

УДК 532.783

А. П. Гардымова^{1,2}

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ КАПЕЛЬ ХИРАЛЬНОГО НЕМАТИКА В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ

¹Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет,
Свободный пр-т, 79, 660041 Красноярск, Россия

²Красноярский научный центр СО РАН,
Академгородок, 50, стр. 38, 660036 Красноярск, Россия. E-mail: gard@iph.krasn.ru

Взаимодействие жидкого кристалла с поверхностью полимера является чрезвычайно интересной физической проблемой вследствие того, что влияние поверхностных сил, благодаря упорядоченному молекулярному строению мезофазы, может передаваться далеко в объем, определяя структуру и оптические свойства жидкокристаллических композитов. В данной работе рассматриваются различные типы ориентационного упорядочения хирального нематика, диспергированного в полимерной матрице, в зависимости от концентрации холестерической добавки, а также от размера заполняемой им полости.

Ключевые слова: полимерно-жидкокристаллический композит, нематик, хиральность, холестерик, ориентационная структура.

А. П. Gardymova^{1,2}

ORIENTATION STRUCTURES OF THE CHIRAL NEMATIC DROPLETS IN A POLYMER MATRIX

¹Institute of Engineering Physics and Radio Electronics, Siberian Federal University,
Svobodnyi prospect, 79, 660041 Krasnoyarsk, Russia

²Krasnoyarsk Scientific Center, SB RAS,
Akademgorodok 50, 660036 Krasnoyarsk, Russia. E-mail: gard@iph.krasn.ru

The interaction of the liquid crystal with a polymer surface is an extremely interesting physical problem owing to the fact that the influence of surface forces due to the ordered molecular structure of a mesophase can be transferred far into the bulk, specifying the structure and optical properties of liquid crystal composites. This paper discusses the various types of the orientational ordering of chiral nematic dispersed in a polymer matrix, depending on the concentration of cholesteric additives and the size of cavity filled by the nematic.

Key words: polymer-liquid crystal composite, nematic, chirality, cholesteric, orientational structure.

Введение

Жидкие кристаллы (ЖК) уже более полувека используются в различных областях оптоэлектроники. Наиболее массово ЖК применяются в устройствах отображения информации. Электрооптические эффекты в ЖК, лежащие в основе функционирования устройств отображения информации, реализуются в плоских слоях ЖК с определенной ориентационной структурой. Структурное упорядочение слоя определяется в основном особенностями сцепления молекул ЖК с поверхностью подложек электрооптической ячейки. На внутреннюю сторону подложек нанесены прозрачные электроды для управления ЖК, а также ориентирующие полимерные слои для задания исходной ориентации. В данном случае к однородности поверхности подложек предъявляются высокие требования. Сложность процессов формирования ориентирующего слоя является одной из технологических проблем, осложняющих производство ЖК-экранов и ограничивающих их размер [1].

Эту проблему можно решить за счет использования ЖК-композитов, т. е., жидких кристаллов, диспергированных в полимерной матрице. Полимерно-жидкокристаллические композиты позволяют модернизировать процесс изготовления оптоэлектронных устройств на их основе, применяя производственные технологии рулонного типа (*roll-to-roll technology*) [2, 3]. Композиты обычно представляют собой полимерные пленки с капсулированными в них ЖК каплями микронных размеров. Такие материалы сочетают в себе полезные свойства полимеров (механическую прочность, гибкость) и жидких кристаллов (анизотропию физических свойств, высокую чувствительность к внешним воздействиям).

Объектом исследований в настоящей работе являются ориентационные структуры хирально-нематического жидкого кристалла (ХЖК), диспергированного в полимерной матрице. Хиральные нематики характеризуются рядом специфических эффектов. Во-первых, это управляемое электрическим полем селективное отражение света, интенсивность и спектральные параметры которого зависят от особенностей структурного упорядочения ХЖК [4]. Во-вторых, ХЖК характеризуются способностью запоминать индуцированное электрическим полем состояние и сохранять его после выключения напряжения, что

дает возможность создания энергонезависимых оптоэлектронных устройств [5–8].

Капли холестерика в полимерной матрице имеют сложную ориентационную структуру [9]. Ряд теоретических моделей структуры в каплях холестерика предложили J. Bezic и S. Zumer. Они описали основные конфигурации ХЖК-капель с линейным радиальным дефектом, диаметральным дефектом и двойным радиальным дефектом [10].

Конфигурация директора в каплях ХЖК с линейным радиальным дефектом носит название структура Франка-Прайса или сферулитная структура. Данная структура представляет собой вложенные сферы, при этом каждая сфера повернута относительно другой на некоторый угол. Эта ориентационная структура капель является доминирующей в каплях холестериков [10].

Диаметральный дефект структуры экспериментально был исследован Y. Bouligand и F. Livolant [9], а также Куриком и Лаврентовичем [11]. В этом случае в последовательности вложенных друг в друга сфер наблюдается плавный переход ориентационной структуры от биполярной к закрученной биполярной и далее к тороидальной конфигурации. Как показывают экспериментальные исследования [11], структуры с диаметральным дефектом довольно редко наблюдаются на практике.

Кроме вышеописанных структур возможно образование структуры, обладающей двумя линейными радиальными дефектами. Линейные радиальные дефекты в капле выходят из противоположных точек на поверхности сферы и направляются к центру капли. Двойная радиальная структура хоть и была теоретически предсказана J. Bezic и S. Zumer, но экспериментально не наблюдалась [12].

Основной задачей при исследовании ЖК-композитов является выяснение взаимосвязи молекулярных характеристик исходных компонентов с макроскопическими оптическими и электрическими свойствами материала. Макроскопические свойства зависят от ряда факторов, среди которых наиболее важным является ориентационное упорядочение директора ЖК в замкнутых полостях. Конфигурация директора в каплях ЖК, в свою очередь, зависит от нескольких параметров: условий сцепления молекул ЖК и полимера на границе раздела, соотношения констант упругости жидкого кристалла, размера и формы капли.

Ранее нами был обнаружен эффект бистабильности в каплях хирального нематика с закрученной радиальной структурой, который проявлялся лишь при определенных условиях за счет допирования ЖК ионным сурфактантом [13–15]. Для выяснения физической природы эффекта и диапазона условий, при которых он может реализовываться, необходимо проведение детальных исследований особенностей структурного упорядочения используемого ХЖК в капельных дисперсиях, в том числе и без добавки ионного сурфактанта.

Целью данной работы является исследование ориентационных структур капель холестерического жидкого кристалла (ХЖК), диспергированного в полимере, задающем тангенциальное сцепление, в зависимости от шага холестерической спирали и размера занимаемой полости.

Эксперимент

В качестве полимера в настоящей работе использовался широко распространенный полимерный материал – поливинилбутираль (ПВБ) (*Sigma-Aldrich*). Данный полимер был выбран для приготовления капсулированных полимером жидкокристаллических пленок благодаря своим физико-химическим свойствам. Он обладает высокой атмосферостойкостью и светостойкостью, хорошей адгезией, механической прочностью, растворяется во многих органических растворителях, прозрачен в видимой области спектра, обеспечивает планарное сцепление с молекулами мезоморфных производных алкилцианобифенилов, обладает хорошими пленкообразующими качествами [16]. Температура стеклования ПВБ $T_c = 57^\circ\text{C}$, температура химического разложения при контакте с воздухом 160°C . Показатель преломления ПВБ $n_p = 1,492$ при $T = 22^\circ\text{C}$ ($\lambda = 0,589$ мкм). Для молекул мезоморфных производных алкилцианобифенилов ПВБ обеспечивает планарное (тангенциальное) сцепление.

Для сравнительного анализа был также использован другой полимер – поливиниловый спирт (ПВС) (*Sigma-Aldrich*). ПВС обладает высокой механической прочностью и газонепроницаемостью по отношению к водороду, кислороду, азоту, воздуху и др. газам, а также является прозрачным в видимой части спектра. Основным растворителем для ПВС является вода, при нагревании он растворяется в алифатических

гликолях, глицерине, диметилформамиде и пр. При нагревании ПВС размягчается, но не плавится при обычных условиях. Температура стеклования ПВС $T_c = 85^\circ\text{C}$, при нагревании до 140°C не разлагается, но при продолжительном нагревании до 160°C наблюдается процесс дегидратации. Показатель преломления поливинилового спирта n_p находится в диапазоне 1,49–1,53 при $T = 22^\circ\text{C}$ ($\lambda = 0,589$ мкм) [16]. Для молекул мезоморфных производных алкилцианобифенилов ПВС также обеспечивает планарное сцепление [17].

Для исследования был выбран широко известный и хорошо изученный нематический жидкий кристалл 4-*n*-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ) (Институт прикладных физических проблем, Минск, Беларусь), имеющий температуры переходов $\text{Cr} \cdot 22^\circ\text{C} \cdot \text{N} \cdot 35^\circ\text{C} \cdot \text{I}$ и положительную диэлектрическую анизотропию $\Delta\varepsilon > 0$. При $T = 22^\circ\text{C}$ ($\lambda = 0,589$ мкм) показатели преломления 5ЦБ $n_{\parallel} = 1,725$; $n_{\perp} = 1,533$ [18].

Кроме того, была апробирована широкотемпературная нематическая смесь ЛН-396 (Институт прикладных физических проблем, Минск, Беларусь), имеющая температуры переходов $\text{Cr} \cdot -22^\circ\text{C} \cdot \text{N} \cdot 66^\circ\text{C} \cdot \text{I}$ и $\Delta\varepsilon > 0$. При температуре $T = 22^\circ\text{C}$ ($\lambda = 0,589$ мкм) показатели преломления ЛН-396 $n_{\parallel} = 1,69$; $n_{\perp} = 1,52$.

Для формирования в жидком кристалле закрученной структуры в нематический жидкий кристалл добавлялся холестерилловый эфир уксусной кислоты (холестерилацетат, ХЗ) в качестве хирального компонента с варьируемым в диапазоне 1,5 ÷ 12 % (по весу) содержанием. Температура плавления холестерилацетата равна $116,5^\circ\text{C}$. Далее в тексте представлены данные для шага холестерической спирали, измеренные в чистом слое ХЖК с использованием известных методов [4].

Композитные пленки на основе жидкого кристалла и поливинилбутираля изготавливались по растворной технологии *Solvent-Induced Phase Separation* (SIPS) [3, 12]. В технологии SIPS полимер и жидкий кристалл растворяются в общем растворителе, при этом образуется гомогенная смесь. Жидкий кристалл на конечной стадии испарения общего растворителя выделяется в отдельную фазу.

Смесь ЖК и полимера в соотношении 40 % ЖК и 60 % ПВБ растворялась в этиловом спирте. Полученный гомогенный раствор выливался на поверхность стеклянной подложки.

После испарения спирта смесь становилась гетерофазной, образуя однородную по толщине композитную пленку. Изменяя технологический режим капсулирования жидкого кристалла, можно приготовить образцы с различным размером капель: чем медленнее будет испаряться растворитель, тем крупнее и однороднее по размеру получатся капли жидкого кристалла внутри пленки [3, 12].

Композитные пленки на основе жидкого кристалла и поливинилового спирта изготавливались методом эмульгирования ЖК в водном растворе полимера с последующим испарением растворителя [3, 12]. Соотношение компонентов было следующее: 5 % ЖК и 95 % ПВС. Посредством механического перемешивания или ультразвукового диспергирования разбивают ЖК на мелкие капли необходимого размера. Полученный гетерогенный раствор выливался на поверхность стеклянной подложки, после испарения воды формировалась полимерная пленка с диспергированными в ней каплями хирального нематика.

Структуры жидкого кристалла в полимерной матрице исследовались поляризационно-оптическим методом, как в геометрии скрещенных поляризаторов, так и с выключенным анализатором при помощи поляризационного микроскопа *Axio Imager.M1m, Carl Zeiss*, оснащенного видеокамерой, соединенной с компьютером.

Результаты и их обсуждение

Исследуя структуры жидкого кристалла, диспергированного в поливинилбутирале, с 1,5 % холестерилацетата (ХЗ), различным размером капель и с шагом геликоида $P = 20$ мкм, мы установили, что оптические текстуры капель холестерика могут существенно отличаться друг от друга (рис. 1). В каплях большого размера (радиусом 25–40 мкм) возможно образование двух типов сферулитной структуры: вытекшая (*escaped*) Франк-Прайс структура (рис. 1, а-в) и невытекшая (*unescaped*) Франк-Прайс конфигурация (рис. 1, е, ж). Вышеуказанные Франк-Прайс структуры ранее были теоретически предсказаны в [10] и наблюдались в работе [19]. Следует отметить, что капли большого размера легче сформировать в композитных пленках на основе поливинилбутирала, чем на основе поливинилового спирта.

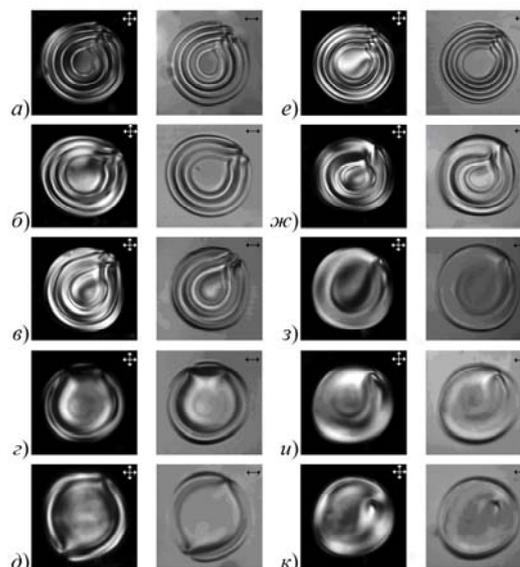


Рис. 1. Ориентационные структуры хирального жидкого кристалла в полимерной матрице. Франк-Прайс структуры в каплях $R = 36$ мкм (а), $R = 30$ мкм (б), $R = 23$ мкм (в), $R = 40$ мкм (е), $R = 25$ мкм (ж) диспергированных в поливинилбутирале. Биполярные ориентационные структуры $R = 15$ мкм (г), $R = 10$ мкм (д). Монополярные конфигурации директора $R = 20$ мкм (з), $R = 15$ мкм (и), $R = 10$ мкм (к). Слева представлены фотографии капель в геометрии скрещенных поляризаторов, справа – при выключенном анализаторе

При уменьшении радиуса капель уменьшается число концентрических полос в Франк-Прайс структуре. Так, например, представленные на рис. 1, а и рис. 1, е текстуры капель хирального нематика в пленках с усредненным по ансамблю радиусом 36 мкм имеют 4 концентрических кольца. В образцах с радиусом капель 30 мкм и 25 мкм их число уменьшается до 3 и 2, соответственно (рис. 1, б и рис. 1, в, ж).

В пленке, где $R = 15$ мкм, образуются либо структуры, в которых вместо линейной дисклинации имеются два точечных дефекта, расположенных вблизи друг друга на поверхности капли (рис. 1, г), либо монополярная конфигурация директора с одним поверхностным дефектом (рис. 1, и и рис. 2, а). При уменьшении радиуса капель до 10 мкм в биполярных структурах поверхностные дефекты удаляются друг от друга, локализуясь на диаметрально противоположных участках поверхности (рис. 1, д). В каплях такого размера также может сформироваться и монополярная структура (рис. 1, к).

Формирование биполярной конфигурации директора наблюдалось ранее в работе [19] в каплях хирального нематика, диспергированного в смеси полиэтиленгликоля и поливинилпирролидона. Возможность образования монополярной структуры была ранее предсказана в теоретической модели [10] и наблюдалась в каплях холестерика, диспергированного в изотропной жидкости [11].

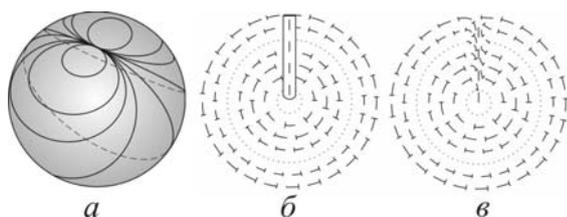


Рис. 2. Ориентационная структура монополярной капли (а), структура невытекшей (*unescaped*) Франк-Прайс конфигурации (с сингулярным дефектом) (б), структура вытекшей (*escaped*) Франк-Прайс конфигурации (с несингулярным дефектом) (в)

Невытекшая Франк-Прайс конфигурация обладает линейным дефектом с областью вырождения поля директора (т. е. сингулярным дефектом) (рис. 2, б). Вытекшая Франк-Прайс конфигурация обладает несингулярным линейным дефектом (рис. 2, в). Следует заметить, что данное отличие может объяснить причины формирования двух разных структур при уменьшении размера капель хирального нематика, диспергированного в полимерной матрице.

Исследование капель хирального нематика с различной концентрацией хиральной добавки показало, что оптические текстуры капель существенно отличаются (рис. 3–5). При этом, как описано выше, ориентационное упорядочение зависит также от размера капель. В каплях холестерика радиусом $R = 13$ мкм с концентрацией хирального компонента 1,5 % и шагом геликоида $P = 20$ мкм, диспергированного в ПВС образуются структуры, в которых не формируется линейный дефект, а реализуются два точечных дефекта, расположенных вблизи друг друга на поверхности капли (рис. 3, а). С уменьшением размера капель точечные дефекты удаляются друг от друга, локализуясь на диаметрально противоположных участках поверхности при радиусе капли менее 10 мкм (рис. 3, б, в). В каплях холестерика радиусом около 4 мкм и меньше реализуется слабо закрученная биполярная структура (рис. 3, з).

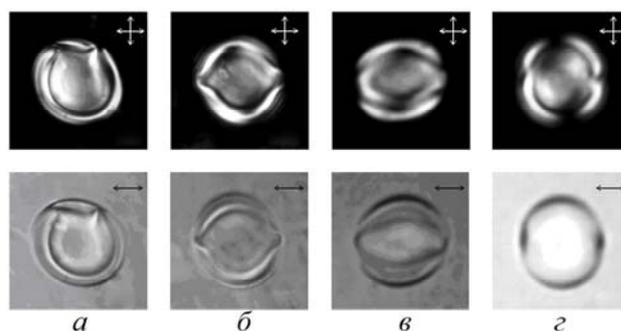


Рис. 3. Конфигурации директора холестерика в каплях различного размера при концентрации 1,5 % холестерилацетата: $R = 13$ мкм (а), $R = 9$ мкм (б), $R = 7$ мкм (в), $R = 4$ мкм (з). Сверху представлены фотографии капель в геометрии скрещенных поляризаторов, снизу – при выключенном анализаторе

При исследовании КПХЖК-пленок, допированных 4 % ХЗ, с различным размером капель и с шагом геликоида $P = 8$ мкм были выявлены аналогичные закономерности. В каплях большого размера ($R > 20$ мкм) реализуется Франк-Прайс структура, в которой четко просматриваются четыре концентрических кольца (рис. 4, а).

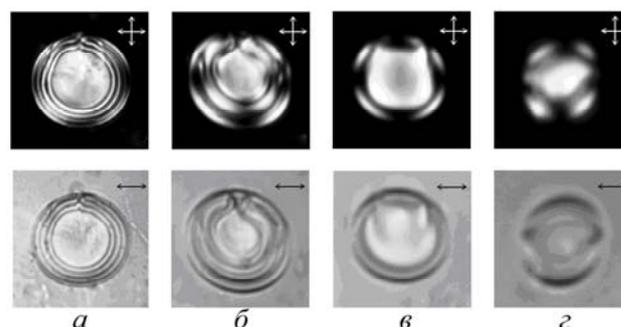


Рис. 4. Конфигурации директора холестерика в каплях различного размера при концентрации 4 % холестерилацетата: $R = 20$ мкм (а), $R = 10$ мкм (б), $R = 8$ мкм (в), $R = 4$ мкм (з). Сверху представлены фотографии капель в геометрии скрещенных поляризаторов, снизу – при выключенном анализаторе

При уменьшении радиуса капель уменьшается число концентрических полос в Франк-Прайс структуре (рис. 4, б). В каплях холестерика радиусом 8 мкм образуются структуры, в которых вместо линейного дефекта формируются два точечных дефекта, расположенных вблизи друг друга на поверхности капли (рис. 4, в). При уменьшении радиуса капель

до 4 мкм в структурах поверхностные дефекты удаляются друг от друга, локализуясь на диаметрально противоположных участках поверхности (рис. 4, *з*), но здесь биполярная структура закручена более сильно, чем в случае (рис. 3, *з*).

В каплях хирального нематика с радиусом от 4 мкм и более с концентрацией холестерической добавки ХЗ 6 % с шагом геликоида $P = 5$ мкм, 8 % с $P = 3$ мкм, 12 % с $P = 8$ мкм реализуется Франк-Прайс структура тем более явно, чем больше размер капли. При возрастании концентрации ХЗ увеличивается число концентрических полос внутри капли (рис. 5).

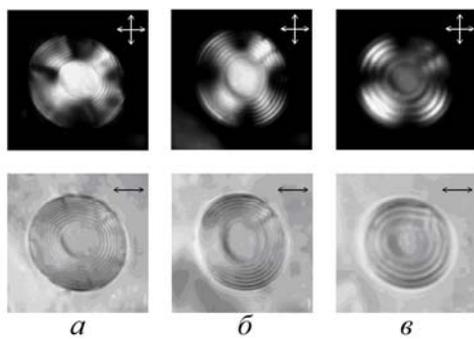


Рис. 5. Конфигурации директора в ХЖК-каплях различного размера, концентрация ХЗ 12 %: $R = 19$ мкм (*а*), $R = 9$ мкм (*б*), $R = 7$ мкм (*в*). Сверху представлены фотографии каплей в геометрии скрещенных поляризаторов, снизу – при выключенном анализаторе

Таким образом, варьируя размер капли хирального нематика диспергированного в полимерной матрице, либо меняя концентрацию холестерической добавки, можно изменять структуру жидкого кристалла внутри капли. Прослеживая изменения структуры холестерического жидкого кристалла в капле в зависимости от размера самой капли, а также в зависимости от концентрации холестерической добавки, можно установить однозначную корреляцию структуры капли ХЖК от взаимного соотношения радиуса капли (R) и шага холестерической добавки (P), который напрямую определяется из концентрации холестерического компонента.

Если радиус капли R значительно больше шага холестерической спирали P , то в капле хирального нематика реализуется Франк-Прайс

структура. Если R меньше P – в капле хирального нематика обычно формируется слабо закрученная биполярная структура, а в некоторых случаях может сформироваться монополярная структура. При соотношении $2R \approx P$ образуются симметричные структуры, характерные только для ХЖК с двумя точечными дефектами, сформировавшимися на диаметрально противоположных участках поверхности капли (рис. 3, *б*, рис. 4, *з*), характерные только для холестерических ЖК.

Выводы

Физические явления, происходящие в композитных жидкокристаллических средах очень важны и интересны не только для прикладных задач, но и для изучения фундаментальных аспектов структурной организации и специфики свойств гетерофазных материалов. Особенности структурирования таких материалов заключаются в многообразии различных типов ориентационного упорядочения (конфигураций директора) жидкого кристалла в объёмных полостях различной формы, образовании в них топологических дефектов (дисклинаций), а также в их высокой чувствительности к различным воздействиям.

Анализ изменения структуры внутри капель холестерика в зависимости от размера капли, а также от концентрации холестерической добавки, показывает, что можно установить зависимость структуры капли от соотношения радиуса капли (R) и шага холестерической спирали (P), который в свою очередь зависит от концентрации хирального компонента в нематике. Если $R \gg P$, то в капле холестерика реализуется Франк-Прайс структура. Если $R < P$ – в капле холестерика обычно формируется слабо закрученная биполярная структура, а в некоторых случаях может сформироваться монополярная структура.

Следует отметить, что при $2R \approx P$ образуются симметричные структуры с двумя точечными дефектами, сформировавшимися на диаметрально противоположных участках поверхности капли (рис. 3, *б*, рис. 4, *з*).

Автор выражает благодарность проф. Зырянову В. Я. за обсуждение результатов работы и полезные замечания. Работа выполнена частично при поддержке программ Президиума Российской академии наук.

Список литературы / References

1. Crawford G. P. Flexible flat panel display. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2005. 528 p.
2. Wong W. S., Salleo A. Elexible Electronics. New York, Springer, 2009. 462 p.
3. Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука, 1994. 214 с. [Zharkova G. M., Sonin A. S. Zhidkokristallicheskie kompozity (Liquid crystal composites). Novosibirsk: Nauka, 1994. 214 p. (in Russian)].
4. Беляков В. А., Сонин А. С. Оптика холестерических жидких кристаллов. М.: Наука, 1982. 360 с. [Belyakov V. A., Sonin A. S. Optika kholestericheskikh zhidkikh kristallov (Optics cholesteric liquid crystals). Moscow: Nauka, 1982. 360 p. (in Russian)].
5. Greubel W. Bistability behavior of texture in cholesteric liquid crystal in an electric field // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25. P. 5–7.
6. Зырянов В. Я., Сморгон С. Л., Жуйков В. А., Шабанов В. Ф. Эффекты памяти в капсулированных полимером холестерических жидких кристаллах // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59, вып. 8. С. 520–522 [Zyryanov V. Ya., Smorgon S. L., Zhuykov V. A., Shabanov V. F. Memory effects in polymer-encapsulated cholesteric liquid crystals // JETP Letters. Vol. 59, Issue 8. P. 547–550].
7. Зырянов В. Я., Сморгон С. Л., Жуйков В. А., Шабанов В. Ф. Композитный жидкокристаллический материал с оптической памятью // ПТЭ. 1994. № 5. С. 214–215 [Zyryanov V. Ya., Smorgon S. L., Zhuykov V. A., Shabanov V. F. Kompozitnyy zhidkokristallicheskiy material s opticheskoy pamyat'yu (Composite liquid crystal material with optical memory) // Experiment Instruments and Experimental Techniques. 1994. № 5. P. 214–215 (in Russian)].
8. Зырянов В. Я., Жуйков В. А., Сморгон С. Л., Шабанов В. Ф. Термооптическая запись информации в капсулированных полимером холестерических жидких кристаллах // ЖТФ. 1996. Т. 66, вып. 8. С. 99–106 [Zyryanov V. Ya., Zhuykov V. A., Smorgon S. L., Shabanov V. F. Thermo-optical recording of information in polymer-encapsulated cholesteric liquid crystals // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 1996. Vol. 41, № 8. P. 799–802].
9. Bouligand Y., Livolant F. The organization of cholesteric spherulites // J. Phys. (France). 1984. Vol. 45, № 12. P. 1899–1924.
10. Bezic J. and Zumer S. Structures of the cholesteric liquid crystal droplets with parallel surface anchoring // Liq. Cryst. 1992. Vol. 11. P. 593.
11. Курик М. В., Лаврентович О. Д. Переходы «отрицательный» – «положительный» монополю в холестерических жидких кристаллах // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 35, вып. 9. С. 362–365 [Kurik M. V., Lavrentovich O. D. Negative-positive monopole transitions in cholesteric liquid crystals // JETP Letters. 1982. Vol. 35, Iss. 9. P. 444–448].
12. Drzaic P. S. Liquid crystal dispersions. Singapore: World Scientific, 1995. 430 p.
13. Гардымова А. П., Зырянов В. Я., Лойко В. А. Мультистабильность в пленке капсулированного полимером холестерического жидкого кристалла, допированного ионным сурфактантом // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 17. С. 35–41 [Gardymova A. P., Zyryanov V. Ya., Loiko V. A. Multistability in Polymer-Dispersed Cholesteric Liquid Crystal Film Doped with Ionic Surfactant // Technical Physics Letters. 2011. Vol. 37. № 9. P. 805–808].
14. Гардымова А. П., Крахалев М. Н., Зырянов В. Я. Мультистабильный жидкокристаллический материал для оптоэлектронных устройств // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 2. С. 159–160 [Gardymova A. P., Krakhalev M. N., Zyryanov V. Ya. Mul'tistabil'nyy zhidkokristallicheskiy material dlya optoelektronnykh ustroystv (Multistable liquid crystal material for optoelectronic devices) // Pribory i tekhnika eksperimenta (Experiment Instruments and Experimental Techniques). 2011. № 2. P. 159–160 (in Russian)].
15. Гардымова А. П., Тихонов А. Я., Зырянов В. Я. Оптическая мультистабильность в композиционном материале на основе полимера, жидкого кристалла и ионного сурфактанта // Перспективные материалы. 2011. № 4. С. 32–35 [Gardymova A. P., Tikhonov A. Ya., Zyryanov V. Ya. Opticheskaya mul'tistabil'nost' v kompozitsionnom materiale na osnove polimera, zhidkogo kristalla i ionnogo surfaktanta (Optical multistability in composite materials based on polymer and liquid crystal ionic surfactant) // Perspective materials. 2011. № 4. P. 32–35 (in Russian)].
16. Николаев А. Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. Л.: Химия, 1966. 768 с. [Nikolaev A. F. Sinteticheskie polimery i plasticheskie massy na ikh osnove (Synthetic polymers and plastics on them). Leningrad: Chemistry, 1966. 768 p. (in Russian)].
17. Коньяр Ж. Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей / пер. с англ. В. И. Науменко, А. З. Абдулина. Минск, Университетское, 1986. 104 с. [Cognard J. Alignment of nematic Liquid Crystals and Their Mixtures. London, New York, Paris: Cordon and Breach Science Publishers, 1982].
18. Зырянов В. Я., Эпштейн В. Ш. Измерение показателей преломления жидкого кристалла с использованием перестраиваемого источника когерентного инфракрасного излучения // ПТЭ. 1987. № 2. С. 164–166 [Zyryanov V. Ya., Epshteyn V. Sh. Measurement of refractive indices of a liquid crystal using a tunable coherent infrared radiation source // PTE. 1987. № 2. P. 164–166].

Izmerenie pokazateley prelomleniya zhidkogo kristalla s ispol'zovaniem perestraivaemogo istochnika kogerentnogo infrakrasnogo izlucheniya (Measurement of the refractive indices of the liquid crystal using a tunable source of coherent infrared radiation) // Experiment Instruments and Experimental Techniques. 1987. № 2. P. 164–166 (in Russian)].

19. *Xu F., Crooker P. P.* Chiral nematic droplets with parallel surface anchoring // Phys. Rev. E. 1997. Vol. 56. P. 6853–6860.

Поступила в редакцию 20.03.2015 г.