

Физика

Научная статья

УДК 544.25; 678.7

**ОРИЕНТИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ОТСЛОЕННОЙ И ПЕРЕВЕРНУТОЙ
АНИЗОТРОПНОЙ ПЛЕНКИ ИЗ ПОЛИМЕРИЗУЕМОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА**

Ирина Валерьевна Касьянова*, Артур Рубенович Гейвандов

*Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова, Курчатовский комплекс кристаллографии и
фотоники, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 3.03.2025

Одобрена 3.04.2025

Принята 14.04.2025

Ключевые слова:

фотоориентация,
ориентант,
полимерный жидкий
кристалл,
RM257,
лазерная голография,
дифракционный оптический
элемент (ДОЭ)

АННОТАЦИЯ

Для ориентации жидких кристаллов (ЖК) используют специально обработанные ориентирующие слои. При послойном нанесении полимеризуемого жидкого кристалла роль ориентирующего слоя играет верхняя поверхность предыдущего слоя. Нам удалось отделить от подложки сориентированную на поверхности азокрасителя пленку из полимеризуемого ЖК RM257 и использовать другую ее сторону для ориентирования следующего слоя ЖК. На поверхности стекла создавали ориентирующий слой с помощью азокрасителя «бриллиантовый желтый», облученного линейно-поляризованным светом, который затем покрывали слоем RM257. После полимеризации ЖК-слоя на его поверхность наносили каплю УФ-полимеризуемого клея и прижимали вторую подложку. После фиксации УФ-клея полученный сэндвич механически разделяли. В процессе разделения подложек азокраситель остается на исходной подложке, а на вторую подложку переносится полимеризованная пленка ориентированного RM257. Полученная поверхность обеспечивает качественную ориентацию ЖК-материала – как однородную, так и со сложным пространственно-периодическим распределением директора ЖК в плоскости подложки, характерным для дифракционных оптических элементов. Данный подход позволяет избавиться от потерь пропускания, связанных с поглощением азокрасителя, значительно улучшает адгезию пленки и позволяет переносить ориентированную пленку на разнообразные подложки.

DOI:

10.18083/LCAppl.2025.2.70

EDN:

<https://elibrary.ru/nxpmjc>

Для цитирования:

Касьянова И. В., Гейвандов А. Р. Ориентирующие свойства поверхности отслоенной и перевернутой анизотропной пленки из полимеризуемого жидкого кристалла // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2025. Т. 25, № 2. С. 70–79.

Physics

Original Article

**ALIGNMENT PROPERTIES OF THE SURFACE OF PEELED OFF AND FLIPPED
ANISOTROPIC LIQUID CRYSTAL POLYMER FILM**

Irina V. Kasyanova*, Artur R. Geivandov

*Shubnikov Institute of Crystallography, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics,
NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 3 March 2025

Approved 3 April 2025

Accepted 14 April 2025

Key words:

photoalignment,
alignment,
polymer liquid crystal,
RM 257,
laser holography,
diffractive optical
element (DOE)

The alignment of liquid crystals (LC) can be arranged using specially prepared alignment layers. In the case of layer-by-layer deposition of a polymerizable LC, the upper surface of the preceding layer plays the role of the alignment layer. We succeeded in separating the film of the polymerizable LC RM257 aligned on the azo dye surface from the substrate and using its opposite side to align the next LC layer.

The "Brilliant yellow" azo dye as photoalignment layer was irradiated by linearly polarized light with subsequent coating of RM257 layer, followed by its UV-curing. Then, a drop of UV-polymerizable glue was applied to the surface of the polymer film and the second substrate was attached. After fixing the UV glue, the resulting sandwich was mechanically separated. In the process of substrate separation, the azo dye remains on the mother substrate, and the oriented polymerized film of RM257 is transferred to the second substrate. The resulting alignment surface provides high-quality orientation of LC materials – both uniform and with a complex spatially periodic distribution of the LC director typical for diffraction optical elements. This approach eliminates transmission losses associated with the azo dye absorption, significantly improves the adhesion of the film, and allows for transferring the aligned film onto various substrates.

DOI:

10.18083/LCAppl.2025.2.70

EDN:

<https://elibrary.ru/nxpmjc>

For citation:

Kasyanova I. V., Geivandov A. R. Alignment properties of the surface of peeled off and flipped anisotropic liquid crystal polymer film. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2025, **25** (2), 70–79 (in Russ.).

Введение

Ориентация жидких кристаллов (ЖК) поверхностью подложки сыграла ключевую роль в их практическом применении. На заре ЖК-эры для этого использовались натирка стекла, ориентация при помощи наклонного напыления SiO_2 и, наконец, натирка полиимидного покрытия, которая обеспечивает высокую энергию сцепления и позволяет создавать ЖК-ячейки с надежно воспроизводимым электрооптическим переключением [1].

Новым этапом в развитии способов ориентации ЖК стало применение фотоориентации поляризованным светом в начале 1990-х годов. В качестве фоточувствительного материала типично используются азокрасители, которым свойственна обратимая изомеризация под действием света, либо фотополимеризуемые материалы [2]. В обоих случаях при облучении линейно поляризованным светом в пленке возникает выделенное направление, вдоль которого ориентируются молекулы ЖК. Наиболее очевидным преимуществом фотоориентации, в отличие от механических способов, в частности, натирки полимерных слоев, является бесконтактность, которая позволяет избежать привнесения на ориентирующую поверхность пыли, механических повреждений и электростатического заряда, что существенно повышает качество темного состояния ЖК-дисплеев.

Другое важнейшее свойство фотоориентации, которое породило целые классы новых устройств на основе ЖК, это возможность при помощи модуляции записывающего излучения создавать в пленке фотоориентанта сложные паттерны локальной ориентации оптической оси, которые в свою очередь обеспечивают пространственно-периодическое распределение поля директора ЖК. На основе такого подхода реализуются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с геометрической фазой, в частности, поляризационно-селективные дифракционные решетки и линзы [3, 4]. В них при помощи двухлучевой лазерной голографии или прямой лазерной записи [5] на фоточувствительном слое задается сложная периодическая ориентация оптической оси, которая затем воспроизводится в нанесенных поверх фотоориентанта слоях УФ-полимеризуемого жидкокристаллического материала, например, RM257 [6]. При этом необходимая для эффективной дифракции

фазовая задержка набирается за счет толщины ЖК-слоя с учетом его высокого двулучепреломления. Важная функциональная особенность применения ЖК-полимера для создания оптических элементов связана с возможностью последовательно наносить несколько слоев с разными свойствами, например, комбинировать хиральные слои со слоями без закрутки. Такие многослойные ДОЭ компактны и реализуют сложные оптические дизайны – ахроматические линзы [7], поляризационно-селективные дифракционные решетки, мульти-тивист ретардеры [8].

В ходе работы с многослойными голографическими полимерными ЖК-покрытиями у нас возникла необходимость «перевернуть» порядок слоев, отделив многослойную акриловую пленку из RM257 от ориентирующего слоя из азокрасителя и продолжив нанесение на другую сторону пленки, которая ранее находилась в контакте с азокрасителем и стеклом. Метод деламинации, или отслаивания, хоть и нечасто, используется в исследованиях ЖК. Известные редкие упоминания деламинации для достижения тех или иных ориентационных эффектов не подразумевают использование для этих целей слоев ориентированного ЖК. Любопытный эксперимент описан авторами [9], которые смогли ориентировать нематический ЖК-материал на поверхности стекла в направлении отрыва полиимидной пленки, которая деламинировалась на гибкую подложку. Таким образом авторы получили стеклянную подложку, поверхность которой обеспечивала одноосную ориентацию ЖК без натирки. В работе [10] с помощью последовательной ламинации и деламинации полимерной пленки на слой специально разработанного циннамата в дополнение к планарной ориентации, задаваемой УФ-облучением, удалось создать на нем угол преднаклона в несколько градусов.

В литературе имеются указания на редкие случаи переноса ориентированной акриловой пленки с одной подложки на другую [11], однако, насколько нам известно, ориентирующая способность подобных пленок до настоящего времени не исследовалась. Таким образом, наш эксперимент по ориентированию ЖК при помощи обратной стороны сориентированной пленки ЖК-полимера можно считать уникальным и первым в своем роде.

Эксперимент

Изготовление образцов

Первоначально в качестве способа отделения пленки полимеризованного RM257 от подложки мы рассмотрели метод флотации. Мы наблюдали, что в горячей воде фотоориентирующий азокраситель «бриллиантовый желтый» растворяется, даже будучи покрытым акриловой пленкой толщиной в несколько микрометров, после чего последняя легко отделяется от стеклянной подложки. Однако метод флотации сильно деформирует пленку, а из воды на пленку оседают частицы, образуются дефекты. Для устранения вышеперечисленных недостатков мы воспользовались оптически изотропным УФ-клеем, который имеет высокое сродство с RM257 и позволяет получить высокое качество перенесенной пленки.

В ходе работы была подготовлена серия образцов по следующей методике. На стеклянную подложку (предметное стекло толщиной 1 мм), предварительно очищенную от пыли и подвергнутую плазменной обработке в воздушной среде для улучшения смачивания, методом спин-коатинга наносили азокраситель «бриллиантовый желтый» (производства *Aldrich*, Германия) из 1 вес. % раствора в ДМФА при 2500 об/мин, 30 с.

Образец 1 экспонировали в течение 5 мин линейно поляризованным светом от одномодового лазера *Cobolt Twist 05-01 Series* (номинальная мощность 200 мВт, длина волны 457 нм). Пучок расширялся микробъективом с пинхолом. Плотность энергии составляла около 4 мВт/см².

Образец 2 экспонировали в течение 12 мин в голографической схеме записи линзы с одномодовым лазером *Cobolt Twist 05-01 Series* (номинальная мощность 200 мВт, длина волны 457 нм). Схема записи двумя ортогональными циркулярными поляризациями приведена в статье [7, рис. 5, а]. Плотность энергии составляла около 2 мВт/см². Фокусное расстояние эталонной линзы $f = 50$ мм, диаметр $D = 38$ мм, апертура полученной голограммы 18 мм.

После экспонирования образцы сушили на плитке при температуре 120 °С в течение 5 мин. Далее на образцах формировали упорядоченную пленку УФ-полимеризуемого ЖК-материала. Состав раствора: УФ-полимеризуемый ЖК-мономер RM257, 10 или 30 вес. % производства *Qingdao QY Liquid Crystal Co.*, Китай, фотоинициатор *Irgacure 651* (1 вес. % от RM257, производства *Ciba*, Китай), добавка, улучшающая косметическое качество пленки (0,002 вес. % от RM257), в качестве растворителя использовали 1-метокси-2-пропанол ацетат. Нанесение RM257 на образцы 1 и 2 производили по различающимся методикам.

Схема изготовления образцов показана на рис. 1.

Изготовление образца 1: раствор 30 вес. % RM257 наносили на образец методом спин-коатинга при скорости вращения подложки 2500 об/мин, 1 мин. Далее с целью проведения радикальной полимеризации экспонировали образец УФ-светом (UV LED *Nichia NVSU233B D4* с длиной волны 365 нм, 1,5 Вт * 10) в атмосфере аргона в течение 40 с. Толщину пленки определяли с помощью интерферометра Линника МИИ-4 (ЛОМО). Толщина полученного слоя составляла 1,35 мкм.

Изготовление образца 2: раствор 10 вес. % RM257 наносили на образец методом спин-коатинга, 1 мин. Далее экспонировали образец УФ-светом (UV LED *Nichia NVSU233B D4* с длиной волны 365 нм, 1,5 Вт * 10) в атмосфере аргона в течение 40 с. Первый слой – праймер – наносили при скорости вращения подложки 2500 об/мин, затем наносили 4 слоя при скорости вращения подложки 1000 об/мин. Толщина полученного мультислоя составляла около 1,4 мкм.

Для перенесения ориентированного слоя RM257 на новую подложку на поверхность полимеризованной пленки наносили каплю оптически изотропного УФ-полимеризуемого клея *Verifix B 665-0* (*Bohle*, Германия) и прижимали к образцу чистую стеклянную пластину. Полученный сэндвич засвечивали УФ-светом в течение 3 мин, затем механически разделяли, аккуратно нажимая на выступающие края подложек (рис. 2).

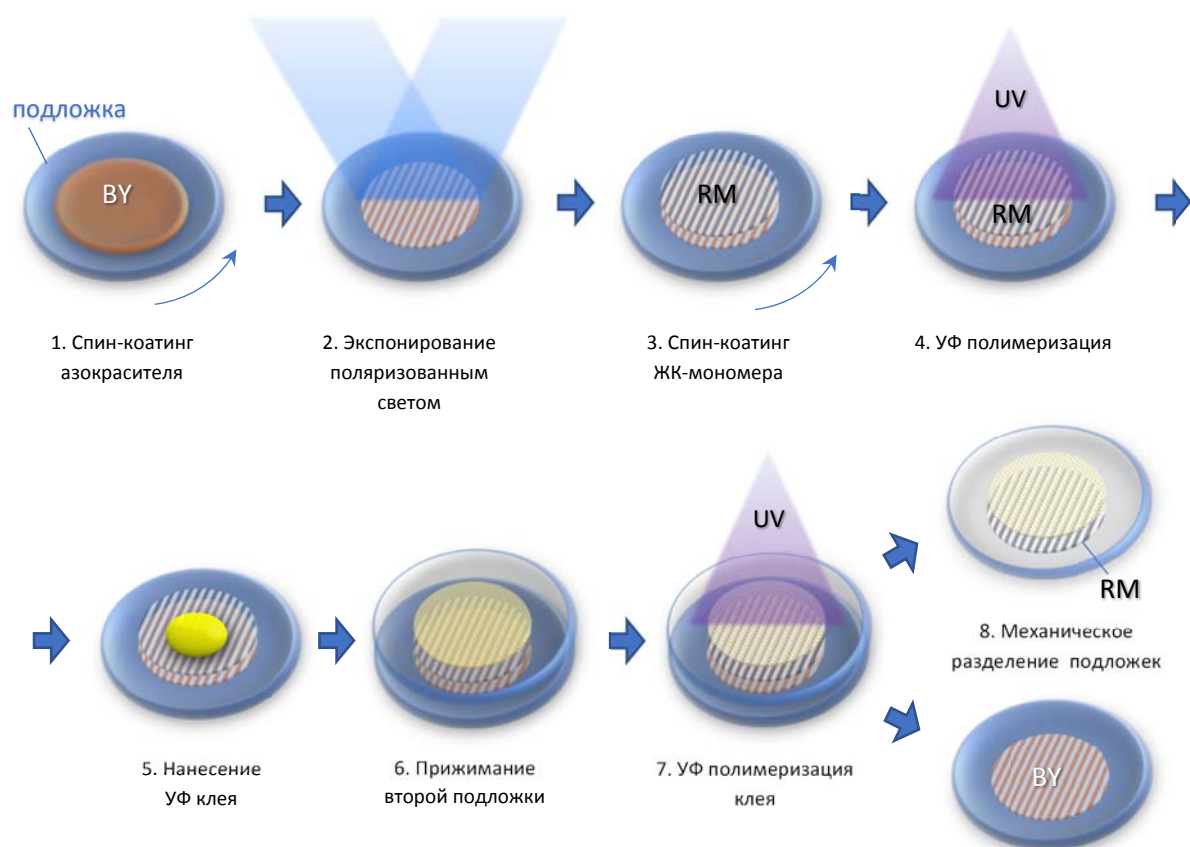


Рис. 1. Схема изготовления образцов

Fig. 1. Sample fabrication flowchart: 1. spin-coating of azo-dye, 2. polarized UV irradiation, 3. spin-coating of liquid crystal monomer, 4. UV polymerization, 5. application of UV-curable glue, 6. second substrate attachment, 7. UV glue curing, 8. substrates separation



Рис. 2. Внешний вид образца 2: *a* – сэндвич с приклеенной новой подложкой, *b* – слева: исходная подложка с оставшимся на ней слоем фотоориентирующего красителя, справа: новая подложка с перенесенной линзой из RM257, *c* – перенесенная линза на новой подложке на фоне ЖК-дисплея демонстрирующая увеличенное изображение

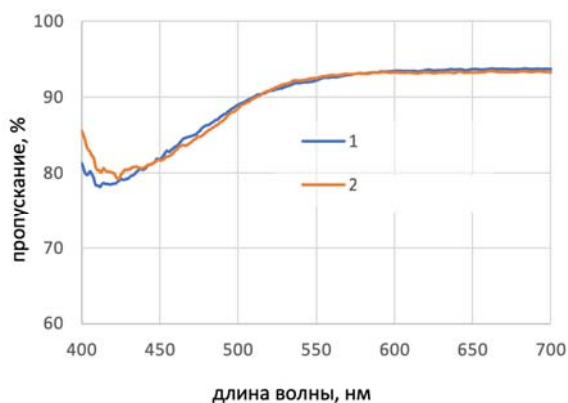
Fig. 2. Appearance of sample 2: *a* – sandwich with new substrate glued, *b* – on the left: substrate with photoalignment dye left on its surface, on the right: new substrate with transferred lens of RM257, *c* – transferred lens on new substrate in front of LC display showing magnified image

С целью проверки ориентирующих свойств полученной поверхности, которая ранее находилась в контакте с пленкой фотоориентирующего красителя, на подложку с перенесенным слоем RM257 наносили еще один слой RM257 согласно процедуре, описанной для образца 2. Полученный таким способом образец наблюдали в поляризационном оптическом микроскопе *Olympus CX31PF* с использованием объективов 4х/0,10 и 20х/0,60. Качество ориентации дополнительно оценивалось путем сравнения фазовой задержки до и после нанесения дополнительного слоя полимера. Фазовую задержку измеряли для длины волны 546 нм при помощи компенсатора Берека [13]. Спектры пропускания регистрировались с помощью спектрометра *Avantes Avaspec 2048 USB*, подсоединенного к оптическому микроскопу *Olympus CX31PF* с использованием объектива 4х/0,10.

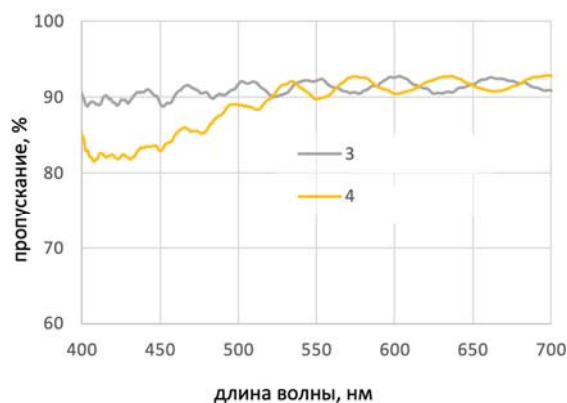
Результаты и их обсуждение

После механического разделения подложек (рис. 2) мы наблюдали, что исходная подложка обладает желтоватым оттенком по сравнению с новой, на которую переносилась акриловая пленка.

Мы сравнили пропускание подложек после разделения с пропусканием стеклянной подложки, покрытой только слоем азокрасителя, и подложки, покрытой слоем азокрасителя и слоем RM257 (рис. 3). Спектр пропускания исходной подложки после разделения (кривая 2) совпадает со спектром подложки, покрытой слоем азокрасителя (кривая 1), глубины минимумов пропускания в коротковолновой области одинаковы, из чего можно сделать вывод, что азокраситель количественно остается на исходной подложке, в то время как полимерная пленка переносится на новую подложку. Спектр пропускания полимерной пленки на новой подложке (кривая 3) содержит осцилляции Фабри – Перо, частота которых соответствует толщине полимерной пленки, в то же время можно видеть, что снижение пропускания в коротковолновой области, характерное для азокрасителя, отсутствует. Таким образом, перенос пленки на новую подложку позволяет избавиться от потерь пропускания в коротковолновой области видимого спектра, свойственных спектру пропускания образца с аналогичной полимерной пленкой на подложке с азокрасителем (кривая 4).



a



b

Рис. 3. Спектры пропускания: а) кривая 1 – подложки, покрытой слоем азокрасителя, кривая 2 – исходной подложки образца 1 после разделения; б) кривая 3 – подложки с перенесенным слоем RM257 с образца 1 после разделения, кривая 4 – подложки, покрытой слоем азокрасителя и слоем RM 257

Fig. 3. Transmittance spectra of: a) curve 1 – reference substrate with azo-dye layer, curve 2 – source substrate of sample 1 after separation; b) curve 3 – substrate with transferred RM257 layer of sample 1 after separation, curve 4 – reference substrate with azo-dye and RM257 layers

Исследование текстуры пленок в поляризационном оптическом микроскопе позволяет получить представление о том, насколько при нанесении дополнительного слоя RM257 на обратную сторону по-

лимерной ЖК-пленки в нем воспроизводится планарная ориентация. Для этого целесообразно рассмотреть и темное, и светлое изображение пленки в скрещенных поляризаторах (рис. 4).

Сравнение изображений на рис. 4, *a* и *c*, полученных в одинаковых условиях, показывает, что темное состояние после нанесения дополнительного слоя остается таким же темным, что говорит о воспроизведении однородной планарной ориентации в до-

полнительном слое без деполаризующих дефектов. Изменение цвета пленки в светлом состоянии (рис. 4, *b* и *d*) свидетельствует об увеличении фазовой задержки.

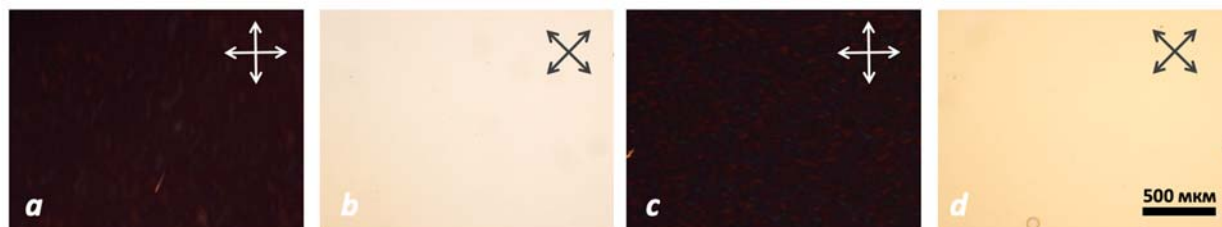


Рис. 4. Образец 1 (одноосная ориентация) с нанесенным дополнительным слоем RM257 в скрещенных поляризаторах (оси поляризаторов указаны стрелками): *a*, *b* – до, *c*, *d* – после нанесения дополнительного слоя RM 257

Fig. 4. Sample 1 (uniaxial alignment) with added RM257 layer in crossed polarizers (polarizers' axes shown by arrows): before (*a*, *b*) and after (*c*, *d*) spin-coating of the additional RM257 layer

Прямые измерения толщины перенесенной пленки затруднены наличием клеевого слоя между пленкой и стеклом, поэтому изменение толщины при нанесении дополнительного слоя оценивалось через изменение фазовой задержки в соответствии с формулой $R = d \cdot \Delta n$, где d – толщина слоя, Δn – двулучепреломление ЖК. Двулучепреломление RM257, рассчитанное для пленок до перенесения на новую подложку, составляет 0,16–0,17, что близко к литературным данным [6]). Измерения фазовой задержки дают значения 235 нм для исходного слоя и 300 нм для покрытия с дополнительным слоем, что соответствует увеличению толщины ЖК-пленки примерно на 350 нм. Эта величина согласуется с оценками толщины слоя, нанесенного при аналогичных условиях на образец 2.

Рассмотрим свойства дифракционной линзы на основе слоя RM257 со сложным пространственно-периодическим распределением директора ЖК. С помощью голографической записи в плоскости подложки формируется центрально-симметричный ориентационный паттерн, в котором директор ЖК осциллирует по циклоиде (рис. 5). Дифракционная линза раскладывает проходящий свет на три луча – две циркулярные поляризации, одна из которых фокусируется, а другая расфокусируется (+1 и –1 порядки, соответственно) и пропускание (0 порядок). Дифракционная эффективность максимальна для света, для которого фазовая задержка равна половине длины волны, что обуславливает спектральную селективность линзы [4]. Для нашего

исследования мы выбрали толщину слоя, обеспечивающего полуволновую задержку в видимой области. Анализ изображения дифракционной линзы (образец 2) в скрещенных поляризаторах показывает, что нижняя поверхность акриловой пленки со сложной пространственно-неоднородной ориентацией также превосходно ориентирует слой ЖК. Представленные на рис. 6 фотографии центра линзы – до и после нанесения дополнительного слоя RM257 – демонстрируют, что ориентационный паттерн линзы воспроизводится без дефектов.

Интенсивность света I , проходящего через систему, состоящую из двух скрещенных поляризаторов и помещенной между ними фазовой пластины, определяется в соответствии с известной формулой

$$I = I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\pi R}{\lambda},$$

где I_0 – интенсивность линейно поляризованного света, падающего на фазовую пластину, φ – угол между оптической осью поляризатора и директором ЖК, λ – длина волны. Рассмотрим эту формулу применительно к нашему случаю, когда директор ЖК имеет неоднородное распределение в плоскости xy . Множитель $\sin^2 2\varphi$ показывает, что пропускание системы будет нулевым, когда угол между осью поляризатора и директором ЖК $\varphi = k \frac{\pi}{2}$, где $k = 0, 1, 2, \dots$. На изображении линзы в скрещенных поляризаторах совокупность этих состояний предстает в виде черных концентрических

колец, период которых уменьшается по мере отдаления от центра к периферии линзы. Максимальная интенсивность света будет соответствовать значениям $\varphi = (2k + 1)\frac{\pi}{4}$ – эти участки видны как светлые, в нашем случае

желтые кольца. Изменение их цвета на рис. 6 от светлого к темному желтому соответствует увеличению измеренного значения фазовой задержки R при нанесении дополнительного слоя с 250 до 305 нм.

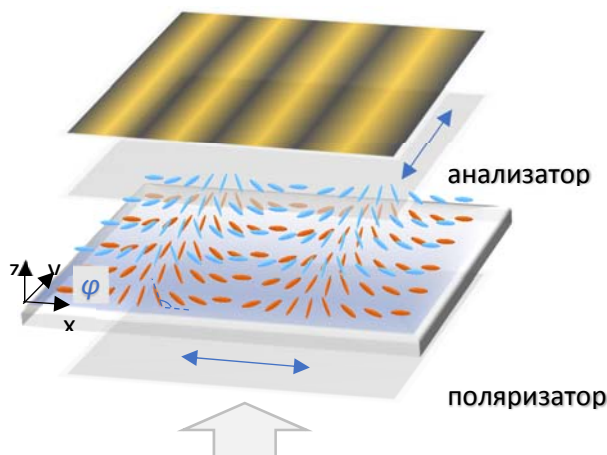


Рис. 5. Схема формирования линзового паттерна в скрещенных поляризаторах

Fig. 5. Scheme of lens pattern formation in crossed polarizers

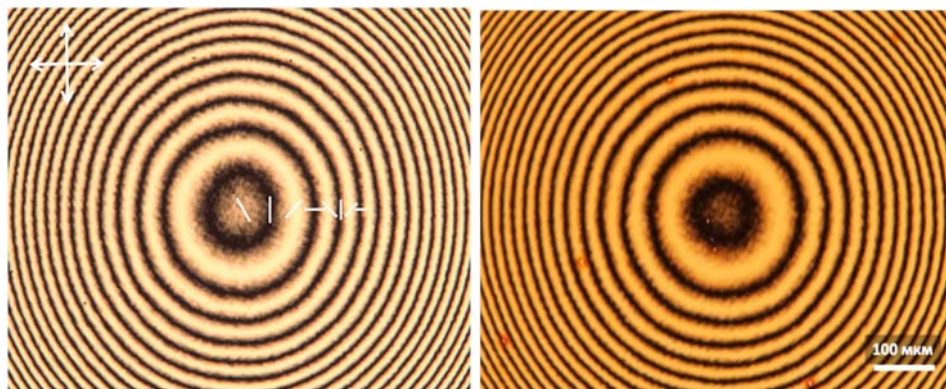


Рис. 6. Центр линзы (образец 2) в скрещенных поляризаторах: до (слева) и после (справа) нанесения дополнительного слоя RM257. Стрелками обозначены скрещенные оси поляризаторов, белыми отрезками – ориентация директора ЖК внутри колец

Fig. 6. Lens center (sample 2) in crossed polarizers: before (left) and after (right) coating of an additional RM257 layer. Arrows indicate the axes of crossed polarizers; the white stripes indicate the LC director orientation within the rings

Отдельный интерес представляет край линзы (рис. 7), где период модуляции ориентации директора ЖК уменьшается по сравнению с центром линзы от сотен до единиц микрометров. Анализ текстур в скрещенных поляризаторах (рис. 7, а, с) показывает, что качество ориентации

сохраняется даже на таком малом периоде. Соответствующее увеличение углов дифракции позволяет измерить спектр нулевого порядка дифракции (то есть пропускания) на периферии линзы с помощью объектива с минимальным увеличением и апертурой (4x/0,10).

На фотографиях образца в конфигурации измерения пропускания (рис. 7, *b, d*) можно увидеть нулевой (цветное пятно в центре фото) и +1 порядок дифракции (светлое пятно в левом нижнем углу фото). Специфический цвет нулевого порядка соответствует условию максимальной эффективности дифракции в случае, когда фазовая задержка равна полуволне проходящего света. Анализ спектров пропускания позволяет, пренебрегая спектральной дисперсией двулучепреломления на участке 540–610 нм, оценить изменение фазовой задержки при нанесении дополнительного слоя. Минимум пропускания до нанесения дополни-

тельного слоя (фиолетовая кривая на рис. 7, *e*) приходится на 530 нм, а после сдвигается в длинноволновую часть спектра – на 610 нм (синяя кривая). Соответствующие значения задержек 275 нм и 310 нм близки значениям, измеренным напрямую в центре линзы; отклонения можно объяснить вариацией толщины слоя по площади пленки.

Обратим внимание на сохранение глубины минимума в спектрах пропускания после нанесения дополнительного слоя RM257, что подтверждает вывод о сохранении отличного качества ориентации ЖК.

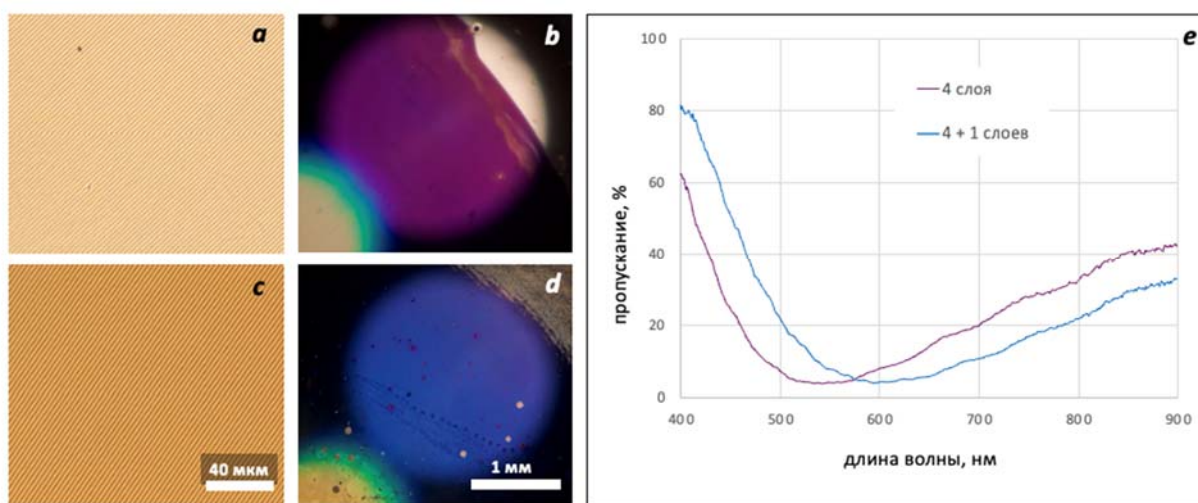


Рис. 7. Край линзы (образец 2) до (верхний ряд) и после (нижний ряд) нанесения дополнительного слоя в скрещенных поляризаторах (*a, c*) и в неполяризованном свете (*b, d*) и соответствующие спектры пропускания (*e*)

Fig. 7. Lens periphery (sample 2) before (top) and after (bottom) coating of an additional RM257 layer in crossed polarizers (*a, c*) and in unpolarized light (*b, d*), and corresponding transmission spectra (*e*)

Перенос пленки при помощи УФ-клея устраняет недостаток, связанный с водорастворимостью азокрасителя, который может приводить к деламации пленки с оригинальной подложки, таким образом повышая адгезию и стабильность пленки. К плюсам метода относится то, что азокраситель, поглощающий в видимой области, отделяется от слоя ЖК, что приводит к повышению коэффициента пропускания пленки. Несомненным преимуществом является также возможность переноса на гибкие подложки и совместимость с технологией рулонного нанесения.

Выводы

Мы продемонстрировали возможность отделения пленки из ориентированного ЖК-полимера от поверхности азокрасителя и перенесения на новую подложку при помощи УФ-клея. Полученная пленка успешно ориентирует жидкокристаллические материалы и не отслаивается от стеклянной подложки в процессе обработки. При этом исходная подложка с фотоориентантом сохраняется и может быть использована повторно для ориентации ЖК.

Благодарность: работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт». Авторы признательны А. А. Ежову, ст. науч. сотр. кафедры нанофотоники физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, за плодотворную дискуссию и ценные замечания.

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state assignment of the National Research Center 'Kurchatov Institute'. The authors are grateful to A.A. Ezhov, senior researcher at Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University, for fruitful discussions and valuable comments.

Список источников / References

- Jones L.P. Alignment properties of liquid crystals. *Handbook of Visual Display Technology* / Ed. by J. Chen, W. Cranton, M. Fihn. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg, 2014, 1387–1402. DOI: 10.1007/978-3-540-79567-4/
- Xi X., Yan C., Shen L. Z., Wang Y., Cheng P. Liquid crystal photoalignment technique: Basics, developments, and flexible/stretchable device applications. *Materials Today Electronics*, 2023, **6**, 100069. DOI: 10.1016/j.mtelec.2023.100069.
- Xiang X., Kim J., Escuti M. J. Bragg polarization gratings for wide angular bandwidth and high efficiency at steep deflection angles. *Sci. Rep.*, 2018, **8**, 7202. DOI: 10.1038/s41598-018-25535-0.
- Li L., Shi S., Kim J., Escuti M. J. Color-selective geometric-phase lenses for focusing and imaging based on liquid crystal polymer films. *Opt. Express*, 2022, **30** (2), 2487. DOI: 10.1364/OE.444578.
- Miskiewicz M.N. and Escuti M.J. Direct-writing of complex liquid crystal patterns. *Opt. Express*, 2014, **22**, 12691–12706. DOI: 10.1364/OE.22.012691.
- Liu D., Broer D.J. Liquid crystal polymer networks: Preparation, properties, and applications of films with patterned molecular alignment. *Langmuir*, 2014, **30**, 13499–13509. DOI: 10.1021/la500454d.
- Luo Z., Li Y., Semmen J., Rao Y., Wu S.-T. Achromatic diffractive liquid-crystal optics for virtual reality displays. *Light: Sci. Appl.*, 2023, **12**, 230. DOI: 10.1038/s41377-023-01254-8.
- Komanduri R.K., Lawler K.F., Escuti M.J. Multi-twist retarders: broadband retardation control using self-aligning reactive liquid crystal layers. *Opt. Express*, 2013, **21**, 404–420. DOI: 10.1364/OE.21.000404.
- Kawata Y., Mori Y. Control of nematic liquid crystal alignment using stripped film method. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**, 40–42. DOI: 10.1143/JJAP.35.L40.
- Lee J., Lee S., Jeong Y.C., Cho K.Y., Park J.K. Generation of pretilt angles of liquid crystals on cinnamate-based photoalignment layer by a simple directional peel-off process. *Opt. Express*, 2009, **17** (26), 23565–23575. DOI: 10.1364/OE.17.023565.
- Japan patent No. 2006243025A. Alignment layer for liquid crystal and liquid crystalline optical film obtained from the alignment layer / Mazaki H., Seki T., Hirai T.; Publ. 28.02.2005; Right holders: Eneos Corp.
- Xiong J., Yang Q., Li Y., Wu S.-T. Holo-imprinting polarization optics with a reflective liquid crystal hologram template. *Light: Sci. Appl.*, 2022, **11**, 54. DOI: 10.1038/s41377-022-00746-3.
- Holmes D.A. Wave optics theory of rotary compensators. *JOSA*, 1964, **54** (11), 1340–1347. DOI: 10.1364/JOSA.54.001340.

Вклад авторов:

¹Касьянова И. В. – разработка концепции научной работы, изготовление образцов, проведение исследования, написание и редактирование текста статьи.

²Гейвандов А. Р. – изготовление образцов, проведение исследования, подготовка иллюстраций, написание и редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

¹Kasyanova I. V. – development of the concept of scientific work, samples fabrication, conducting research, writing and editing the text of the article.

²Geivandov A. R. – samples fabrication, conducting research, preparing illustrations, writing and editing the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

¹<https://orcid.org/0000-0002-5345-7552>

²<https://orcid.org/0000-0001-9564-6274>

Поступила 3.03.2025; одобрена 3.04.2025; принята 14.04.2025.
Received 3.03.2025; approved 3.04.2025; accepted 14.04.2025