МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Баленко Николай Витальевич

ЭЛАСТИЧНЫЕ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ С МЕХАНИЧЕСКИ-УПРАВЛЯЕМЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

02.00.06 – Высокомолекулярные соединения, химические науки

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук

Москва-2022

Работа выполнена в лаборатории химических превращений полимеров на кафедре высокомолекулярных соединений Химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: Бобровский Алексей Юрьевич доктор химических наук, доцент, профессор РАН Официальные оппоненты: Куличихин Валерий Григорьевич доктор химических наук, членкорреспондент РАН, профессор, Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева Российской академии наук (ИНХСРАН), заведующий лабораторией реологии полимеров Ельяшевич Галина Казимировна доктор физико-математических наук, профессор, Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук (ИВС РАН), лаборатория физической химии

полимеров, главный научный сотрудник

Усольцева Надежда Васильевна

доктор химических наук, профессор, Ивановский государственный университет, НИИ наноматериалов, директор

Защита диссертации состоится « 22 » июня 2022 г. в часов на заседании диссертационного совета МГУ.02.10 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, д. 1, стр. 3, Химический факультет, Лабораторный корпус «А», кафедра высокомолекулярных соединений, ауд. 501.

E-mail: balenko.nik.msu@gmail.com (Баленко Н.В., соискатель)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: http://istina.msu.ru/dissertations/456595921/

Автореферат разослан «____» мая 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат химических наук

А.А. Долгова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Среди большого числа функциональных Актуальность темы исследования. материалов особое место занимают стимул-чувствительные системы. Под этим термином понимают материалы, которые способны изменять свои свойства в результате воздействия внешних факторов, таких как температура, свет, электрическое и магнитное поля, а также механическое напряжение. Подобные материалы часто относят к так называемой особой субстанции или мягкой материи (soft matter). В век активного развития наукоёмких технологий, в том числе электронных вычислительных и информационных устройств, робототехники и других «умных» материалов создание стимул-чувствительных систем является необходимым условием научно-технического прогресса. В этой области исследований работает огромное количество научных групп по всему миру, о чем свидетельствует множество публикаций на эту тему. Механо-чувствительные материалы, то есть способные изменять свои свойства под действием механической нагрузки, часто создают на основе полимеров, которые сочетают хорошие механические свойства со структурным механо-индуцированным и, в частности, оптическим откликом. Использование жидких кристаллов (ЖКр) открывает большие возможности и перспективы для создания нового поколения механо-чувствительных материалов.

Жидкие кристаллы составляют основу современных жидкокристаллических (ЖК) информационных гаджетов и устройств. Главной структурной особенностью жидких кристаллов является анизотропная форма их молекул, определяющая возможности самоорганизации этих соединений. Среди множества структурных форм жидких кристаллов, наиболее интересны холестерические жидкие кристаллы (холестерики). Результатом присутствия хиральных оптически активных групп в составе холестериков является формирование супрамолекулярной спиральной структуры, определяющей уникальные оптические свойства холестериков и, в частности, селективное отражение света. Длина волны максимума селективного отражения света λ_{max} связана с величиной шага спиральной структуры холестерика Р простым соотношением:

$$\lambda_{\max} = \bar{n} \times P \times \cos \theta, \tag{1}$$

где n̄ – средний показатель преломления, θ – угол между направлением распространения отраженного света и осью холестерической спирали (рис.1).



Рисунок 1. Схематическое изображение холестерической жидкокристаллической структуры.

Шаг спирали холестерического жидкого кристалла чувствителен к внешним воздействиям – он может быть изменен с помощью электрического и магнитного полей, воздействия света, изменения температуры и механической деформации.

Сочетание хороших физико-механических свойств полимеров и уникальных оптических свойств жидких кристаллов делает возможным создание на их основе стимулчувствительных материалов. Один из таких материалов – это полимер-диспергированные жидкие кристаллы. Они состоят из полимерной матрицы и диспергированных в ней капель жидких кристаллов микронных размеров. Ранее такие композиты с каплями жидких кристаллов нашли свое применение для создания «умных окон» и термографических плёнок.

Создание механо-чувствительных композитов на основе эластичной полимерной матрицы с низкомолекулярными холестерическими жидкими кристаллами, способных быстро и значительно изменять свои оптические свойства под действием механической деформации, то есть обладающие механо-оптическим откликом, является актуальной задачей, имеющей перспективы практического применения в качестве сенсоров деформаций, элементов гибких дисплеев, мягкой робототехники и т.д.

Степень разработанности темы. В последние годы наблюдается значительный интерес к материалам на основе ЖКр, обладающих механо-оптическим откликом, таким как стабилизированные полимерной сеткой холестерические ЖКр и холестерические гребнеобразные ЖК эластомеры. Хотя такие материалы могут демонстрировать значительное изменение оптических свойств при деформации, они обладают рядом недостатков, одним из которых является сложность их получения и дороговизна. Другой тип ЖК материалов – полимер-диспергированные жидкие кристаллы – это хорошо изученный тип ЖК композитов, активно разрабатываемых на протяжении последних нескольких десятков лет. В основном, композиты на основе термопластичных матриц изучали на предмет их отклика на воздействие электрического поля. Для деформируемых полимер-диспергированных ЖКр на основе кристаллов была обнаружена нематических жидких анизотропия селективного светорассеяния, что легло в основу возможного применения таких систем в качестве поляризаторов света. Совсем недавно начали появляться работы посвященные поведению холестерических ЖК капель в полимерных матрицах в условиях деформации, где было продемонстрировано изменение оптических свойств композитов на основе термопластов при деформации. Тем не менее, на момент постановки темы работы отсутствовали публикации, посвящённые механо-оптическому отклику холестерических полимер-диспергированных ЖКр на основе эластичных полимерных матриц, а появляющиеся в последние годы исследования подтверждают актуальность данной работы.

Цель работы заключалась в разработке научных подходов к созданию механочувствительных композитов, состоящих из эластичных полимерных матриц, наполненных холестерическими жидкими кристаллами в виде капель микронных размеров, и в изучении влияния механической деформации пленок композитов на их оптические свойства.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные задачи:

- Выбрать и получить полимерные матрицы, способные к большим деформациям и обладающие высокой оптической прозрачностью;
- Приготовить холестерические жидкокристаллические смеси, обладающие термодинамической устойчивостью при комнатной температуре, нерастворимые в

выбранных полимерных матрицах и обладающие пиком селективного отражения света в видимой области спектра;

- Получить полимер-диспергированные жидкокристаллические композиты на основе разных деформируемых полимерных матриц, изучить процессы образования композитов и разработать оптимальные условия их синтеза;
- Изучить физико-механические свойства полученных композиционных материалов в условиях механической деформации;
- Установить влияние механической деформации, а именно одноосного растяжения и циклических деформаций, на оптические свойства полученных композитов.

Объекты исследования включают полимер-диспергированные жидкокристаллические пленки на основе трех полимерных матриц: полидиметилсилоксан (ПДМС), полиуретан (ПУ) и поливиниловый спирт (ПВС), с введенными в них холестерическими жидкими кристаллами в виде капель микронных размеров двух типов: на основе нематиков (производные цианбифенила, бициклогексана и основания Шиффа) с добавлением хиральных допантов (производные изосорбида и холестерина); смеси производных холестерина (пеларгонат, валерат, хлорид и стеарат).

Научная новизна. В рамках данной диссертационной работы разработаны новые методы простого И эффективного получения полимер-диспергированных жидкокристаллических композитов на основе низкомолекулярных холестерических ЖКр и (ПУ, ПДМС, ПBC). деформируемых полимерных матриц Для полученных жидкокристаллических композитов впервые:

- обнаружено увеличение интенсивности селективного отражения света растянутыми композитами;

- оптические свойства пленок композитов были изучены непосредственно в процессе их деформации с разными скоростями и режимами нагружения – растяжение до разрыва, релаксация напряжения и циклические деформации;

- продемонстрирован значительный обратимый механо-оптический отклик композитов, а именно смещение пика селективного отражения света при деформации;

- обнаружено влияние скорости деформации композитов на величину сдвига пика селективного отражения света;

- предложен и обоснован механизм механо-оптического отклика ЖК композитов, основанный на конкуренции процессов сжатия холестерической структуры и её релаксации, приводящей к обратному смещения пика селективного отражения света.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработаны теоретические основы получения полимер-диспергированных жидкокристаллических композитов, обладающих механо-оптическим откликом. Теоретически обоснован механизм изменения структуры холестерика в каплях, вызванного деформацией композитов. Полученные в работе результаты важны для дальнейшей разработки теории сжатия и релаксации спиральной структуры холестерических жидких кристаллов в замкнутом объёме в условиях деформации.

Практическая значимость результатов данного исследования заключается в возможности создания материалов, способных под действием механической деформации обратимо изменять свои оптические свойства, в частности, цветовую гамму. Такие композиты

могут найти применение при создании на их основе датчиков различных деформаций (сжатие, растяжение, пульсации), гибких дисплеев, мягкой робототехники и даже декоративных изделий. Разработанные материалы обладают хорошими физико-механическими свойствами и способностью к многократным обратимым деформациям, они стабильны при комнатной температуре, не выделяют на своей поверхности жидкие компоненты ЖК наполнителя.

Методология и методы исследования связаны с применением комплексного подхода к решению поставленных в диссертационной работе задач и использования современных научных методов исследования. В качестве основного метода исследования текстуры холестерических ЖК смесей полимер-диспергированных жидкокристаллических И композитов использовали поляризационно оптическую микроскопию (ПОМ). Оптические В динамическом режиме исследовали с помощью свойства пленок композитов экспериментальной установки, состоящей из спектрометра и динамометра (рис.2), спектры отражения регистрировали с большой частотой (до 5 измерений в секунду) непрерывно в процессе растяжения пленки. Кроме того, использовали такие экспериментальные методы исследования как: поляризационно-оптическая микроскопия, физико-механические испытания, ротационная реометрия, метод гидростатического взвешивания, светлопольная оптическая микроскопия, определение температур фазовых переходов с помощью термоячейки и ПОМ, метод компьютерного расчета распределения капель по размеру. эмульсионным, Приготовление пленок осуществляли методами: индуцированного полимеризацией разделения фаз, индуцированного испарением растворителя разделения фаз.



Положения, выносимые на защиту:

Рисунок 2. Схема экспериментальной установки для регистрации спектров отражения в процессе деформации.

 Влияние состава полимерной матрицы и концентрации жидких кристаллов в виде капель микронных размеров, а также метода получения полимер-диспергированных ЖК композитов на их морфологию, оптические свойства и текстуру холестерических жидких кристаллов внутри капель.

• Особенности механо-оптического отклика композитов в зависимости от их состава, а также влияние скорости, направления и степени деформации на положение пика селективного отражения света.

 Механизм вызванного механической деформацией изменения положения пика селективного отражения света композитов основан на механоиндуцированном уменьшении шага спирали и конкуренции между процессами сжатия и релаксации холестерической структуры. • Физико-механические свойства композитов определяются типом полимерной матрицы и концентрацией жидких кристаллов в полимерной матрице.

Личное участие автора заключалось в непосредственном ведущем вкладе во все этапы выполнения работы: анализ научной литературы; выбор объектов и методов исследования; формулировка задач этапов работы и выводов; планирование, проведение, обработка и интерпретация результатов экспериментов; подготовка публикаций по теме выполненного исследования и участие в тематических конференциях.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных в ходе работы результатов подтверждена тем, что она выполнена на высоком экспериментальном уровне на новейшем оборудовании с использованием современных методов исследования. Результаты данной диссертационной работы представлены на международной конференции «Ежегодный открытый конкурс-конференция научно-исследовательских работ по химии элементоорганических соединений и полимеров "ИНЭОС OPEN CUP"» (2021, Москва), международной конференции «Ломоносов 2021 секция "Химия"» (2021, Москва), П Коршаковской Всероссийской с международным участием конференции «Поликонденсационные процессы и полимеры» (2021, Москва), International Bakeev Conference on Macromolecular Nano-objects and Polymer Nanocomposites (2020, Москва), Восьмой Всероссийской Каргинской конференции «Полимеры в стратегии научнотехнического развития РФ "Полимеры — 2020"» (2020, Москва).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 02.00.06 – Высокомолекулярные соединения (химические науки) и индексируемых в международных базах данных (Web of Science, Scopus), а также 6 тезисов в сборниках докладов на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора, экспериментальной части, обсуждения результатов, выводов и списка цитируемой литературы из 222 наименований. Работа изложена на 141 страницах компьютерного набора формата А4, содержит 81 рисунок и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика и актуальность темы исследования, описана степень разработанности и актуальность научной работы, указаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов, научная новизна, приведены сведения об апробации полученных результатов, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

В **1-й главе** приведен подробный **обзор литературы** по теме диссертационного исследования. В нем рассматриваются актуальные публикации, в которых изложены основные исследования, касающиеся жидких кристаллов и полимерных композиционных

материалов на их основе. Рассмотрены известные научные сведения о структуре, свойствах и типах ЖКр, их взаимодействие с поверхностями и ориентация в каплях. Описаны основные подходы к созданию полимерных композиционных материалов содержащих ЖКр, их разнообразные типы, физико-механические и оптические свойства. Проанализированы публикации, посвященные механо-чувствительным материалам, в том числе включающим в свой состав холестерические ЖКр.

Глава 2 – экспериментальная часть, в которой приведены объекты исследования и их характеристики, описаны методики получения полимерных матриц, ЖК смесей и композиционных ЖК пленок, а также основные экспериментальные методы исследования.

2.1. Объекты исследования.

Полимерные матрицы. Для создания механо-чувствительных полимердиспергированных жидких кристаллов (ПДЖК) были выбраны три полимерные матрицы: два спштых эластомера – полидиметилсилоксан и полиуретан, а также термопластичный полимер – поливиниловый спирт (табл.1). Выбор данных полимерных матриц обусловлен тем, что все они образуют оптически-прозрачные пленки и в них не растворяются ЖКр, что является необходимым для формирование ЖК капель в полимерной матрице.

Таблица 1. Полимерные матрицы.



Сшитые ПДМС и ПУ эластомеры образуются в результате реакции полиприсоединения при смешении в определенном соотношении коммерчески доступных прекурсоров. ПВС пленки получали израствора в воде с добавлением 60 - 80 вес.% глицерина.

Холестерические жидкокристаллические смеси. В работе были получены несколько десятков холестерических жидких кристаллов (ХЖКр) разного состава, а именно две группы смесей – на основе нематиков Е7, MLC6816 и H-8 (табл.2) с хиральными допантами (производные изосорбида ButSorb и HexSorb, холестерилпеларгонат); а также трех и четырехкомпонентные смеси на основе хиральных производных холестерина.

Таблица 2. Компоненты холестерических смесей.



Глава 3 посвящена обсуждению результатов, полученных в ходе исследования и состоит из шести разделов, в которых рассматриваются особенности приготовления холестерических ЖК смесей и ПДЖК композитов, текстура ПДЖК композитов, их физикомеханические и механо-оптические свойства, а также механизм механо-оптического отклика.

3.1. Приготовление и свойства холестерических жидкокристаллических смесей.

Для получения холестериков из первой группы в один из нематиков добавляли расчетное количество смеси HexSorb и ButSorb 1:1 (смесь допантов использовали с целью избежать фазового разделения) или холестерилпеларгонат. Вторая группа ХЖКр – смесь производных холестерина, которые как индивидуальные вещества находятся в кристаллическом состоянии при комнатной температуре, но при смешении образуют холестерическую фазу (табл.3). В ходе работы обнаружено, что введение малых количеств (2-5%) четвертого компонента (холестерилстеарат) значительно улучшает стабильность холестерических ЖК смесей, которые при длительном хранении могут кристаллизоваться.

Смесь	ΧП	XB	XX	XC	λ _{max} , HM	T _{πp} , °C
ХЖК-1	48.0	25.0	25.0	2.0	608	79
ХЖК-2	60.7	19.6	19.7	-	575	61-62
ХЖК-З	50.1	24.9	22.9	2.1	572	79
ХЖК-4	32.7	32.9	34.4	-	822	77
ХЖК-5	50.1	24.9	22.9	2.1	572	79

Таблица 3. Состав и свойства ЖК смесей (Т_{пр} – температура просветления).

Положение максимума селективного отражения света (СОС) регулировали, изменяя соотношение компонентов смесей – его подбирали таким образом, чтобы λ_{max} располагалась в видимой или ближней инфракрасной области спектра, а именно в диапазоне 500-800 нм (с учётом возможного смещения в коротковолновую область спектра в ходе деформации плёнок композитов).

3.2. Получение холестерических жидкокристаллических композитов.

В случае **ПДМС** матрицы, синтез сшитого полимера осуществляли по реакции гидросилилирования в присутствии платинового катализатора. ЖК композиты получали двумя способами: эмульсионным и методом индуцированного испарением растворителя разделения фаз (solvent induced phase separation – SIPS). При эмульсионном методе ЖК смесь вводили на этапе смешения компонентов – образовывалась устойчивая эмульсия, из которой после сшивания полимера получалась ПДЖК пленка. Метод SIPS подразумевает использование общего растворителя для ЖК смеси и полимера. Испарение растворителя приводит к фазовому разделению одновременно с процессом сшивания полимера.

ПУ эластомеры синтезировали по реакции полиприсоединения диизоцианата (компонент А) и смеси полиэфирных диолов, сшивающих агентов и катализатора (компонент В). ЖК смесь растворяли в компоненте А, после чего прибавляли компонент В. Так как ЖК смесь нерастворима в компоненте В, немедленно происходило фазовое разделение с образованием мельчайших ЖК капель. В ходе реакции образования полиуретанового эластомера капли коагулировали и увеличивались в размерах до тех пор, пока позволяла вязкость среды, которая растет по мере протекания реакции образования полимера.

ПВС является стеклообразным полимером при комнатной температуре. Для понижения его температуры стеклования и придания способности к большим деформациям использовали глицерин в качестве пластификатора. Образцы получали эмульсионным методом - ЖК смесь эмульгировали в водном растворе ПВС и глицерина. В процессе испарения растворителя при комнатной температуре образовывались гибкие ПВС композиты с каплями жидких кристаллов.

Размеры капель и распределение их по размерам в композитах зависит, в первую очередь, от концентрации ЖК смеси – увеличение её концентрации приводит к росту среднего размера капель. Однако, при введении слишком большого количества ЖК смеси (для ПУ – более 15%, ПДМС и ПВС– 30%) происходит её выпотевание на поверхности композита. Кроме того, на распределение капель по размерам влияет: в эмульсионном способе приготовления - скорость и продолжительность перемешивания; в методе SIPS – скорость испарения растворителя; в методе индуцированного полимеризацией разделения фаз (ПУ композиты) – скорость реакции образования полимера (которая зависит от температуры).

3.3. Морфология композитов.

Полученные композиты изучали с помощью поляризационно-оптической микроскопии (ПОМ). На рисунке 3 приведены ПОМ фото композитов на основе трех использованных полимерных матриц с равным содержанием ЖК смеси. Как видно на рисунке 3а, капли размером 5-10 мкм распределены равномерно в объеме ПДМС матрицы.

Граничные условия внутри капель могут быть планарные или гомеотропные – длинные оси молекул расположены параллельно поверхности капли или перпендикулярно соответственно. При использовании ПДМС матрицы молекулы жидких кристаллов в каплях ориентированы перпендикулярно границам капли (гомеотропная ориентация). В ЖК структуре в каплях можно видеть множество дефектов (рис.3а). Всё это способствует малой интенсивности селективного отражения света ПДМС композитов или его отсутствию.







Рисунок 3. ПОМ фото композитов, содержащих 10% ЖК смеси производных холестерина (ХЖК-1) на основе матриц: а) ПДМС, б) ПУ, в) ПВС. Поляризаторы скрещены.

Другая картина наблюдается в **ПУ** композитах. На рисунке 36 видны близкие по размерам капли, имеющие текстуру, которую называют «мальтийский крест». Такая текстура может свидетельствовать о планарной ориентации жидких кристаллов. Это было подтверждено путем приготовления композитов с холестерической смесью, имеющей большой шаг спирали (~2 мкм). Этот шаг спирали можно увидеть с помощью поляризационного микроскопа (рис. 4а) – он равен удвоенному расстоянию между двумя светлыми или темными кольцами внутри капель. При растяжении капли (рис.4б) заметно вытягивание этих холестерических «слоёв» вдоль направления деформации.



Рисунок 4. ПОМ фото ПУ пленки, содержащей 25% ЖК смеси с большим шагом спирали (99.5 MLC6816 и 0.5% HexSorb) до (а) и после растяжения на 100% (б).

Как было отмечено выше, распределение капель по размерам в ПУ композитах зависит от температуры отверждения (табл.4).

Таблица 4. Распределение капель по размерам при разной температуре отверждения ПУ композита.

Т отверждения,	Средний размер	Стандартное	Коэффициент
°C	капель, мкм	отклонение, мкм	вариации, %
20	10.9	4.1	37
65	5.9	0.9	15

Таким образом, при повышенной температуре получения композита образуются более мелкие ЖК капли с узким распределением по размерам.

В композитах на основе **ПВС** матрицы, капли размером от 3 до 100 мкм распределены неравномерно в объеме матрицы, что является следствием эмульсионного способа изготовления (рис.3в). Внешний вид капель в ПОМ свидетельствует о строгой планарной ориентации молекул ЖКр, что подтверждается и литературными данными.

Рисунок 5. Фотографии пленок ЖК композитов: а) ПУ композит с 10% смеси ХЖК -1, б) ПВС с 15% ЖК смеси (ХЖК-2), в) ПДМС с 27% ЖК смеси (94% MLC6816, по 3% HexSorb и ButSorb) до и после растяжения на ~350%.

Пленки на основе ПУ и ПВС окрашены в цвета введенных в них холестерических смесей (рис.5а-б), в то время как ПДМС композиты белые или мутно-желтые, однако в растянутом виде они приобретают окраску (рис.5в).

Таким образом, в ходе работы разработаны методы получения эластичных полимерных плёнок с каплями холестерических жидких кристаллов диспергированных в них. ПУ и ПВС пленки ярко окрашены благодаря планарной ориентации молекул ЖКр в каплях, а композиты на основе ПДМС приобретают селективное отражение света лишь при растяжении из-за гомеотропной ориентации молекул ЖКр.

3.4. Физико-механические свойства композитов.

С целью установления влияния вводимых ЖК смесей на механические свойства полученных композитов было проведено исследование физико-механических свойств их плёнок с помощью универсальной испытательной машины (динамометра). Кривые напряжения-деформации трех типов композитов, содержащих равное количество ЖК смеси на основе производных холестерина, приведены на рис. ба.

Наибольшую относительную деформацию до разрыва демонстрируют композиты на основе ПДМС (до 400%), ПУ композит способен растягиваться на 250-300%, а ПВС пленки до 200%. При этом наиболее жесткими являются композиты на основе ПВС (2.95±0.2 МПа); композит на основе сшитого полиуретана имеет близкое значение модуля Юнга 2.83±0.2

МПа, а предел прочности достигает 5 МПа (для ПВС ~2.1±0.2 МПа). ПДМС композиты значительно более мягкие, их модуль упругости на порядок ниже – 0.29±0.05 МПа, предел прочности около 0.3 МПа. Способность к обратимой деформации характерна только для плёнок на основе сшитых эластомерных матриц – ПДМС и ПУ.

Рисунок 6. Динамометрические кривые композитов, содержащих ЖК смесь производных холестерина (ХЖК-1): а) на основе трех матриц с равным содержанием (10%) ЖК смеси, б) на основе ПУ матрицы с разным содержанием ЖК смеси (указано на рис.).

Введение ЖК смесей в полимерную матрицу в незначительной степени ухудшает механические характеристики пленок ПУ композитов (рис.6б). Образцы, содержащие до 12% ЖК смеси, рвутся при удлинении, в среднем, на 25-30% ниже, чем пленки без наполнителя. В первую очередь, это связано с тем, что капли жидкого кристалла играют роль дефектов и неоднородностей в структуре композита, которые при растяжении действуют как центры зарождения трещин. Кроме того, введение ЖКр в полимерную матрицу снижает напряжение при заданной деформации и предел прочности, что является следствием низкой вязкости капель ЖК смесей, диспергированных в пленках композитов. В композитах, содержащих 14% и более ЖК смесей происходят процессы их выпотевания, поэтому их механические показатели существенно хуже и нами здесь не рассматриваются.

Следует отметить, что наилучшими физико-механическими свойствами обладают композиты на основе ПУ матрицы при условии содержания ЖК смеси не более 12%. Полиуретановая матрица, как было определено в ходе работы, представляет собой слабо сшитую сетку, с молекулярной массой среднего участка цепи между двумя соседними узлами сетки порядка 4000 г/моль, что определяет её способность к большим обратимым деформациям.

Пленки на основе ПДМС слишком мягкие и обладают низким пределом прочности, что затрудняет создание на их основе механосенсоров. Основным недостатком пленок ПВС является необратимость деформации и относительно небольшие удлинения до разрыва. Таким образом, сопоставление трех типов матриц показывает, что <u>оптимальными физико-</u> механическими характеристиками обладают плёнки композитов на основе полиуретана.

3.5. Механо-оптические свойства композитов.

Изучение механо-оптических свойств ПДЖК композитов проводили двумя способами: первый способ – образец последовательно растягивали до небольшой степени удлинения (шагом в 50%), после чего регистрировали спектры отражения (статический режим); второй способ – спектры отражения регистрировали с большой скоростью в процессе деформации образцов (динамический режим). Рассмотрим влияние растяжения на оптические свойства композитов на основе трех полимерных матриц:

3.5.1. Композиты на основе ПДМС растягивали с шагом в 50% или 100% после чего регистрировали спектры отражения. При деформации образца (на ~400%), полученного эмульсионным способом, интенсивность селективного отражения света увеличивается без изменения его длины волны (рис.7а). Образец, полученный методом SIPS, демонстрирует смещение пика СОС в коротковолновую область (~30 нм при деформации на 200%, рис.7б).

Рисунок 7. Спектры отражения плёнок композитов, содержащих а) 24.9% ЖК смеси (ХЖК-3), б) 27% ЖК смеси (94% MLC6816, по 3% HexSorb и ButSorb) в зависимости от степени вытяжки в статическом режиме (указана на рис.); в) спектр отражения и г) зависимость максимальной длины волны СОС от степени удлинения ПДМС композита, содержащего 10% ЖК смеси (ХЖК-1) в динамическом режиме (скорость деформации - 700 мм/мин).

Измерения в динамическом режиме показали, что деформация композитов на основе ПДМС приводит к сдвигу пика СОС в коротковолновую область на около 70 нм (рис.7в). Следует отметить, что данное смещение наблюдается до деформации 70% (назовем её

«критической» деформацией), а дальнейшее удлинение образца не приводит к еще большему сдвигу пика СОС, а наоборот, он возвращается в длинноволновую область спектра (рис.7г).

3.5.2. Композиты на основе ПУ. В динамическом режиме ПУ композиты демонстрируют значительный механо-оптический отклик, проявляющийся в ярких изменениях цветов пленок композитов (рис.8).

Рисунок 8. Фотография пленок ПУ композитов, содержащих а) 13.5% ЖК смеси (ХЖК-4) и б) 11.6% ЖК смеси (ХЖК-5), сделанные в процессе растяжения образцов.

В эксперименте с деформацией ПУ композитов до разрыва был получен набор спектров (рис. 9а). Хорошо видно, что при растяжении примерно до 100% наблюдается значительный сдвиг (на ~ 80 нм) пика СОС в коротковолновую область спектра, после чего начинается процесс релаксация шага спирали, проявляющийся в смещении пика СОС в сторону исходных длин волн (рис.9б).

Рисунок 9. а) Спектры отражения, полученные при растяжении (деформация указана на рисунке) и б) - зависимость максимальной длины волны СОС от степени удлинения ПУ композита, содержащего 12.2% ЖК смеси (ХЖК-1). Скорость деформации - 700 мм/мин.

Для изучения процесса релаксации шага спирали, был проведен эксперимент с фиксацией деформации (рис. 10а) – для этого образец растягивали на 150% и фиксировали. Обнаружено, что до достижения «критической» деформации ~100% наблюдается смещение пика отражения в коротковолновую область спектра, а при дальнейшем растяжении пик начинает смещаться обратно в длинноволновую область, кроме того, после фиксации образца пик СОС продолжает смещаться к исходным длинам волн, то есть продолжается релаксация шага спирали холестерика (рис. 10б, в).

Рисунок 10. (а) Фотографии, полученные в процессе растяжения ПУ композита на 150%, содержащего 10% ЖК-смеси (ХЖК-1), и спустя 3 секунды после фиксации. Спектры отражения этого образца, полученные при растяжении (б) и после фиксации деформации 150% (в), релаксация напряжения и кинетика сдвига пика СОС (г), зависимость нормированной интенсивности СОС от степени удлинения (д). Скорость деформации - 700 мм / мин.

Исходя из кривых релаксации напряжения и изменения положения пика СОС во времени, представленных на одном графике (рис. 10 г), сделан вывод, что фиксация растянутого образца приводит к немедленному небольшому снижению значений напряжения. Это сопровождается увеличением скорости сдвига пика СОС (проявляется в увеличении наклона кривой изменения положения пика СОС с течением времени). В конце концов релаксация напряжения достигает плато, и восстановление холестерической структуры постепенно завершается.

Как видно из рис. 10д, в процессе деформации ПУ композита растет интенсивность отраженного им света, кроме того необходимо отметить, что после завершения релаксации

холестерической структуры пик СОС оказывается в более длинноволновой области, чем исходное значение (рис. 10 г). Такое поведения ЖК структуры связано с особенностями ориентации молекул ЖКр внутри капель. Более подробно механизм этих изменений рассмотрен в следующем разделе.

Амплитуда смещения пика селективного отражения света зависит от скорости растяжения (рис. 11) – при изменении скорости растяжения от 200 до 700 мм/мин амплитуда смещения пика СОС увеличивается двукратно. Увеличение скорости деформации приводит к преобладанию процессов, связанных со сжатием спиральной структуры, над релаксационными, что позволяет добиться больших смещений пика СОС.

Рисунок 11. Зависимости длины волны селективного отражения света от деформации ПУ образца с 12.2% ЖК смеси (ХЖК-1), измеренные при деформации до 150% с разными скоростями (указаны на рисунке).

Для изучения обратимости процессов сдвига пика СОС были проведены циклические испытания образцов пленок. Пленку композита циклически растягивали с амплитудой в 50% относительного удлинения. Спектры демонстрируют плавное изменение положения пика СОС, сначала в коротковолновую область спектра при растяжении (рис. 12а), а затем, в процессе возврата к исходным размерам образца, обратно в длинноволновую область (рис. 12б). На рис.12а-б видно практически полное совпадение спектров двух последовательных циклов растяжение – сжатие. Ввиду того, что в данном случае величина деформации меньше «критической», смещение пика селективного отражения света происходит в течение всего цикла растяжение-сжатие.

Рисунок 12. а) – б) Спектры отражения, полученные в процессе циклических деформаций образца ПУ композита, содержащего 10% ЖК смеси (ХЖК-1). Направление сдвига пика СОС указано стрелками. Скорость деформации - 700 мм/мин.

Коротковолновое смещение пика СОС достигает 70 нм при растяжении, а в процессе сжатия пик оказывается в более длинноволновой области спектра по сравнению с исходным положением. Таким образом, максимальная амплитуда сдвига пика СОС достигает более 100 нм. Для полиуретановых композитов, полученных в данной работе, максимальная амплитуда смещения пика СОС достигала 200 нм при циклических деформациях на 100% со скоростью 1000 мм/мин.

3.5.3. Композиты на основе пластифицированного ПВС также демонстрируют механо-оптический отклик при одноосном растяжении (рис. 13), подобно ПУ и ПДМС композитам.

Рисунок 13. а) Спектры отражения ПВС композита, содержащего 15% ЖК смеси (ХЖК-2), до и после одноосного растяжения на 75% и (б) зависимость положения максимума СОС от степени растяжения. Скорость деформации - 700 мм/мин.

Ввиду того, что пластифицированный ПВС не содержит сшивок, пленки на его основе не способны восстанавливать свои исходные размеры. Таким образом, в растянутой пленке, капли остаются деформированными даже после извлечения образцов из динамометра. Тем не менее, холестерическая структура восстанавливает свой равновесный шаг спирали после снятия напряжения. Как и в ПУ композитах, через некоторое время после окончания деформации пик СОС проявляется в более длинноволновой области.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что механо-оптический отклик носит релаксационный характер, т.е. связан с выводом системы из равновесного состояния и возвращением в него, а также зависит от скорости деформации и жесткости матрицы. Так, при равных скоростях деформации для жестких ПУ и ПВС матриц «критическая» деформация, до которой происходит смещение пика СОС (на ~100 нм), составляет примерно 100%, тогда как для низкомодульного ПДМС композита эта величина близка к 70% (смещение до 70 нм). Увеличении скорости деформации позволяет достичь больших амплитуд сдвига пика СОС. При растяжении композитов пик СОС смещается в коротковолновую область спектра и начинает смещаться в сторону исходных длин волн при больших удлинениях, после фиксации образца или в процессе движения зажимов динамометра в исходное положение.

3.6. Механизм механо-оптического отклика. Рассмотрим возможный механизм механо-оптического отклика, вызванного механо-индуцированным изменением оптических свойств капель жидких кристаллов внутри полимерной матрицы.

Во всех случаях, когда наблюдался механо-оптический отклик (в динамическом режиме) при растяжении композита примерно до 70-100% происходил значительный сдвиг пика СОС в коротковолновую область. ЖК капля внутри ПДЖК композита представляет собой ЖК смесь, заключенную в постоянном ограниченном объеме. При одноосном растяжении композита, происходит удлинение ЖК капель вдоль направления деформации, и капли принимают форму эллипсоида (как показано на рис. 4б).

Такое удлинение капель приводит к поперечному сжатию их вдоль малого радиуса эллипсоида – перпендикулярно направлению растяжения. При этом происходит механически индуцированное упругое сжатие спиральной холестерической ЖК структуры, в свою очередь это приводит к уменьшению шага спирали (рис.1). Так как величина шага спирали холестерика связана с величиной λmax (см. ур.1), его уменьшение приводит к смещению пика СОС в коротковолновую область спектра и изменению цвета плёнок (рис. 8, 10а).

Сразу после начала такого сжатия капель в холестерической спиральной структуре начинаются процессы релаксации – холестерический ЖКр стремится вернуть свою равновесную структуру. Как видно из спектров отражения (рис. 7в-г, 9, 10, 13) до достижения степени удлинения примерно 70-100%, наблюдается смещения пика СОС в коротковолновую область спектра, а дальнейшее удлинение образца не приводит к еще большему смещению пика СОС, а наоборот, пик смещается обратно в длинноволновую область. Такой обратный сдвиг пика СОС в длинноволновый спектральный диапазон при высоких степенях растяжения пленок можно объяснить конкуренцией между процессом уменьшения толщины капли и релаксацией спиральной структуры. Дело в том, что ввиду постоянства объема капли, на начальном этапе удлинения ЖК капли вдоль направления вытяжки, её перпендикулярный размер резко уменьшается, тогда как при дальнейшей деформации уменьшение толщины капли замедляется. Следовательно, при достижении некоторой «критической» деформации скорость уменьшения толщины капли станет меньше скорости релаксации холестерической структуры.

Увеличение интенсивности отражения света растянутыми ПДМС композитами (рис. 7), а также растянутыми ПУ композитами (рис. 10) по сравнению с недеформированными объясняется тем, что перед растяжением (рис. 14а) только небольшая область в холестерической капле содержит спиральную структуру с осью, ориентированной вдоль направления падения света, и способна эффективно его отражать (при этом в доминирующей части капли $\theta > 0$). Во время деформации капли, увеличивается доля холестерической фазы с малым или нулевым углом θ (рис. 14б). По этой же причине, согласно уравнению (1) происходит возвращение пика СОС после фиксации образца (рис. 10г) в более длинноволновую область спектра, чем исходное λ_{max} . Помимо этого, в вытянутых каплях, улучшается планарная текстура (с $\theta \sim 0$) за счет уменьшения толщины ЖК слоя и увеличения ориентирующих условий, влияния граничных a также уменьшения вклала светорассеивающих дефектов, которые присутствуют в сферических каплях.

Как видно на изображении, полученном с помощью отражающей ПОМ (R-ПОМ) (рис. 14в-г), в растянутом композите увеличивается площадь яркого отражающего пятна в центре

капли и, что, немаловажно, капли сохраняют вытянутую форму даже после завершения процесса деформации. Поэтому сильно растянутый образец с полностью релаксировавшей холестерической структурой имеет более яркий цвет, то есть бо́льшую интенсивность отражения (рис. 5в, 10а).

Рисунок 14. Схематическое изображение холестерической капли с планарными граничными условиями до (а) и после деформации (до релаксации шага спирали) (б). Изображение R-ПОМ ПУ композита, содержащего 12.2% ЖК смеси (ХЖК-1) до (в) и после растяжения на 100% (г), направление деформации горизонтальное (вставки иллюстрируют геометрическую форму капель жидких кристаллов).

В эксперименте с циклическими деформациями также наблюдается сдвиг СОС в сторону исходных длин волн в ходе восстановления начальных размеров плёнки. Как и в эксперименте с фиксацией заданного удлинения, это смещение происходит в более длинноволновую область спектра (640 нм) по сравнению с начальным положением пика СОС (585 нм) (рис. 126). Это связано с тем, что при циклических деформациях, во время движения зажимов динамометра в обратном направлении с высокой скоростью, вытянутые эллипсоидные капли испытывают сжатие вдоль своей вытянутой длинной оси и растяжение в перпендикулярном направлении. Эффект сжатия капли противоположен описанному выше для растяжения и вызывает сдвиг пика СОС в сторону более длинных волн по аналогичному механизму. Через короткое время (несколько секунд), и образец полностью восстанавливает

свои размеры, и холестерическая структура полностью релаксирует, что приводит к полному восстановлению оптических свойств композита.

В статическом режиме деформации (ПДМС композиты), в ходе которого фиксируется определённое значение деформации, до момента регистрации спектров отражения холестерическая струкгура успевает частично релаксировать. Именно поэтому сдвиг пика селективного отражения света не наблюдается (рис. 7а) или является небольшим (рис. 7б), в отличие от динамического режима – когда в процессе деформации в каждый момент времени регистрируется спектр отражения. Стоит отметить, что, как это следует из ПОМ фотографий (рис.3а), в случае ПДМС матрицы молекулы ЖКр внутри капель ориентированы перпендикулярно границам капли, то есть реализуются гомеотропные граничные условия (рис. 15 б). Поэтому интенсивность отражения данных композитов небольшая, по сравнению с композитами (ПУ, ПВС), в которых реализуется планарная ориентацией молекул ЖКр (рис. 15а). Тем не менее, как видно на схеме (рис. 15в), удлинение капель с гомеотропными граничными условиями может приводить к ориентации оси холестерической спирали вдоль направления отражения света, вследствие чего увеличивается интенсивность отраженного света.

Рисунок 15. Идеализированное представление композитов с каплями а) в случае планарных граничных условий ориентации; б) с гомеотропными граничными условиями; с) случай, изображённый на рис. 14 б в условиях одноосного растяжения. 1 - капля ЖК с холестерическими «слоями», 2 – полимерная сшитая матрица.

Таким образом, в работе предложен механизм механо-оптического отклика холестерических ПДЖК композитов, основанный на сжатии холестерической структуры перпендикулярно направлению вытяжки композитов, приводящем к уменьшению шага спирали и сдвигу пика селективного отражения света в коротковолновую область. После завершения цикла деформации происходит релаксация шага спирали и сдвиг пика СОС в длинноволновую область спектра.

Яркие примеры изменения цветовых характеристик при деформации композитов дают основания предположить о возможности использования их для изготовления датчиков различных деформаций, элементов гибких дисплеев, мягкой робототехники и т.д.

выводы

1. Разработаны подходы к созданию нового поколения механохромных полимерных материалов – эластичных жидкокристаллических композитов на основе сшитого полидиметилсилоксана и полиуретана, а также пластифицированного глицерином поливинилового спирта с диспергированными в них холестерическими жидкими

кристаллами. Подходы заключаются в использовании методов разделения фаз (индуцированных полимеризацией и испарением растворителя) и метода создания эмульсии жидких кристаллов в растворах или прекурсорах полимеров.

2. Изучены физико-механические свойства и морфология полученных холестерических ЖК композитов с планарной (ПУ и ПВС) и гомеотропной (ПДМС) ориентацией жидких кристаллов в полимерной матрице, которая определяется типом матрицы и условиями приготовления ЖК композитов. Показано, что полиуретановые композиты с максимальной деформацией до 300% и предельной прочностью до 5 МПа являются наиболее перспективными среди трех рассмотренных. Установлено, что введение до 10-12% жидких кристаллов в полиуретановые пленки не меняет их механические свойства – они способны выдерживать многократные циклические деформации без ухудшения механо-оптического отклика.

3. Впервые обнаружен значительный механо-оптический отклик полученных композитов и установлено, что процесс одноосного растяжения всех трех типов композитов сопровождается смещением пика селективного отражения света в коротковолновую область спектра (~70 нм для ПДМС, ~100 нм для ПВС и до 200 нм для ПУ). Показано увеличение интенсивности отражения при деформации композитов, которое связано с расширением областей в ЖК каплях с параллельным направлению отражения света расположением холестерических спиралей.

4. Установлено наличие «критической» деформации, при достижении которой пик селективного отражения света начинает сдвигаться в сторону исходных длин волн. Смещение пика отражения в первоначальное положение происходит также в процессе восстановления исходных размеров образца – в результате циклических деформаций. Впервые показано, что амплитуда смещения пика селективного отражения света растет более, чем в два раза при увеличении скорости деформации от 200 до 700 мм/мин.

5. Предложен механизм изменения положения пика селективного отражения света при различных видах деформаций, основанный на уменьшении шага спирали холестерического жидкого кристалла в каплях при растяжении с его последующим увеличением, когда сила сжатия холестерической структуры уравновешивает силу её релаксации или когда восстанавливается исходная форма капель.

Сведения об авторском вкладе соискателя Баленко Н.В. в научных статьях по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях.

Баленко Н.В. внес основной авторский вклад во все публикации по теме диссертационной работы. Соискатель выполнял экспериментальную работу в публикациях [1] и [2] и руководил выполнением эксперимента в работе [3]. Соискатель принимал активное участие в постановке научных задач, выборе объектов и методов исследования. В публикациях [1], [3] вклад соискателя составляет 1/2, в публикации [2] составляет 3/4. В публикации [1] соискатель разработал рецептуру ПДМС матрицы, определил оптимальное соотношение компонентов для создания стабильных композитов, проводил оптические

исследования, активно участвовал в обсуждении результатов. Для подготовки публикации [2] соискатель предложил использовать новую полиуретановую матрицу, разработал метод исследования механо-оптических свойств композитов в процессе растяжения, внес весомый вклад в объяснение механизма наблюдаемых явлений. В публикации [3] соискатель разработал план исследований и руководил работой, формулировал научные задачи, корректировал ход экспериментальной работы, а также выполнил механо-оптические исследования образцов и интерпретировал полученные данные.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, индексируемых по базе Web of Science, а также изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 02.00.06 - Высокомолекулярные соединения (химические науки):

- 1. Бобровский А.Ю., Баленко Н.В., Шибаев В.П. / ЖК-композиты на основе аморфных эластичных полисилоксанов, наполненных низкомолекулярными холестериками // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2020. Т. 20 № 1. С. 27–33. DOI: 10.18083/LCAppl.2020.1.27 (IF = 0.962 РИНЦ 2019 г.).
- Balenko N.V., Bobrovsky A.Yu., Shibaev V.P. / Mechano-optical response of novel polymer composites based on elastic polyurethane matrix filled with low-molar-mass cholesteric droplets // Macromolecular Materials and Engineering. 2021. V. 306 № 10. P. 2100262. DOI: 10.1002/mame.202100262 (IF = 4.367 Web of Science 2020 г.).
- 3. Баленко Н.В., Бобровский А.Ю., Втюрина Е.С., Шибаев В.П. / Механочувствительные жидкокристаллические композиты на основе холестериков, диспергированных в пленках поливинилового спирта // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2021. Т. 21 № 3. С. 26–31. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.3.26 (IF = 0.962 РИНЦ 2019 г.).

Иные публикации: Тезисы докладов на научных конференциях

- Баленко Н.В., Шибаев В.П., Бобровский А.Ю. / Жидкокристаллические холестерические композиты на основе эластомеров: механоиндуцированное управление оптическими свойствами // Открытый конкурс-конференция научно-исследовательских работ по химии элементоорганических соединений и полимеров «ИНЭОС OPEN CUP». Москва, Россия, 17-20 мая 2021. Конкурсные работы – 2021. – С. 78-80. ISSN: 2686-7230
- Баленко Н.В., Шибаев В.П., Бобровский А.Ю. / Жидкокристаллические холестерические композиты эластомеров: механически-активированное управление их оптическими свойствами // XXVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2020», Москва, Россия, 12-23 апреля 2021. Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021», секция «Химия».– М.: МАКС Пресс, 2021. – С. 16. [Электронный ресурс] ISBN: 978-5-317-06593-5
- 3. Баленко Н.В., Шибаев В.П., Бобровский А.Ю. / Композиционные материалы на основе полиуретанового эластомера с механически управляемыми оптическими свойствами // II Коршаковская Всероссийская с международным участием конференция «Поликонденсационные процессы и полимеры», Москва, Россия, 25-26 февраля 2021. Программа и тезисы докладов, С. О-16. ISBN: 978-5-6046000-0-9.
- 4. Баленко Н.В., Бобровский А.Ю., Шибаев В.П. / Полимер-диспергированные холестерические жидкие кристаллы: механически-индуцированное смещение пика селективного отражения света // Book of abstracts. International Bakeev Conference

"Macromolecular Nanoobjects and Polymer Nanocomposites". – Москва. – 2020. – С. Р-6. ISBN 978-5-6043936-1-1.

- 5. Баленко Н.В. / Фото- и механо- чувствительные композиты на основе жидких кристаллов, диспергированных в эластичных полимерных матрицах // XXVII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Москва, Россия, «Ломоносов-2020», 10-27 ноября 2020. Материалы XXVII Международной научной конференции студентов, аспирантов И молодых учёных «Ломоносов-2020», секция «Химия». - М.: Издательство «Перо», 2020. - с. 183. [Электронное издание]. ISBN 978-5-00171-642-6.
- 6. Баленко Н.В., Бобровский А.Ю., Шибаев В.П. / Фото- и механо- чувствительные композиты на основе жидких кристаллов, диспергированных в эластичных полимерных матрицах // Восьмая Всероссийская Каргинская конференция. Полимеры в стратегии научно-технического развития РФ. «Полимеры 2020», химический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, 9-13 ноября 2020. Сборник тезисов, С. ВЗ-3. ISBN: 978-5-6043721-3-5.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЖКр – жидкий кристалл

ЖК – жидкокристаллический

ХЖКр – холестерический жидкий кристалл

ПДЖК – полимер-диспергированный жидкий кристалл

ПДМС – полидиметилсилоксан

ПВС – поливиниловый спирт

ПУ – полиуретан

ПОМ – поляризационно оптическая микроскопия

R-ПОМ – отражающая поляризационно оптическая микроскопия

СОС – селективное отражение света

ХВ – холестерилвалерат

ХП – холестерилпеларгонат

ХС – холестерилстеарат

XX – холестерилхлорид

SIPS – метод индуцированного испарением растворителя разделения фаз