возбуждается преимущественно одна собственная волна, например, медленная, фазовая скорость которой меньше, чем скорость не дифрагирующей волны, а с другой стороны – быстрая, фазовая скорость которой больше, чем у не дифрагирующей волны. Фазовая скорость не дифрагирующей собственной волны с противоположной круговой поляризацией не зависит от длины волны. Поэтому знак разности показателей преломления оказывается различным по обе стороны от области селективного отражения, что соответствует различным направлениям вращения плоскости поляризации. В коротковолновой по отношению к брэгговской полосе области спектра знак поворота плоскости поляризации совпадает со знаком холестерической спирали, а в длинноволновой области плоскость поляризации поворачивается в противоположную сторону. Для самой брэгговской длины волны λ_B вращение плоскости поляризации обращается в ноль [14].

Следующим необычным свойством ХЖК является циркулярный дихроизм на полосах поглощения, также обусловленный спиральной структурой ХЖК и напрямую связанный с вращением плоскости поляризации линейно поляризованного света. Поглощение света в ХЖК при наличии дифракционного отражения может быть как больше, так и меньше, чем в отсутствие дифракции. В условиях дифракции поле электромагнитной волны дифрагирующей круговой поляризации представляет собой суперпозицию двух плоских волн, одна из которых первичная падающая волна, другая – дифрагированная волна. Суперпозицией этих волн является линейно поляризованная волна, вектор электрического поля которой на коротковолновом краю зоны селективного отражения перпендикулярен директору, т.е. длинным осям молекул. Если молекулы красителя обладают положительным линейным дихроизмом, то поглощение дифрагирующей волны здесь будет меньше, чем не дифрагирующей. На длинноволновом краю зоны селективного отражения вектор электрического поля дифрагирующей волны направлен вдоль директора (длинной оси молекул), поэтому поглощение дифрагирующей волны будет больше, чем не дифрагирующей.

Если на краю зоны селективного отражения свет линейно поляризован с поляризацией, перпендикулярной длинной оси молекул, то вне брэгговской полосы свет в общем случае поляризован эллиптически. При этом большая ось эллипса поляризации все еще направлена перпендикулярно длинной оси молекул, и для дифрагирующей волны происходит уменьшение поглощения, а для волны с ортогональной поляризацией, не дифрагирующей на структуре ХЖК, поглощение опре-

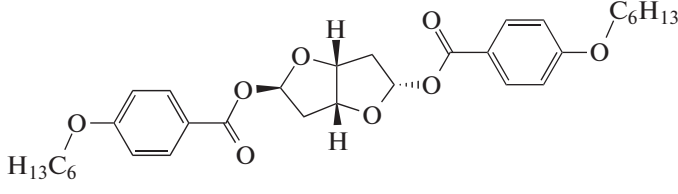
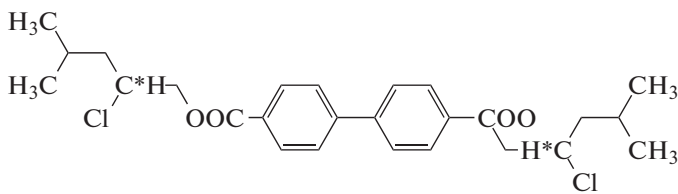
деляется средним коэффициентом поглощения. Для длин волн по другую сторону от брэгговской частоты для дифрагирующих волн происходит увеличение поглощения, в то время как для не дифрагирующих волн оно также определяется средним значением коэффициента поглощения. Это и является причиной возникновения индуцированного кругового дихроизма.

Наличие анизотропного поглощения влияет и на зависимость угла поворота плоскости поляризации от частоты. Если непоглощающий кристалл вращает плоскость поляризации практически одинаково и вправо, и влево, то поглощающий вращает преимущественно в одну сторону [15]. Это обусловлено тем, что “медленная” и “быстрая” дифрагирующие волны испытывают существенно различное поглощение в ХЖК. Как следствие, одна из волн оказывается подавленной и возникает асимметрия кривой вращения плоскости поляризации, либо вообще отсутствует изменение знака вращения. Также возникает асимметрия в индуцированном круговом дихроизме. По одну сторону от брэгговской длины волны λ_B круговой дихроизм может быть значительно меньше, чем по другую, либо вообще отсутствовать.

Еще одним необычным оптическим свойством поглощающих ХЖК является изменение поглощения света в полосе отражения в случае перекрытия полос поглощения и отражения [14, 18]. Этот эффект является аналогом эффекта Бормана в поглощающих твердых кристаллах для рентгеновских лучей [19]. Он был описан в теоретических работах [15, 18], а также наблюдался экспериментально [4, 20, 21].

Большинство ХЖК не поглощают в видимом свете, поэтому круговой (циркулярный) дихроизм на полосах поглощения исследовался в ИК- или УФ-областях [10, 11], при этом из-за очень сильного поглощения исследования обычно проводились на краях полос поглощения. В настоящей работе изучается дихроизм примесных молекул красителей, обладающих большой анизотропией поглощения, а именно большим линейным дихроизмом, т.е. поглощение вдоль длинной оси молекул красителя и поперек ее различается в несколько раз. Исследованы молекулы красителя как с положительным линейным дихроизмом ($K_{\parallel} > K_{\perp}$), так и с отрицательным ($K_{\parallel} < K_{\perp}$), здесь K_{\parallel} и K_{\perp} – коэффициенты поглощения в направлениях, параллельном и перпендикулярном локальному директору ХЖК. Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном подтверждении теоретически предсказанных свойств кругового дихроизма в ХЖК.

Таблица 1. Оптически активные добавки

Химическая формула	НТР, $\text{м}^{-1} \cdot \text{М}^{-1}$	Шифр
	4.9×10^7	ГС
	1.29×10^7	Д-Л

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве ХЖК использовались хиральные нематические жидкие кристаллы (ХНЖК) на основе нематического жидкого кристалла ЛЖК-2, разработанного в лаборатории жидких кристаллов Института кристаллографии. Температурный диапазон существования нематической фазы данного материала от -10 до $+95^\circ\text{C}$. Главные значения показателей преломления ЛЖК-2, измеренные с помощью рефрактометра Аббе 1Т (Atago) на длине волны $\lambda = 589$ нм при температуре $T = 25^\circ\text{C}$, равны $n_{\parallel} = 1.595$ (вдоль главной оси, совпадающей с директором ЖК) и $n_{\perp} = 1.487$ (перпендикулярно директору ЖК), оптическая анизотропия $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} = 0.108$. Для создания ХНЖК к ЛЖК-2 добавлялись две оптически активные добавки (ОАД). Структурные формулы ОАД и их параметры приведены в табл. 1.

Первая добавка – гексосорбит (ГС), правовращающая ОАД, т.е. она индуцирует правозакрученную холестерическую спираль. Закручивающая способность ГС (*helical twisting power* (НТР)) очень велика, даже небольшие концентрации ГС (3–6 мас. %) индуцируют холестерическую спираль с шагом порядка длины волны видимого диапазона света. Вторая добавка – бис(2-хлор-4-метилпентил)бифенил-4,4'-дикарболсилата (Д-Л), левовращающая ОАД. Закручивающая способность Д-Л почти в 4 раза меньше, чем ГС, поэтому для получения холестерической спирали с шагом, сравнимым с длиной волны видимого диапазона, необходимо добавить в ЛЖК-2 порядка 20 мас. % Д-Л.

В качестве дихроичных красителей использовались КД-10 (НИОПИК) и DCM (Lambda Physik), обладающие положительным линейным дихроизмом, и КД-312 (НИОПИК) с отрицательным линейным дихроизмом.

Линейный дихроизм (LD) определяется следующим образом:

$$LD = \frac{K_{\parallel} - K_{\perp}}{K_{\parallel} + K_{\perp}}. \quad (2)$$

Величины линейного дихроизма рассматриваемых красителей следующие: $LD_{\text{КД-10}} = 0.78$, $LD_{\text{ДСМ}} = 0.59$, $LD_{\text{КД-312}} = -0.54$.

В настоящей работе использовались ЖК-ячейки с плоскими подложками (рис. 1а). Стекла на рисунке обозначены цифрой 1. Для создания однородной ориентации ХЖК на внутренней поверхности стекол наносился слой ориентанта (2). В качестве ориентанта использовался слой полимерного материала (полиимида), который натирался в одном направлении для обеспечения планарной ориентации ХЖК, ось спирали при этом

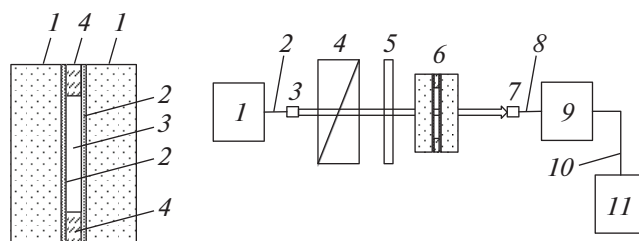


Рис. 1. Схематическое изображение ЖК-ячейки с плоскими подложками: 1 – стеклянные подложки, 2 – ориентант, 3 – ЖК, 4 – тефлоновые прокладки (а). Схема установки для измерения спектров кругового дихроизма ХЖК: 1 – источник света AvaLight ДНС, 2, 3 – волоконно-оптический кабель источника света и его выходное окно, 4 – поляризационный фильтр “призма Глана–Тейлора”, 5 – ахроматическая четвертьволновая пластинка 10RP54-1, 6 – ЖК-ячейка, 7 – входное окно оптоволоконного кабеля CCD спектрометра, 8 – оптоволоконный кабель CCD-спектрометра, 9 – CCD-спектрометр Avaspec-2048, 10 – USB-кабель, 11 – персональный компьютер. Широкой стрелкой указано направление света (б).

направлена перпендикулярно поверхности стекол. Зазор между подложками и, соответственно, толщина слоя ХЖК задавались тефлоновыми прокладками (4), толщина которых составляла ~20–25 мкм. Заполнение ячейки ЖК (3) осуществлялось в изотропном состоянии с помощью капиллярных сил. В дальнейшем ячейка медленно охлаждалась до комнатной температуры.

Схема экспериментальной установки для исследования спектров кругового дихроизма в ЖК показана на рис. 16. Свет от источника света AvaLight DHC (1) направлялся в волоконно-оптический кабель (2), через выходное окно (3) падал на поляризационный фильтр “призма Глана–Тейлора” (4) и далее на ахроматическую четвертьволновую пластинку 10RP54-1 (Newport Corp) (5), ориентированную своей оптической осью под 45° или –45° по отношению к оси поляризатора. В результате на ЖК-ячейку (6) падал либо право-, либо левоциркулярно поляризованный свет. После ячейки свет попадал во входное окно (7) волоконно-оптического кабеля (8) спектрометра Avaspect-2048 (9), который через USB-кабель (10) соединен с персональным компьютером (11) с соответствующим программным обеспечением. Точность измерения коэффициента пропускания в данном эксперименте составляла порядка 1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Все измерения проводились с помощью стандартного CCD-спектрометра, который измеряет спектры пропускания. Круговой дихроизм исследованных образцов получали путем измерения отдельных спектров для право- и левоциркулярно поляризованного света с помощью линейного поляризатора и пластинки $\lambda/4$. Далее из спектра пропускания для левой поляризации вычитали спектр пропускания для правой поляризации, и разность делили на сумму обоих спектров. Таким образом, круговой дихроизм (CD) определялся по формуле

$$CD = \frac{T_{LCP} - T_{RCP}}{T_{LCP} + T_{RCP}}, \quad (3)$$

где T_{LCP} и T_{RCP} – пропускание соответственно лево- и правоциркулярно поляризованного света.

Основные измерения проводились для двух дихроичных красителей КД-10 и КД-312 с противоположными знаками линейного дихроизма в зависимости от спектрального положения зоны селективного отражения относительно полос поглощения красителя. Для этого использовались ХНЖК на основе ЛЖК-2 с различной концентрацией правовращающей ОАД – ГС. В одном случае исследовались ХНЖК также на основе ЛЖК-2, но с другой ОАД – Д-Л, которая индуцирует левую спираль. При этом использовался краситель

ДСМ, обладающий положительным линейным дихроизмом.

На рис. 2а приведены спектры пропускания циркулярно поляризованного света (шкала слева, кривые 1 и 2) и спектры циркулярного дихроизма (шкала справа, кривая 3) красителя КД-10, растворенного в правовращающем ХЖК. Длина волны максимума полосы поглощения красителя $\lambda_{\max} = 650$ нм, длина волны середины брэгговской полосы селективного отражения ХЖК – $\lambda_B = 939$ нм, т.е. полоса поглощения красителя расположена в коротковолновой области (левее) по отношению к полосе селективного отражения ХЖК. Как видно из рисунка, в этом случае пропускание правополяризованного света (кривая 1) в полосе поглощения красителя больше, чем левополяризованного (кривая 2). В соответствии с формулой (3) круговой дихроизм в полосе поглощения отрицательный. Этот краситель имеет еще одну полосу поглощения на длине волны $\lambda = 363$ нм. В этой полосе круговой дихроизм тоже отрицательный. Таким образом, в правовращающем ХЖК круговой дихроизм красителя с положительным линейным дихроизмом является отрицательным, если полоса поглощения лежит в коротковолновой области спектра по отношению к полосе брэгговского отражения. Круговой дихроизм в самой брэгговской полосе в правовращающем ХЖК положительный. На рис. 2б приведены спектры пропускания циркулярно поляризованного света и спектры циркулярного дихроизма того же красителя КД-10, растворенного в правовращающем ХЖК, для которого длина волны середины брэгговской полосы равна $\lambda_B = 478$ нм. Таким образом, основная полоса поглощения красителя с $\lambda_{\max} = 650$ нм расположена в длинноволновой области (правее) по отношению к полосе селективного отражения ХЖК. Другая полоса поглощения красителя на длине волны $\lambda = 363$ нм находится левее полосы селективного отражения ХЖК. Как видно из рис. 2б, в этом случае пропускание правополяризованного света (кривая 1) в полосе поглощения красителя с $\lambda_{\max} = 650$ нм меньше, чем левополяризованного (кривая 2), а в полосе поглощения с $\lambda = 363$ нм больше. Соответственно, круговой дихроизм (кривая 3) в полосе поглощения с $\lambda_{\max} = 650$ нм положительный, а в полосе поглощения с $\lambda = 363$ нм – отрицательный.

На рис. 2в и 2г приведены аналогичные спектры пропускания циркулярно поляризованного света для двух ортогональных круговых поляризаций и спектры кругового дихроизма для ХЖК с добавкой красителя КД-312. Этот краситель обладает отрицательным линейным дихроизмом на длине волны $\lambda_{\max} = 574$ нм, положительным – на длине волны $\lambda = 370$ нм. На рис. 2в пропускание правополяризованного света в полосе поглоще-

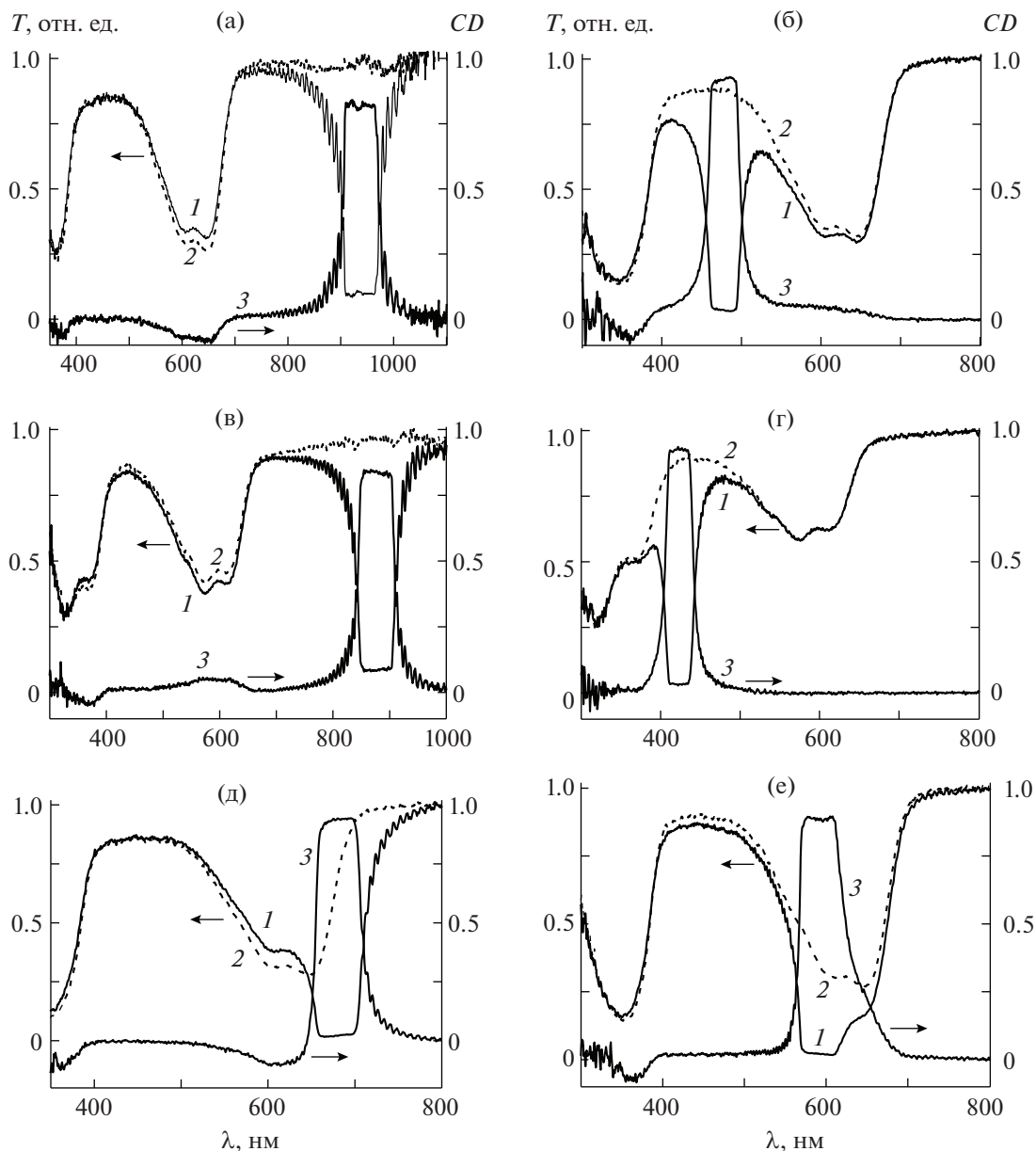


Рис. 2. Спектры пропускания света правой (1) и левой (2, пунктир) циркулярных поляризаций (шкала слева) и спектр кругового дихроизма (3, шкала справа) для правовращающего ХЖК с дихроичными красителями КД-10 (а, б, д, е) и КД-312 (в, г): а – 0.67% КД-10 в ЛЖК-2 + 3.38% ГС, $\lambda_B = 939$ нм, $d = 22.5$ мкм; б – 0.67% КД-10 в ЛЖК-2 + 6.23% ГС, $\lambda_B = 478$ нм, $d = 20.6$ мкм; в – 0.75% КД-312 в ЛЖК-2 + 3.6% ГС, $\lambda_B = 876$ нм, $d = 26.8$ мкм; г – 0.75% КД-312 в ЛЖК-2 + 6.95% ГС, $\lambda_B = 424$ нм, $d = 18.1$ мкм; д – 0.67% КД-10 в ЛЖК-2 + 4.57% ГС, $\lambda_B = 681$ нм, $d = 21.9$ мкм; е – 0.67% КД-10 в ЛЖК-2 + 5.15% ГС, $\lambda_B = 591$ нм, $d = 23.1$ мкм.

ния с отрицательным дихроизмом $\lambda_{\max} = 574$ нм меньше, чем пропускание левополяризованного света, а в полосе поглощения с положительным дихроизмом $\lambda = 370$ нм – больше. Середина брэгговской полосы селективного отражения $\lambda_B = 876$ нм. Таким образом, в правовращающем ХЖК в полосе поглощения красителя с отрицательным линейным дихроизмом, расположенной в коротковолновой части спектра по отношению

к полосе селективного отражения, круговой дихроизм положительный. Для полосы с положительным линейным дихроизмом круговой дихроизм отрицательный. На рис. 2г представлены аналогичные спектры для случая, когда полоса селективного отражения ($\lambda_B = 424$ нм) находится в коротковолновой области спектра по отношению к полосе поглощения красителя с отрицательным дихроизмом. Как видно из рисунка, ве-

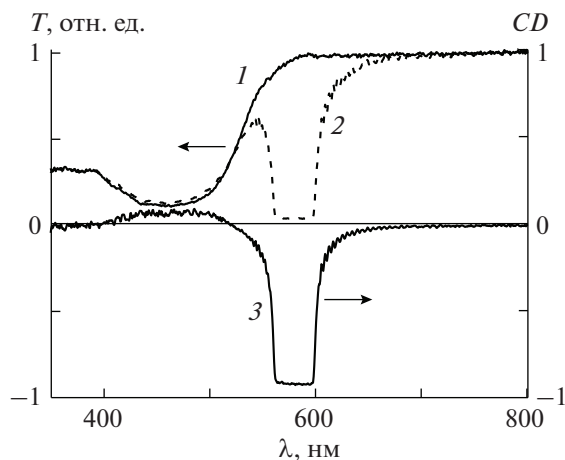


Рис. 3. Спектры пропускания света правой (1) и левой (2, пунктир) циркулярных поляризаций (шкала слева) и спектр циркулярного дихроизма (3, шкала справа) для левовращающего ХЖК с дихроичным красителем DCM: 0.3% DCM в ЛЖК-2 + 20.58% Д-Л, $\lambda_B = 580$ нм, $d = 24.0$ мкм.

личины пропускания право- и левополяризованного света в полосе поглощения красителя практически совпадают и круговой дихроизм равен нулю. По крайней мере, точность измерения не позволяет сделать вывод, что круговой дихроизм данного красителя имеет противоположный знак по сравнению со случаем, когда полоса отражения расположена в длинноволновой части спектра по отношению к полосе поглощения. В [15] было предсказано теоретически, что в случае поглощения может возникнуть асимметрия вращения плоскости поляризации относительно середины брэгговской полосы, а также асимметрия кругового дихроизма вплоть до его полного исчезновения по одну из сторон брэгговской полосы.

На рис. 2д и 2е приведены аналогичные спектры для красителя КД-10, растворенного в правовращающем ХНЖК, при этом полоса селективного отражения перекрывается с полосой поглощения красителя. На рис. 2д длина волны середины брэгговской полосы равна $\lambda_B = 681$ нм, т.е. полоса отражения перекрывает правую (длинноволновую) часть полосы поглощения, на рис. 2е $\lambda_B = 591$ нм и полоса отражения перекрывает левую (коротковолновую) часть полосы поглощения. На рис. 2д та часть полосы поглощения, которая находится вне зоны селективного отражения в коротковолновой области, обладает отрицательным круговым дихроизмом. А на рис. 2е часть полосы поглощения вне зоны селективного отражения в длинноволновой области обладает положительным круговым дихроизмом. Те части полосы поглощения, которые перекрываются с полосой селективного отражения, не

оказывают влияния на спектр селективного отражения и на собственный круговой дихроизм ХЖК. Таким образом, явление, которое в литературе описано как аналог эффекта Бормана в ХЖК, является индуцированным круговым дихроизмом на краю полосы отражения и вне ее. Внутри самой полосы никакого уменьшения или увеличения поглощения не происходит.

На рис. 3 приведены аналогичные спектры для красителя DCM с положительным линейным дихроизмом, растворенного в левовращающем ХЖК. Полоса поглощения красителя ($\lambda_{max} = 460$ нм) расположена в коротковолновой области по отношению к брэгговской полосе селективного отражения ХЖК ($\lambda_B = 580$ нм). Как видно из рисунка, в этом случае пропускание правополяризованного света в полосе поглощения красителя меньше, чем левополяризованного. В соответствии с формулой (3) круговой дихроизм в полосе поглощения положительный. Таким образом, в левовращающем ХЖК круговой дихроизм в полосе поглощения красителя с положительным линейным дихроизмом является положительным, если полоса поглощения лежит в коротковолновой области спектра по отношению к полосе брэгговского отражения. Собственный круговой дихроизм левовращающего ХЖК, обусловленный дифракцией света на периодической хиральной структуре, является отрицательным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что индуцированный круговой дихроизм в полосе поглощения красителя с положительным линейным дихроизмом, растворенного в правовращающем ХЖК, является отрицательным, если полоса поглощения красителя расположена в коротковолновой области спектра по отношению к полосе селективного отражения ХЖК. Если полоса поглощения красителя расположена в длинноволновой области спектра, то индуцированный круговой дихроизм будет положительным. Для красителя с отрицательным линейным дихроизмом, растворенного в правовращающем ХЖК, знаки индуцированного кругового дихроизма противоположны. В коротковолновой области спектра относительно полосы отражения дихроизм будет положительным, а в длинноволновой — отрицательным или равным нулю. Для левовращающего ХЖК как индуцированный, так и собственный круговой дихроизм имеют противоположные знаки по сравнению с правовращающим ХЖК. В случае перекрытия полос поглощения красителя и селективного отражения ХЖК изменение поглощения происходит только на краю зоны отражения и вне ее. Внутри полосы селективного отражения никаких изменений не обнаружено.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-29-11754 офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Huang Yu., Zhou Yi., Hong Q. et al.* // Opt. Commun. 2006. V. 261. P. 91.
2. *Yamada K., Takanishi Yo., Ishikawa K. et al.* // Phys. Rev. E. 1997. V. 56. P. R43.
3. *Li J., Takezoe H., Fukuda A. et al.* // Liq. Cryst. 1995. V. 18. P. 239.
4. *Suresh K.A.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1976. V. 35. P. 267.
5. *Prasad J.S.* // J. Phys. Colloques. C1. 1975. V. 36. P. 289.
6. *Уманский Б.А., Симдянкин И.В.* // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 3. С. 461.
7. *Уманский Б.А., Блинов Л.М., Палто С.П.* // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 11. С. 1078.
8. *Saeva F.D., Sharpe P.E., Olin G.R.* // J. Am. Chem. Soc. 1973. V. 95 (23). P. 7656.
9. *Holzwarth G., Chabay I., Holzwarth N.A.W.* // J. Chem. Phys. 1973. V. 58. P. 4816.
10. *Chabay I.* // Phys. Rev. Lett. 1972. V. 17. P. 283.
11. *Sackmann E., Voss J.* // Chem. Phys. Lett. 1972. V. 14. P. 528.
12. *Osipov M.A., Kuball H.-G.* // Eur. Phys. J. E. 2001. V. 5. P. 589.
13. *Sah Yu., Suresh K.A.* // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. V. 11. P. 640.
14. *Беляков В.А., Дмитриенко В.Е., Орлов В.П.* // Успехи физ. наук. 1979. Т. 127. Вып. 2. С. 221.
15. *Беляков В.А., Дмитриенко В.Е.* // ФТТ. 1976. Т. 18. № 10. С. 2880.
16. *Holzwarth G., Holzwarth A.W.* // J. Opt. Soc. Am. 1973. V. 63. P. 324.
17. *Беляков В.А.* Дифракционная оптика периодических сред сложной структуры. М.: Наука, 1988. 256 с.
18. *Чандрасекар С.* Жидкие кристаллы. М.: Мир, 1980. 345 с.
19. *Vorrmann G.* // Phys. Z. 1941. B. 42. S. 157.
20. *Nityanda R., Kini U.D., Chandrasekhar S. et al.* // Proc. Int. Liquid Crystals Conference, 1973. Bangalore: Pragma Supplement I. P. 325.
21. *Аронишидзе С.Н., Дмитриенко В.Е., Хоитария Д.Г. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 32. Вып. 1. С. 19.