

УДК 535:771.36

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ¹

М.Г. Томилин

Регистрирующие среды на основе жидких кристаллов описаны в концепции двухступенной фотографии. Предложенный формализм позволяет описать регистрацию излучений и распределения физических полей на поверхности на основе развитых методов классической фотографии.

Ключевые слова: регистрирующие среды, жидкие кристаллы, излучения, распределения физических полей, поверхность, двухступенный процесс.

Введение

Гигантская оптическая анизотропия жидких кристаллов (ЖК) и их высокая лабильность, проявляемая при внешних воздействиях, позволяет рассматривать их как уникальные регистрирующие среды (РС), осуществляющие запись как световых полей, так и полей различной физической природы – электрических, магнитных, акустических, температурных и сил межмолекулярных взаимодействий. Наибольшей чувствительностью к воздействию полей обладают нематические жидкие кристаллы (НЖК), не имеющие, в отличие от холестерических и смектических материалов, надмолекулярной структуры.

Предпосылкой для визуализации полей является исходная упорядоченность молекул НЖК, которая может быть ими нарушена, вызывая деформацию слоя НЖК. Взаимодействие этих полей с регистрирующими слоями на основе НЖК может происходить или дистанционно при воздействии излучений видимого, ИК, СВЧ диапазонов и акустических полей, или при контакте слоя НЖК с изучаемой поверхно-

¹ Статья подготовлена по материалам приглашенного доклада, прочитанного на международной конференции The Latin America optics & photonics в Сан Себастьяне, Бразилия, 10–13 ноября 2012 [1]

стью, на которой имеется распределение физических полей. Индуцируемые полями деформации в НЖК регистрируются в поляризованном свете на просвет или отражение. Регистрацию деформаций слоя НЖК можно осуществлять как в реальном времени, так и с памятью. Для расширения возможностей регистрации можно использовать холестерические, смектические и полимерные ЖК (ПЖК).

Особенность регистрирующих сред на ЖК состоит в том, что близкие по структуре органические вещества могут использоваться как для дистанционной записи излучений, так и для контактной регистрации распределений физических полей на поверхности материалов и изделий. Более 80000 синтезированных жидкокристаллических соединений позволяют оптимизировать состав и свойства РС. Принципы детектирования излучений и физических полей описываются хорошо разработанной теорией деформации ЖК [2].

Высокая лабильность НЖК в мезофазе, обеспечиваемая текучестью и малой вязкостью, определяет их максимальную чувствительность к внешним воздействиям, делает естественным их использование в реальном времени, но затрудняет фиксирование ими статических изображений по эксплуатационным соображениям. Обращение с изображениями в среде, находящейся в мезофазе, вызывает трудности при длительном хранении (стекание, промокание и др.). Для практических случаев актуально решение противоречивой задачи: детектирование внешних воздействий в мезофазе ЖК и сохранение записанной информации в твердой фазе ЖК.

Цель настоящей работы состоит в развитии двухступенных методов регистрации изображений внешних физических полей с эффектом памяти, при которых регистрация внешних воздействий осуществляется в мезофазе, а эксплуатация и хранение – в твердокристаллическом состоянии.

Дистанционные методы записи на ЖК излучений различных длин волн

Методы регистрации излучений на ЖК можно отнести к несеребряным фотографическим процессам. Различают регистрацию, осуществляемую ЖК-композитами, например, на основе холестериков (рис. 1), смектиков, полимерных ЖК (рис. 2 и 3), и структурами типа «фотопроводник-ЖК» (рис. 4).

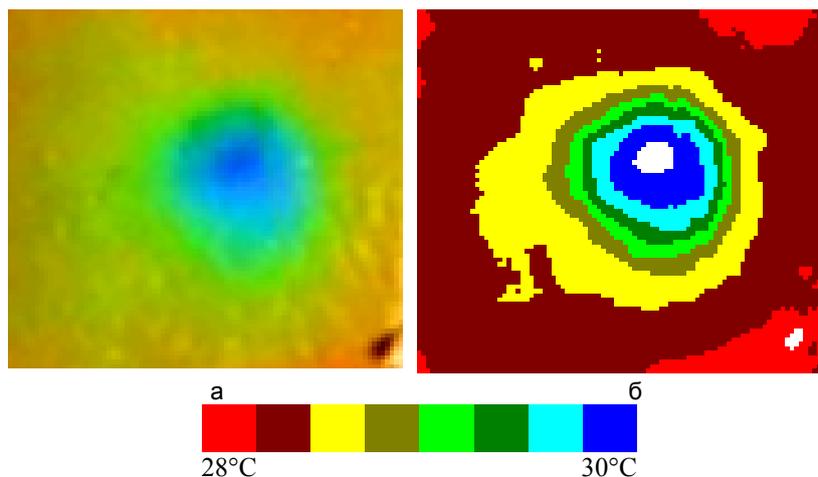


Рис. 1. Визуализация структуры пучка в сечении одномодового лазера диаметром 3 мм в ИК-диапазоне (а) и распределение температуры по сечению (изотермы) (б). Внизу показана цветотемпературная шкала [3]

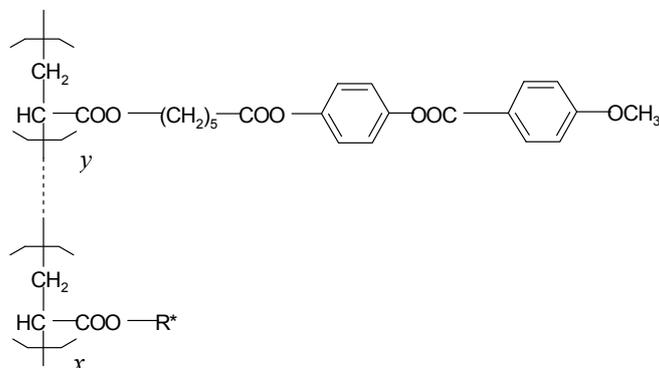


Рис. 2. Пример ПЖК со структурой хиральных ЖК-сополимеров с нематогенными и хиральными фотохромными группами [4]

ЖК может быть капсулирован в полимерную пленку для защиты от внешних воздействий [2]. Регистрация оптических изображений в видимом диапазоне длин волн может осуществляться на светочувствительном ПЖК, например, со структурой хиральных ЖК-сополимеров с немагненными и хиральными фотохромными группами [4] (рис. 2). Примеры регистрации негативных и позитивных оптических изображений на ПЖК приведены на рис. 3.



Рис. 3. Примеры негативного изображения с памятью (а) и позитивного изображения с памятью (б) на ПЖК, «вписанные» в формат 24×36 мм

Структуры «фотопроводник–ЖК» используются в системах динамической голографии и устройствах адаптивной оптики для коррекции фазовых искажений фронта световой волны в реальном времени. На рис. 4 показан пример коррекции изображения, осуществляемой такой структурой.

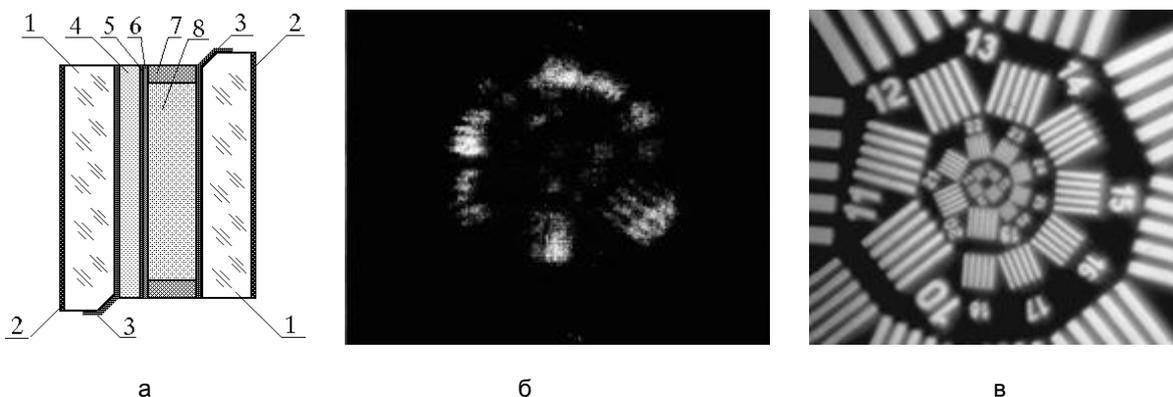


Рис. 4. (а) – структуры «фотопроводник–ЖК» отражательного типа: 1 – стеклянные подложки; 2 – просветляющие покрытия; 3 – прозрачные электроды; 4 – фотопроводник; 5 – светоблокирующий слой; 6 – зеркало; 7 – прокладки; 8 – слой ЖК. Изображения штриховой миры размером 24×36 мм до (б) и после (в) коррекции, создаваемые зеркалом телескопа [2]

Контактные методы визуализации распределения физических полей на поверхности материалов и изделий

Визуализация распределения физических полей на поверхности материалов и изделий является уникальной особенностью РС на основе НЖК, отличающей их от известных РС на других принципах. Основная идея применения НЖК в качестве РС состоит в том, что при деформации они выполняют функцию оптической реплики с большой величиной оптической анизотропии, осуществляющей фазовую задержку проходящего света. Слои НЖК, нанесенные на изучаемую поверхность, изучаются в поляризованном оптическом микроскопе (ПОМ). Распределение и величина локальных фазовых задержек в поле зрения ПОМ соответствуют распределению и интенсивности исследуемого поля на поверхности объекта. Задание деформации осуществляется в сверхтонком приповерхностном слое НЖК, который транслирует двумерную локальную ориентацию в толщу слоя. Граница «поверхность–НЖК» выполняет функцию командного слоя, а происходящие в ней явления имеют наноразмерную шкалу. Для накопления фазовой задержки, достаточной для визуализации деформаций (а значит, и изучаемых полей), используют слои НЖК толщиной порядка 1 мкм.

Теория деформаций слоя НЖК под действием внешних полей описана в работе [2]. Принцип контактного метода визуализации физических полей показан на рис. 5. Наибольший практический интерес вызывает возможность визуализации структурных неоднородностей на поверхности и распределения невидимых физических полей. При выведении из оптической схемы слоя НЖК, поляризатора или анализатора наблюдатель теряет возможность регистрировать фазовую задержку. Это наглядно выявляет тот вклад в изображение, который привносит деформированный слой НЖК.

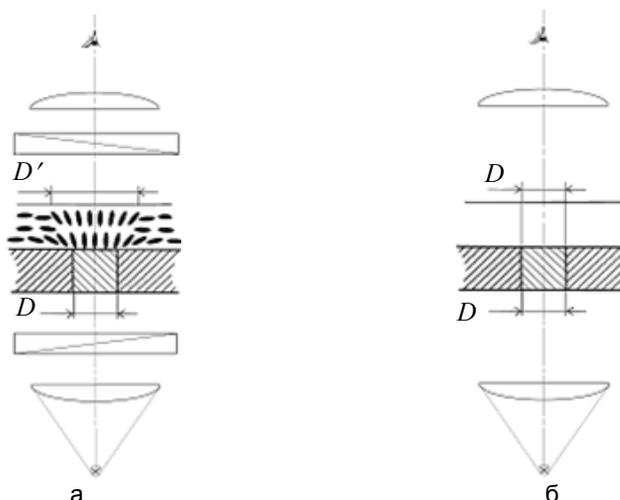


Рис. 5. (а) – в поляризованном свете наблюдаются деформации слоя НЖК D' , вызванные дефектом; (б) – в неполяризованном свете невидимый структурный дефект D наблюдается сквозь прозрачный слой НЖК, деформации в нем не видны, и поэтому дефект на поверхности не виден

Недостатки сохранения изображения в мезофазе можно устранить путем двухступенной регистрации изображения физических полей или дефектов на поверхности: на первой стадии реализуются условия формирования деформаций в текучем слое мезофазы НЖК, а на второй стадии осуществляется переход мезофазы в твердое состояние. Возможны, по крайней мере, два способа фиксирования изображения в твердой фазе.

В первом способе используется термотропные свойства НЖК-материала, имеющего температуру существования мезофазы выше комнатной температуры. На первой стадии НЖК нагреванием переводится в мезофазу, где он обладает малой вязкостью, что позволяет ему деформироваться под действием слабых полей поверхности [5]. На второй стадии НЖК охлаждается до комнатной температуры, переходя в твердокристаллическую фазу, но сохраняя при этом деформированную структуру в течение длительного времени. Описанный способ обладает реверсивностью. Твердокристаллическая фаза нагреванием может быть вновь переведена в мезофазу, в которой производится перезапись изображения поля, после чего мезофаза охлаждением переводится в твердокристаллическое состояние. Возможность такой записи была подтверждена авторами экспериментально при регистрации слабых магнитных полей [6]. На рис. 6, а, показана визуализированная структура магнитных доменов на поверхности сплава на основе Со.

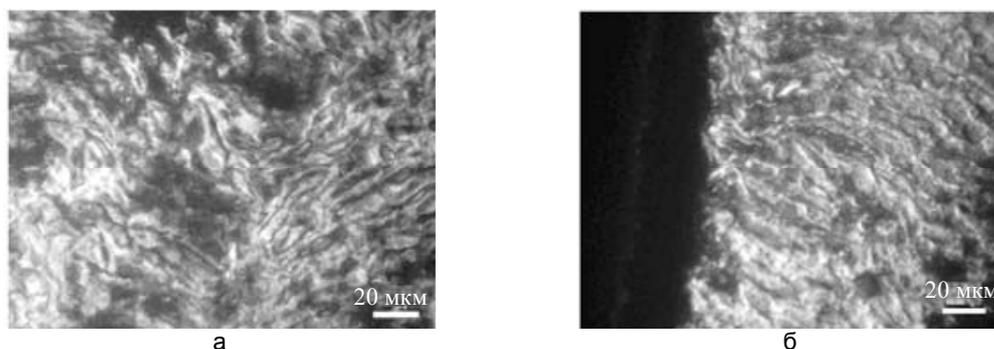


Рис. 6. Два примера (а) и (б) изображений магнитных доменов (темные области на фоне зерен), полученных с помощью смектического высокотемпературного ЖК на основе $L_3Tb(C_{12}H_{25}SO_4)_3$ [5]

После охлаждения до кристаллического состояния (рис. 6, б) материал сохраняет без видимых изменений изображения структуры доменов в твердой фазе.

Во втором способе используется фиксирование картины деформации слоя НЖК-методом полимеризации. Для этого в состав НЖК добавляется примерно 5% весового содержания полимера, что практически не изменяет его свойств.

Деформация слоя НЖК под действием распределения поверхностных полей осуществляется при комнатной температуре, после чего деформированная структура подвергается воздействию УФ излучения, вызывающего полимеризацию слоя (рис. 7). Способ был разработан для стабилизации исходной поверхностной и объемной ориентации молекул НЖК [7] и предложен авторами для фиксирования деформированной структуры.

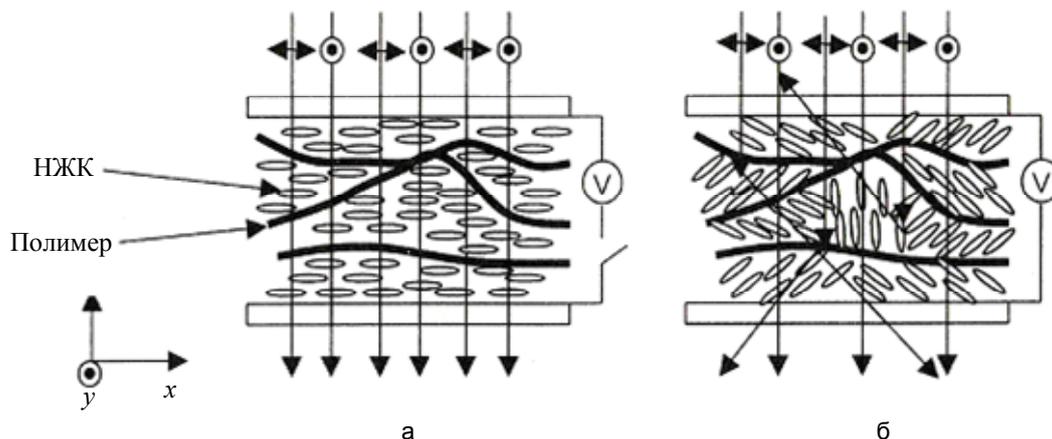


Рис. 7. Фиксирование деформированного слоя НЖК за счет его полимеризации при воздействии УФ излучения: структура смеси НЖК с полимером до внешнего воздействия и УФ облучения (а); структура после внешнего воздействия и УФ облучения (б) [7]

Разработанные методы показали возможность их уникального применения в широких областях физики, химии, биологии, медицины и высоких технологий, а предложенный подход позволяет использовать для описания РС на ЖК такие характеристики из арсенала классической фотографии, как функция рассеяния линии, информационная емкость, частотно-контрастная характеристика и др. [8].

Заключение

Процессы регистрации различных физических полей, включая оптические излучения различных длин волн, на основе использования жидких кристаллов впервые рассмотрены с позиций двуступенных технологий несеребряной фотографии. Показано, что противоречивую задачу их использования в качестве регистрирующих сред можно осуществить детектированием внешних воздействий в мезофазе и сохранением записанной информации в твердой фазе жидких кристаллов.

Литература

1. Tomilin M.G. Photographic technologies based on liquid crystals // Conference program and abstracts. LAOP 2012. – Mersedias Beech. – 13–15 November. – P. 22.
2. Томилин М.Г., Невская Г.Е. Фотоника жидких кристаллов. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 742 с.
3. Жаркова Г.М., Коврижина В.М., Хачатурян В.М. Полимерно-жидкокристаллические материалы для оптической диагностики температурных полей и их применение в аэрофизическом эксперименте // Современные оптические методы исследования потоков: Коллективная монография / Под редакцией Б.С. Ринкевичюса. – М.: Оверлей, 2011. – 360 с. (С. 275 – 290).
4. Шибаев В.П. Полимерные кентавры // Природа. – 2012. – № 6. – С. 12–24.
5. Беляев В.В. Вязкость нематических жидких кристаллов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 224 с.
6. Томилин М.Г., Галяметдинов Ю.Г., Кузнецов П.А. Применение парамагнитных ЖК с гигантской магнитной анизотропией для изучения структуры доменов в магнитных материалах // Оптический журнал. – 2005. – Т. 74. – № 9. – С. 32–36.
7. Wu Sh.-T., Yang D.-K. Reflective LC displays. – J. Willey & Sons, Ltd. – 2001. – 335 p.
8. Джеймс Т.Х. Теория фотографического процесса. – Л.: Химия, 1980. – 672 с.

Томилин Максим Георгиевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, mgtomilin@mail.ru