10

Послойная фотополимеризация жидкокристаллических полимеров при низкой мощности ультрафиолетового излучения

© В.С. Соловьев[1], Н.А. Расщепкина[2], М.Л. Кештов[3], С.П. Тимошенков[1]

[1] Московский институт электронной техники,
Москва, Зеленоград, Россия
[2] Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия
[3] Московский институт элементоорганических соединений,
Москва, Россия

e-mail: solov_06_v@mail.ru

Поступила в редакцию 03.11.2025 г.
В окончательной редакции 30.01.2026 г.
Принята к публикации 02.02.2026 г.

Исследована послойная фотополимеризация смеси жидкокристаллического диакрилата, метакрилата и акрилата в присутствии IR 651 в качестве фотоинициатора. Показано, что от концентрации оптически активного акрилата зависит шаг спирали холестерического жидкокристаллического полимера. При уменьшении интенсивности ультрафиолетового облучения наблюдалось сильное изменение концентрации оптически активного акрилата в различных слоях заполимеризованной композиции как в сторону увеличения от первоначальной концентрации, так и в сторону уменьшения, что приводило к расширениию спектра отраженного света от тонкого заполимеризованного слоя.

Ключевые слова: холестерические жидкие кристаллы, жидкокристаллические полимеры, фотополимеризация, ширина спектра отражения, ультафиолетовое излучение.

DOI: 10.61011/OS.2026.04.63023.8744-25

Введение

Для создания дисплейных устройств нового типа, работающих по принципу отражения падающего света без поляризаторов, обсуждается использование тонких слоев холестерических жидкокристаллических (ЖК) полимеров [1,2]. Применение таких материалов существенно сократит затраты и снизит их энергопотребление при создании дисплейных устройств, так как при этом не требуется подсветка с противоположной стороны и исключаются осветительные устройства. Также эти материалы можно использовать для управления светом в „умных“ окнах.

Холестерические ЖК-полимеры характеризуются спиральной супрамолекулярной структурой. Механизм образования спирали в холестерических полимерах типа диакрилат (С6М) — хиральная добавка (EtLact1) основан на хиральном „скручивании“ ахиральных мезогенных мономерных звеньев (С6М) под действием оптически активной хиральной добавки (EtLact1), которая встраивается в структуру, задавая спиральное упорядочивание молекул. Это приводит к формированию хиральной нелинейно-слоистой структуры с характерным шагом спирали, отвечающим за селективное отражение света [1–6]. В связи с этим возникает необходимость управления шириной спектральной полосы света, отраженного от тонкой пленки холестерического ЖК-полимера.

Результаты исследований зависимости шага спирали от концентрации хиральной добавки, проведенные в ряде работ [1–6], показали, что чем больше концентрация хиральных фрагментов в реакционной смеси, содержащей диакрилат, тем большее их количество встроится в молекулярную цепь и тем сильнее будет закрутка и меньше шаг спирали. Максимальное уширение спектра, согласно работам [1–3], составило 220 nm.

Для образования эластомерных покрытий Ch-LC в работе [7] применяли двухстадийный механизм тиол-акриловой полимеризации после нанесения смеси Ch-LC на стержень, который обеспечивал равномерное выравнивание ЖК-частиц за счет сдвигового выравнивания, при комнатной температуре. Авторы использовали смеси мономеров Ch-LC, содержащие дитиол (20 wt%), фотоинициатор BP (1 wt%), катализатор триэтиламин (2 wt%), хиральную добавку (4, 5 или 7 wt%) и ЖК-мономер диакрилат. На первом этапе полимеризации смеси, которую часто называют реакцией присоединения Михаэля, происходит линейная ступенчатая полимеризации мономеров в присутствии катализатора. На втором этапе полученные олигомеры подвергают фотополимеризации. Образовавшиеся радикалы вызывают гомополимеризацию акриловых концевых групп, в результате чего акрилаты выступают в качестве сшивающих агентов. Образуется сетчатая структура, которая „фиксирует“ полосу отражения Ch-LC. Покрытия отверждали ультрафиолетовым (УФ) источником Omnicure S2000 при мощности 30 mW/cm^2 в течение 300 s. Нанесение широ-

кополосных и узорчатых покрытий требует увеличения числа этапов получения и их длительности. Например, полученные на первом этапе пленки частично отверждались УФ-источником Omnicure S2000 при мощности 0.4 mW/cm^2 в течение 45 s. На незатвердевших участках пленки продолжалась реакция присоединения тиола по Михаэлю. Через четыре часа покрытие полностью отверждалось фотополимеризацией при мощности освещения 30 mW/cm^2 в течение 300 s. Авторы работы полагают, что градиент шага спирали по толщине слоя в 30 μm создавался за счет удаления фронта реакции Михаэля от поверхности, которая освещалась УФ-светом при низкой мощности излучения, в глубину, где концентрация хиральной добавки была меньше, а следовательно, меньше степень закрутки полимера.

Изменяя состав смеси мономеров, длительность процедуры формирования и отверждения покрытия, удалось расширить полосу отражения света от 120 до 400 nm [7]. Таким образом, в работах [1–3,7] задача управления шириной спектральной полосы света, отраженного от тонкой пленки холестерического ЖК-полимера, была решена в ограниченном спектральном интервале.

Изучению влияния состава системы „ЖК диакрилат–хиральная добавка“ на ширину спектральной полосы света посвящена и настоящая работа. Полученное нами уширение спектра составило 500 nm, что в 2.3 раза больше, чем в работах [1–3]. Достижение этого результата обусловлено добавлением нейтрального метакрилового компонента, имеющего скорость полимеризации намного ниже, чем у основного акрилового компонента [8].

Материалы и методика эксперимента

Материалы

В работе были использованы коммерческие продукты оптически неактивный ЖК-диакрилат С6М производства фирмы Merk, оптически активный хиральный допант Et Lact1 — представляющий собой линейный ЖК акриловый мономер, оптически неактивный метакриловый мономер СР-439, поглотитель экспонирующего излучения кумарин 102, фотоинициатор Irgacure 651 фирмы Ciba–Geigy, который далее в статье обозначается как IR 651.

Установки для физического эксперимента и облучения образцов

Для приготовления ЖК-композиций была приготовлена кварцевая пластина ($80 \times 20 \times 2$ mm) с пятью углублениями в один ряд, каждое объемом $\sim 2\,\text{cm}^3$. Для разогревания и смешивания порошкообразных компонентов была изготовлена стеклянная токопроводящая пластина с размером $100 \times 100 \times 10$ mm с напылением ITO и терморегулятором температуры нагрева в интервале $(20–250) \pm 1$°C. Изготовленную кварцевую пластину для экспонирования образцов располагали на расстоянии $\sim 1–2$ cm от нагревательной пластины, после чего облучали УФ-светом на установке для литографии М–6000. Для регулировки мощности оптического излучения были изготовлены фильтры на основе металлической сетки с ячейками размером от 1 до 0.5 mm. При подготовке эксперимента была измерена общая мощность лампы ДРТ-350, используемая в установке. Общая мощность потока составляла примерно 30 W излучения для всего спектрального состава в фокусе пятна излучения. Далее была измерена общая мощность светового потока на длине волны 365 nm — длине волны поглощения фотоинициатора IR-500. В лампе ДРШ-350, помимо ксенона, содержатся ещё два основных газа: аргон — служит буферным газом, облегчающим запуск разряда и поддерживающим стабильное горение дуги, пары ртути — обеспечивают высокую яркость свечения и способствуют формированию специфического спектра излучения, характерного для ртутных ламп. Линия 365 nm в этой лампе является самой мощной. Ее мощность составила 20 mW на общей площади светового пятна диаметром 13 cm. В пересчете на 1 cm^2 это составит 0.3mW/cm^2. В ходе экспериментальной работы спектры поглощения были измерены на спектрофотометре Lambda 950 фирмы „Perkin Elmer“, США. Образцы холестерических полимерных пленок отражают свет на длине волны, соответствующей шагу спирали. Поэтому этот свет не проходит в прибор. Мы работаем на спектрофотометре на поглощение и считаем, что измеренные значения поглощенной мощности являются отраженной мощностью.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Построение экспериментального графика зависимости влияния концентрации допанта на спектр отражения тонкого слоя жидкокристаллической смеси

Прежде чем проводить исследования влияния длительности полимеризации на расширение спектра, была изучена зависимость влияния концентрации допанта на цвет образующейся смеси и длину волны отраженного от нее света. Зависимость длины волны отраженного света ЖК-композиции от концентрации оптически активного мономера EtLact 1 показана на рис. 1.

Для построения графика были приготовлены смеси Et Lact1 и диакрилата С6М, в которых содержание допанта изменялось от 0.5 до 36 wt%. Из графика следует, что увеличение концентрации оптически активного мономера в смеси уменьшает длину волны отраженного света. Иными словами, чем больше содержание допанта в смеси, тем глубже в УФ-область уходит спектр.

Все концентрационные изменения допанта описываются графиком на рис. 1. Изменение концентрации до-

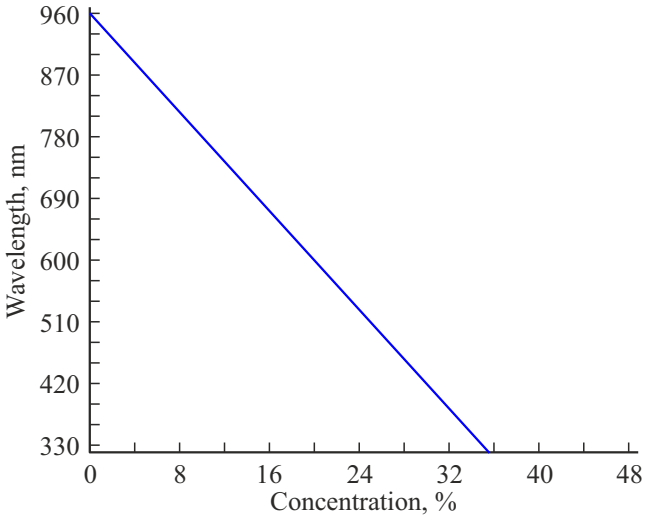


Рис. 1. Зависимость длины волны отраженного света ЖК-композиции от концентрации оптически активного мономера EtLact1.

панта в ЖК-системе, изменяющее шаг спирали, проявляется в изменении спектральных характеристик образца, которые прописываются на спектрометре. Поскольку полимеризация идет послойно от входного окна к выходному, то, очевидно, что в разных слоях концентрация допанта будет соответствовать разным цветовым точкам на рис. 1. Иными словами, график зависимости длины волны отраженного света ЖК-композиции от концентрации оптически активного мономера EtLact 1 (рис. 1) можно использовать в качестве градуировочного графика для определения концентрации допанта в разных слоях покрытия.

Оптические спектры при полимеризации жидкокристаллической светочувствительной смеси с использованием несшивающегося поглотителя кумарина 102 и сшивающегося метакрилового мономера CP439

Для максимального расширения спектра отражения были выбраны две смеси состава C6M(65wt%):Et Lact1 (25 wt%): кумарин 102(9.5 wt%): IR 651 (0.5 wt%) и C6M (65 wt%): Et Lact1 (25 wt%): CP 439(9.5 wt%): IR 651 (0.5 wt%), одна из которых была с несшивающимся компонентом — поглощающим УФ-излучение кумарином 102, а вторая — поглощающая и сшивающаяся под действием УФ-облучения содержала CP 439. На основе этих двух оптимизированных расплавленных композиций при температуре 70°C, соответствующей нематической фазе, были приготовлены образцы ЖК-полимеров, ориентированных методом сдвига. Контроль наличия ЖК-состояния производили визуально по изменению цвета при сдвиге стекол. Затем образцы облучали УФ-светом на установке марки ЭМ-6000 при регулировании мощности экспозиции от 0.3 до 0.005 mW/cm^2.

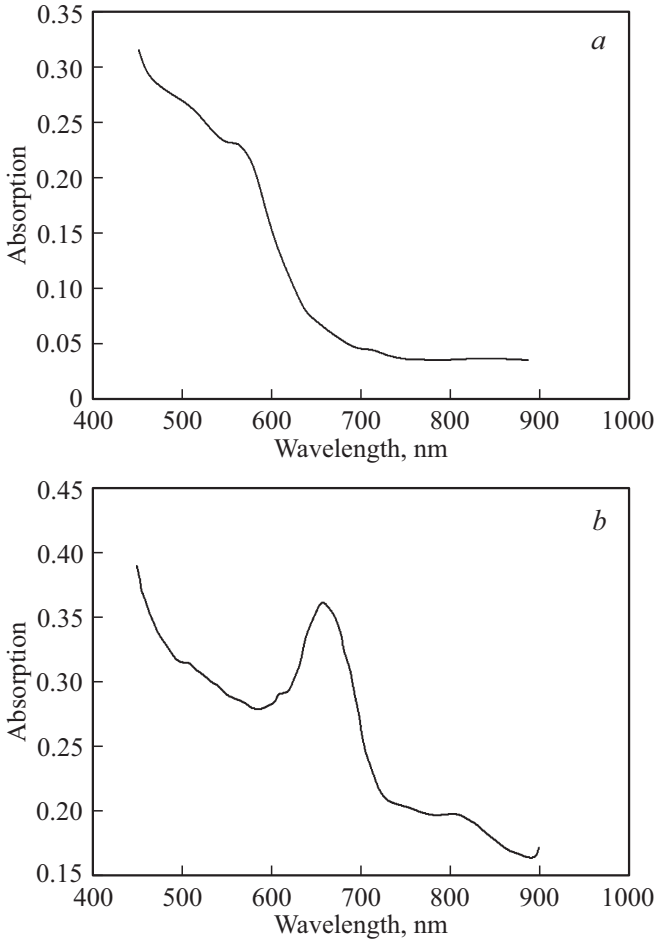


Рис. 2. Спектры поглощения композиции состава C6M (65 wt%):Et Lact1(25 wt%): кумарин 102(9.5 wt%): IR 651 (0.5 wt%): (*a*) при мощности облучения 0.3 mW/cm^2, (*b*) при мощности облучения 0.1 mW/cm^2.

С помощью сетчатых фильтров излучение лампы (ДРШ-350) можно ослабить в 10 раз (от 0.3 до 0.03 mW/cm^2).

На рис. 2 показаны спектры поглощения композиции состава C6M (65 wt%):Et Lact1(25 wt%): кумарин 102(9.5 wt%): IR 651(0.5 wt%) при мощности облучения от 0.3 до 0.005 mW/cm^2. При постепенном уменьшении мощности облучения от 0.3 до 0.03 mW/cm^2 максимумы спектров поглощения данной композиции изменяются от 555 (рис. 2, *a*) до 785 nm (рис. 3, *a*), т.е. смещаются в красную область. При дальнейшем уменьшении мощности слой акрилата Et Lact1, который формирует спираль холестерической ЖК-композиции, выдавливается из системы, в результате спектр начинает расширяться и уменьшаться по амплитуде (рис. 3, *b* и 4). При уменьшении мощности облучения до 0.005 mW/cm^2 максимум спектра поглощения исчезает (рис. 4). Оптически активный акрилат не вступает в реакцию сополимеризации. Во второй смеси состава C6M(65 wt%):EtLact1(25 wt%):CP 439(9.5 wt%):IR 651(0.5 wt%) вместо кумарина в качестве поглотителя выбрали метакрилат, который может сополимеризоваться диакрилатом C6M и акри-

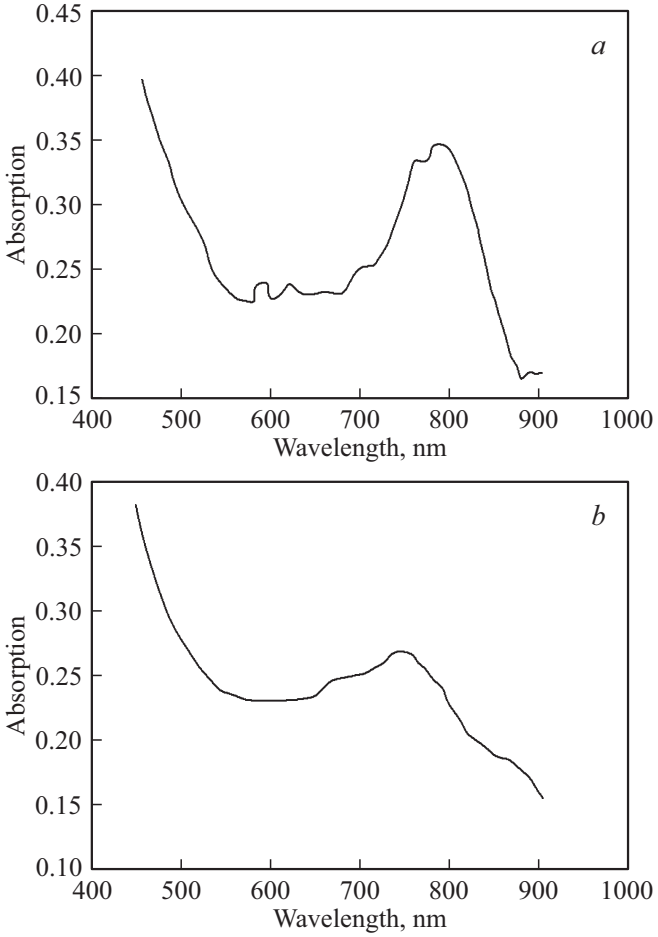


Рис. 3. Спектры поглощения композиции состава С6М (65 wt%): Et Lact1 (25 wt%): кумарин 102 (9.5 wt%): IR 651 (0.5 wt%): (*a*) при мощности облучения 0.03 mW/cm^2, (*b*) при мощности облучения 0.01 mW/cm^2.

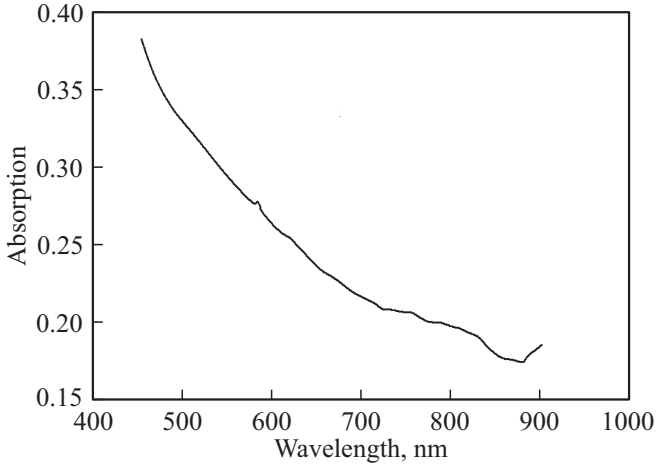


Рис. 4. Спектр поглощения композиции состава С6М (65 wt%): Et Lact1 (25 wt%): кумарин 102 (9.5 wt%): IR 651 (0.5 wt%) при мощности облучения 0.005 mW/cm^2.

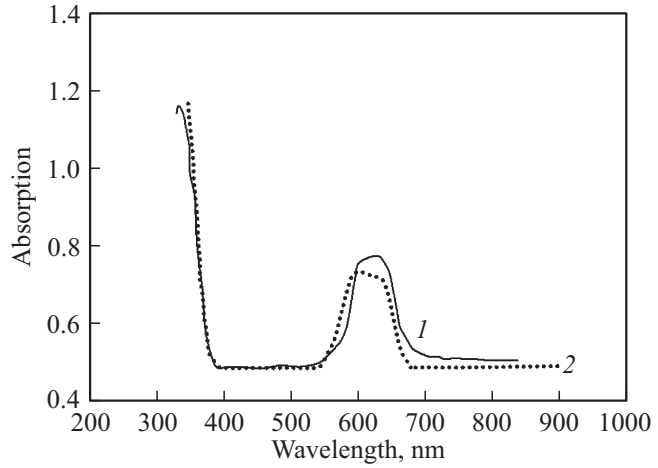


Рис. 5. Спектры поглощения заполимеризованных ЖК-слоев состава С6М (74.7 wt%): EtLact1 (22 wt%): CP 439 (2.9 wt%): IR 651 (0.4 wt%): время полимеризации 2 (*1*), 1 min (*2*); мощность облучения 0.1 (*1*), 0.3 mW/cm^2 (*2*).

латом EtLact1. Скорость сшивки и соответственно его концентрация в разных слоях композиции при послойной полимеризации будет разная [8].

На рис. 5–8 показаны спектры поглощения заполимеризованных пленок состава С6М(74.7 wt%):EtLact1(22 wt%):CP 439(2.9 wt%):IR 651(0.4 wt%), при мощностях облучения 0.1, 0.3 и 0.03 mW/cm^2 и времени экспозиции 1–20 min.

Исходная длина волны максимума отраженного света состава С6М (74.7 wt%): EtLact1 (22 wt%): CP 439 (2.9 wt%): IR 651 (0.4 wt%) до полимеризации составляет 610 nm. Спектр поглощения заполимеризованных ЖК-слоев этого состава расширяется при уменьшении мощности излучения и увеличении времени экспонирования (рис. 6). Аналогичная картина наблюдается на спектрах поглощения заполимеризованных ЖК-слоев того же состава С6М (74.7 wt%):EtLact1 (22 wt%):CP 439 (2.9 wt%):IR 651 (0.4 wt%), но отличающихся длительностью приготовления (рис. 7).

Таким образом, для образцов одинакового состава спектр поглощения расширяется (рис. 6, 7) при уменьшении мощности излучения и увеличении времени экспонирования.

Увеличение содержания EtLact 1 от 22 до 24 wt% и поглощающего компонента от 4 до 10 wt% в образце приводит к расширению спектра поглощения в 2.3 раза (рис. 8). При этом время облучения увеличивается от 1 до 50 min. Из рис. 8 видно, что спектр поглощения смеси С6М(65.6 wt%):EtLact1(24 wt%):CP 439(10 wt%):IR 651(0.4 wt%),практически представляет собой прямую горизонтальную линию от 400 до 880 nm с резким подъемом при 380 nm.

Согласно авторам [1,2], при облучении УФ-светом ($\lambda = 365$ nm) тонкого слоя ориентированной вышеуказанной ЖК-композиции начинается диффузия хирального компонента в сторону увеличения интенсивности света, т. е. в сторону входного окна. При этом меняется

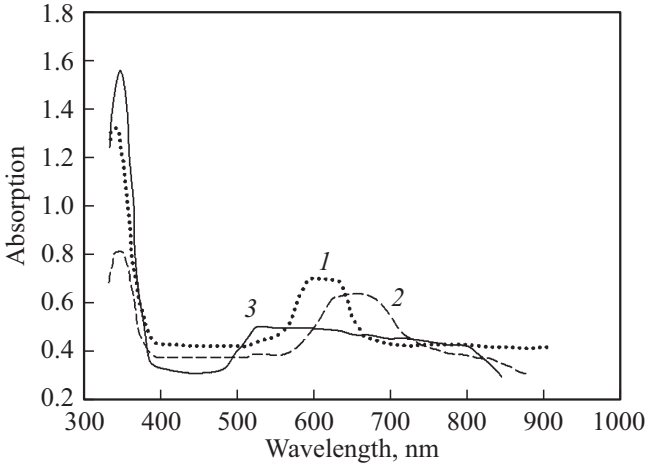


Рис. 6. Спектры поглощения заполимеризованных ЖК-слоев состава C6M (74.7 wt%): EtLact1 (22 wt%): CP 439 (2.9 wt%): IR 651 (0.4 wt%): время полимеризации 2 (*1*), 5 (*2*), 20 min (*3*); мощность облучения 0.3 (*1*), 0.1 (*2*), 0.03 mW/cm^2 (*3*).

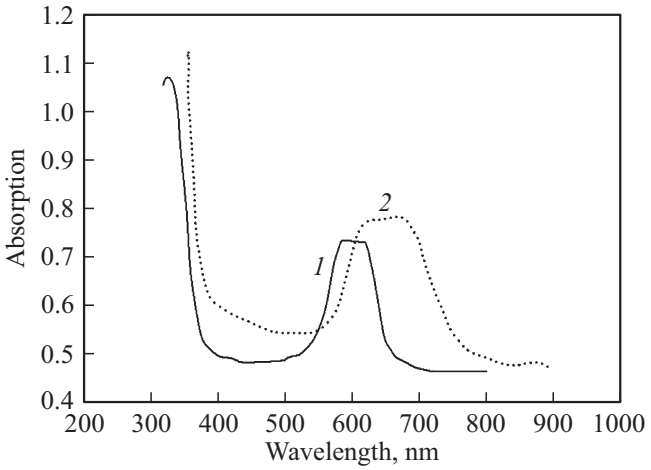


Рис. 7. Спектры поглощения заполимеризованных ЖК-слоев состава C6M (74.7 wt%): EtLact1 (22 wt%): CP 439 (2.9 wt%): IR 651 (0.4 wt%): время полимеризации 2 (*1*), 20 min (*2*); мощность облучения 0.3 (*1*), 0.03 mW/cm^2 (*2*).

концентрация ЖК-смеси от передней плоскости ячейки до задней. В соответствии с распределением концентрации каждый слой в глубине ячейки имеет определенный шаг спирали. Амплитуда отраженного света для определенной длины волны будет зависеть от толщины ЖК-слоя и шага спирали. Другими словами, ЖК-ячейку с холестерической структурой можно рассматривать как многослойное зеркало, где коэффициент отражения каждого слоя равен полному коэффициенту отражения, деленному на количество слоев.

Таким образом, зная полную толщину ЖК-ячейки, можно оценить коэффициент отражения одного слоя, а по интенсивности отраженного света можно рассчитать число слоев многослойного зеркала, что позволяет по скоростям нарастания и спада спектральных

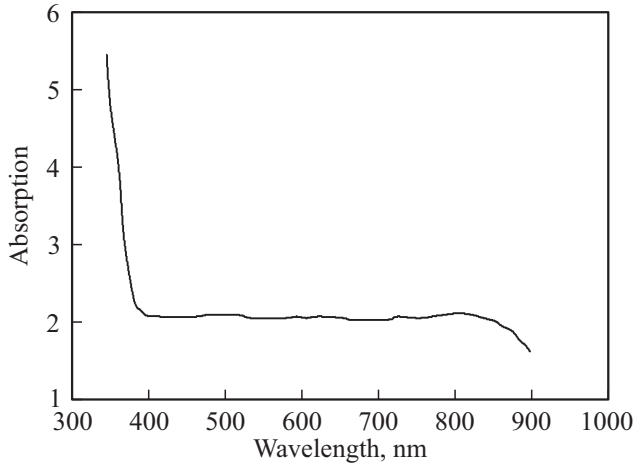


Рис. 8. Спектр поглощения заполимеризованной ЖК-смеси C6M (65.6 wt%): EtLact1 (24 wt%): CP 439 (10 wt%): IR 651 (0.4 wt%), время полимеризации 50 min.

характеристик определить распределение концентрации хирального допанта по окончании процесса диффузии и завершения процесса фотополимеризации. Найденные начальные и конечные значения поперечных концентраций слоя позволят при дальнейших исследованиях построить уравнение диффузии, проходящей в процессе экспозиции.

В ранних работах [1,2] не удавалось расширить спектральный диапазон ЖК-композиций рассматриваемого состава более чем на 220 nm из-за того, что в системе при полимеризации смеси концентрация допанта в тонком слое менялась недостаточно для необходимого спектрального расширения. Для преодоления вышеупомянутых недостатков нами в ЖК-композицию введен третий нейтральный компонент CP 439, обеспечивающий такое распределение концентрации хирального активного компонента, при котором уширение спектра составило 500 nm (рис. 8). Если в описываемой системе при изменении концентрации от 20 до 30 wt% спектр отражения меняется в диапазоне от 380 до 680 nm, то для расширения спектрального диапазона в 2 раза в систему необходимо добавить 10 wt% нейтрального компонента.

Диффузия при послойной фотополимеризации

Рассмотрим подробно процесс послойной полимеризации в тройной системе: ЖК-диакрилат C6M: линейный акриловый ЖК хиральный мономер EtLact1: нейтральный компонент (линейный метакриловый мономер CP439 или кумарин). Нейтральный компонент (линейный метакриловый мономер CP439 или кумарин создает градиент освещенности. Диффузионные процессы во время фотополимеризации ЖК-смесей, представленных в данной работе, в некоторой степени напоминают

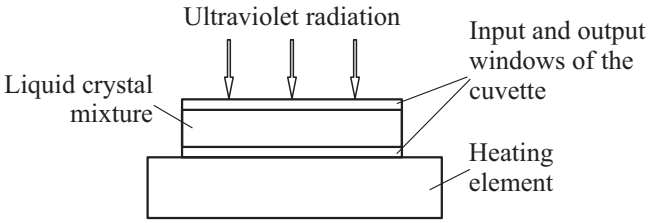


Рис. 9. Принципиальная схема установки фотополимеризации ЖК-образцов.

процессы полимеризации и образования микрорельефа в жидких фотополимеризующихся композициях (ЖФПК), когда уменьшение мощности облучения слоев ЖФПК приводило к сильному увеличению роста полученного микрорельефа [9–15]. При падении света на переднюю плоскость ячейки (рис. 9) входной световой поток, затухает по амплитуде.

При облучении УФ-светом по окончании индукционного периода начинается послойная полимеризация тройной системы. Диакрилат сополимеризуется с акриловым мономером, а кумарин 102 создает градиент светового поля. Иными словами, начинается процесс образования полимерной сетки, густота которой максимальна на входной грани. Густота сетки уменьшается в направлении к задней грани постепенно. При этом за счет расходования обоих компонентов возникает разность концентраций между слоями. Полагаем, что в слое, лежащем ближе к входной грани, концентрация мономеров будет меньше из-за расходования их при полимеризации и ухода таким образом из жидкой мобильной системы. Поэтому и диакрилат, и линейный акрилат будут диффундировать в сторону входной грани. Третий нейтральный компонент будет выдавливаться из образующейся сетки в противоположную сторону, и его концентрация будет постепенно возрастать в сторону заднего окна ячейки.

Таким образом, будем иметь два диффузионных потока в разные стороны. Первый поток — диакрилат С6М и акрилат-хиральная добавка EtLact1, идущие в сторону входного окна, второй поток — метакриловый мономер СР439 (или кумарин 102), выдавливаемый из системы, так как на его место идет активный поток акрилатов за счет постоянно поддерживаемой разности концентраций в процессе фотополимеризации. Реакционноспособные мономеры акрилатов, выдавливая нереакционноспособные компоненты, одновременно закрепляются на поверхности стекол, образующих ячейку. Разница между СР439 и кумарином 102 заключается в том, что кумарин 102 не взаимодействует с компонентами смеси и не может закрепиться в системе, поэтому в конце концов полностью выдавливается из нее. Мономер СР439, проходя сквозь систему акрилатов, сшивается с ними. Главная задача — подобрать скорость сшивки, т. е. скорость реакции фотополимеризации такой, чтобы СР439 не выдавливался полностью за пределы системы тогда, когда уже в пределах заднего окна концентрация акрилатов С6М и Et Lact1 будет низкой. Это необходимо для образования холестерической смеси низкой концентрации.

При этом предполагается, что реакционноспособные мономеры проходят сквозь нереакционноспособный мономер, причем длина этого прохождения будет линейно возрастать по ходу реакции и продвижения фронта полимеризации к задней стенке. При прохождении реакционноспособных мономеров через зону реакции нейтрального компонента наблюдается барьер, через который должны пройти линейный и бифункциональный мономеры, коэффициенты диффузии которых определяются степенью сродства к нему и могут быть существенно разными. Далее при увеличении концентрации нейтрального компонента в сторону выходного окна происходит относительное уменьшение концентрации EtLact в системе, что смещает длину отраженной волны в красную область (рис. 1). Как видно из рис. 2, *a*, максимум спектра поглощения смеси С6М (65 wt%):Et Lact1(25 wt%): кумарин 102(9.5 wt%): IR 651(0.5 wt%) наблюдается при 555 nm, мощность облучения 0.3 mW/cm^2. При уменьшении мощности облучения и увеличении времени экспозиции максимум спектра поглощения смещается в красную область (655 nm, рис. 2, *b*; 785 nm, рис. 3, *a*), на рис. 3, *b* начинается спад пика за счет выдавливания кумарина 102 к задней стенке кюветы. Максимум поглощения кумарина 102 исчезает (рис. 4).

Таким образом, добавление нейтрального компонента кумарина 102(9.5%) к смеси С6М (65 wt%):Et Lact1(25wt%): IR 651(0.5 wt%) привело к расширению спектра поглощения образца в длинноволновую область. Нейтральный компонент кумарин 102 полностью выдавливается из системы при низкой мощности УФ-излучения (рис. 4). В этом случае не наблюдается уширения спектра поглошения ЖК-смеси.

Введение в ЖК-систему медленно сшивающегося агента метакрилата СР439 позволило сохранить снижение концентрации при встречной диффузии и расширение спектра поглощения в длинноволновую область смеси состава С6М (65 w%):Et Lact1 (25 wt%):СР439 (9.5 wt%): IR 651(0.5 wt%). Метакрилат полимеризуется в 10−50 раз медленнее акрилата [8]. При движении навстречу при его выдавливании в сторону задней стенки он сшивается с основными компонентами композиции С6М и EtLact1 и таким образом по пути выдавливания частично остается, уменьшая концентрацию и таким образом расширяя спектр в длинноволновую область.

Из сказанного следует, что в указанной тройной системе расширение спектра обеспечивается следующими процессами послойной фотополимеризации.

1) Увеличение концентрации хирального допанта EtLact1 в области входного окна УФ-света происходит за счет встречной диффузии в сторону входного окна при послойной фотополимеризации, что дает расширение спектра в коротковолновую область 380 nm.

2) Уменьшение концентрации хирального допанта EtLact1 в области заднего окна происходит за счет его перекачки из области заднего окна в область переднего с одновременным смешиванием с нейтральным компонентом CP-439 или кумарином 102 и постепенным диффузионным перемещением к заднему окну, что дает расширение спектра в длинноволновую область спектра 880 nm.

3) Нейтральный кумарин 102 не связывается с компонентами системы и выдавливается при медленной полимеризации к задней стенке.

4) Равномерным и широким оптический спектр отражения падающего света получился за счет введения в систему оптически неактивного линейного метакрилового мономера CP-439 с сильным поглощением на длине волны 365 nm, который на всей диффузионной длине сшился и не выдавился из системы.

5) Введение в систему метакрилового мономера, скорость полимеризации которого ниже, чем у акрилатов, позволит при необходимости еще больше расширить спектр отражения падающего света. С этой целью нужно увеличить концентрацию метакрилового мономера и подобрать концентрации остальных компонентов ЖК-системы.

Выводы

Введение в систему, содержащую C6M(65.6 wt%), EtLact1(24 wt%), IR 651(0.4 wt%), линейного метакрилового мономера CP-439 в количестве 10 wt% при уменьшении мощности до 0.03 mW/cm^2 и увеличении времени полимеризации до 60 min приводит к получению образца, в котором концентрация EtLact1 послойно изменяется от 4 до 32 wt%. В результате образец после полимеризации поглощает излучение в диапазоне от 380 до 880 nm, тогда как до начала полимеризации он поглощал излучение 520 nm и имел ширину спектра 50 nm.

Ориентированные образцы с толщиной слоя от 10 до 20 μm, освещенные белым светом, отражают излучение от 380 до 880 nm (от фиолетового до инфракрасного). Максимальное уширение составляет 500 nm, что в 2.3 раза больше, чем в работах [1–3]. Этот эффект был достигнут за счет добавления в систему ЖК „диакрилат–хиральная добавка“ нейтрального компонента, в роли которого выступает метакриловый компонент, имеющий скорость полимеризации намного ниже, чем основной акриловый компонент.

Применение катализируемой триэтиламином реакции присоединения Михаэля для получения эластомерных покрытий Ch-LC в работе [7] позволило авторам расширить полосу отражения света от 120 до 400 nm. Следует отметить, что длительность формирования и засветки широкополосных покрытий составляет более 4 h. Использование в нашей работе послойной радикальной полимеризации смеси ЖК-диакрилата, метакрилового и акрилового мономеров в присутствии IR 651 в качестве фотоинициатора не только значительно уменьшает длительность получения покрытия, но и расширяет полосу отражения света от 50 до 500 nm.

Предлагаемый метод позволяет создать оптические фильтры необходимой ширины в разных частях спектрального диапазона. Ширину и положение спектральной характеристики на частотной оси можно регулировать как с помощью изменения концентраций допанта и нейтрального компонента, так и с помощью изменения мощности излучения. Наложив оптический клин при экспонировании на образец с ЖК-композицией, можно получить линейный клин с разной спектральной шириной отраженного излучения в каждой точке, а передвигая такой клин поперек тонкого падающего на образец луча, получить прибор с регулируемой спектральной шириной отраженного луча. Разбив изображения какого-либо рисунка на разные шаблоны, можно получить разноцветное изображение этого рисунка, освещая образец с ЖК-композицией разное время через каждый шаблон. Для устройств фотоники с волноводными системами можно создавать фотонные запрещенные зоны и использовать полимерные ЖК-композиции для создания волноводных слоев в определенном спектральном диапазоне.

Финансирование работы

Настоящая работа была выполнена в инициативном порядке.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] D.J. Broer, G.N. Mol, J.A.M.M. van Haaren, J. Lab. Adv. Mater, **11** (7), 573 (1999).
[2] D.J. Broer, G.N. Mol, J.A.M.M. van Haaren, G.N. Mol. Nature, **378** (30), 467 (1995).
[3] S. Relaix, C. Bourgerette, M. Mitov. Appl. Phys. Lett., **89**, 251907 (2006).
[4] F.D. Saeva, J.J. Wysocki. J. Am.Chem. Soc., **93**, 5928 (1971).
[5] T. Nakagiri, H. Kodama, K.K. Kobayashi. Phys. Rev. Lett., **27**, 564 (1971).
[6] М.Г. Томилин, Г.Е. Невская. *Фотоника жидких кристаллов* (Изд-во Политехн. ун-та, СПб., 2011).
[7] P.A. Ellen, van Heeswijk, Lanti Yang, Nadia Grossiord, P.H. Albertus. J. Schenning Adv. Funct. Mater, **30**, 1906833 (2020).
[8] А.А. Берлин, Т.Я. Кефели, Г.В. Королев. *Полиэфиракрилаты* (Наука, М., 1967).
[9] В.С. Соловьев, Ю.Б. Бойко. Компьютерная оптика, **8**, 74 (1990).
[10] В.С. Соловьев. Компьютерная оптика, **10**–**11**, 145 (1992).
[11] Y.B. Boiko., V.M. Granchak, I. Dilung, V.S. Solovjev, V.A. Sojfer. Proc. SPIE, **1238**, 253 (1990).

[12] В.С. Соловьев, В.А. Сойфер, И.Н. Сисакян, Ю.Б. Бойко, В.М. Гранчак, И.И. Дилунг. Способ изготовления рельефно-фазовых фокусирующих элементов. А.С. 1624864 СССР, МКИ В 29 Д 11/00 1989.
[13] А.В. Волков, С.Г. Волотовский, В.М. Гранчак, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер, В.С. Соловьев, Д.М. Якуненкова. ЖТФ, **65** (9), 181 (1995).
[14] Yu.B. Boiko, V.S. Soloviev. In: *Photopolymer Materials (for computer generated optics)-Polymeric Materials Encyckopedia: Synthesis, Properties and Application* (CRC Press. Inc., 1995).
[15] *Methods for computer design of diffractive optical elements* (J. Wiley and Sons Inc., N.Y., 2002).