

УДК 532.783

А. М. Паршин^{1,2}, В. Я. Зырянов¹, В. Ф. Шабанов¹

ЭЛЕКТРО- И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДОМЕНАХ, СФОРМИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОЛИМЕРА

¹Институт физики им. Л. В. Киренского, Красноярский научный центр, СО РАН
Академгородок, 50, 660036 Красноярск, Россия

²Сибирский Федеральный университет, пр. Свободный, 79, 660041 Красноярск, Россия
E-mail: parshin@iph.krasn.ru

С использованием электрического и магнитного полей исследовано прохождение лазерного луча через отдельный домен, а также через ансамбль доменов, сформированных поверхностью поликарбоната. Обнаружены интерференционные эффекты в зависимости от направления поляризации света относительно линии дисклинации отдельного домена. В скрещенных электрическом и магнитном полях, приложенных к ансамблю доменов, наблюдалось исчезновение интерференционных экстремумов при увеличении магнитного поля. Полученные результаты объяснены в рамках градиентной оптики. Проведено сравнение магнитной и электрической длин когерентности с длиной когерентности домена.

Ключевые слова: жидкий кристалл, полимер, доменная структура, показатель преломления, интерференция, электрическое поле, магнитное поле.

DOI: 10.18083/LCAppl.2016.3.49

A. M. Parshin^{1,2}, V. Ya. Zyryanov¹, V. F. Shabanov¹

ELECTRO- AND MAGNETOOPTIC EFFECTS IN LIQUID CRYSTAL DOMAINS FORMED BY POLYMER SURFACE

¹Kirensky Institute of Physics, Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

²Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660041, Russia
E-mail: parshin@iph.krasn.ru

The optical transmission of a monochromatic laser beam passing through an individual domain of a nematic liquid crystal as well as through the ensemble of domains formed by the polycarbonate surface with the use of electric and magnetic fields is studied. Interference effects depending on the direction of polarization of light relative to the disclination line of a separate domain are observed. In the crossed electric and magnetic fields applied to the domain ensemble, the disappearance of the interference extrema are observed with increasing of magnetic field. The results are explained in terms of gradient optics. Comparison of magnetic and electrical coherence length with the coherence length of the domain is performed.

Key words: liquid crystal, polymer, domain structure, refractive index, interference, electric field, magnetic field.

Введение

В исследованиях и в электрооптических устройствах, включая дисплеи, находят широкое применение однородные планарные, гомеотропные или закрученные слои нематических жидких кристаллов (ЖК), а также дисперсии нематиков, заключенных в капсулах, порах и других ограниченных объемах. Самым распространенным методом оптического зондирования однородных слоев является анализ двулучепреломления, при этом ЖК-слой в плоскопараллельной ячейке помещается между поляризатором и анализатором. Первый из элементов поляризует свет, а второй анализирует интегральную по толщине нематического слоя величину разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами. Оптическое пропускание ЖК-ячеек существенным образом зависит от прикладываемых к ним электрических или магнитных полей, которые изменяют преимущественную ориентацию молекул нематиков. Кривые оптического пропускания как функции поля характеризуются пороговыми полями Фредерикса, интерференционными экстремумами, экспоненциальным характером в области насыщения [1].

В дисперсиях ЖК изменение оптического пропускания можно наблюдать без использования анализатора. Оптические характеристики таких объектов обычно рассматриваются в рамках теории рассеяния света малыми частицами [2], при использовании которой необходимо учитывать показатели преломления ЖК и окружающей его однородной среды. Так, при исследовании ЖК-капель, капсулированных в полимерной матрице (КПЖК), диаметром $d \sim 1\text{--}10$ мкм [3, 4] в рамках данной теории, в приближении Рэлей-Ганса и приближении аномальной дифракции, были описаны некоторые результаты изменения оптического пропускания под действием электрического или магнитного полей. Дальнейшие исследования [5–8] показали, что механизм рассеяния в приближении аномальной дифракции остается пригодным для описания распространения света через КПЖК-пленки с размером капель вплоть до $d \sim 25$ мкм. Оптическое пропускание света, прошедшего через КПЖК-пленку с однослойным расположением капель, во внешнем электрическом поле в большинстве

случаев сопровождается интерференционными осцилляциями и описывается параметрами, зависящими от размера, формы и внутренней структуры капель, а также от показателей преломления ЖК и полимера.

Недавно нами были обнаружены и исследованы домены нематических ЖК с радиально-планарной структурой, вырастающие на поверхности поликарбоната (ПК) при использовании растворной технологии [9–12]. Пропускание поляризованного света в доменных ансамблях показывает существенные изменения в электрических или магнитных полях и сопровождается еще более глубокими интерференционными экстремумами, чем в КПЖК-пленках. Однако домены имеют размеры $d \sim 50\text{--}200$ мкм и плотную упаковку на поверхности ПК, что затрудняет рассматривать характеристики света, прошедшего через их ансамбли, в рамках теории рассеяния малыми частицами [2]. Чтобы выявить особенности распространения света в таких объектах, в данной статье исследуется оптическое пропускание монохроматического лазерного луча, прошедшего через отдельный домен, а также луча, распространяющегося через ансамбль доменов, с использованием скрещенных электрических и магнитных полей.

Эксперимент

Для исследований изготавливались ЖК-ячейки с двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами с ИТО электродными покрытиями. Верхняя пластина промывалась в кипящих ацетоне и гексане, а на нижнюю центрифугированием наносилась пленка 2 %-го раствора ПК в дихлорметане. Две тефлоновые прокладки толщиной 30 мкм обеспечивали зазор в ячейке.

Для исследования оптического пропускания одного домена ячейка помещалась в поляризационно-оптическую установку (рис. 1) на регулируемую платформу. Установка позволяла пропускать через ячейку белый свет или монохроматическое лазерное излучение. Белый свет от галогеновой лампы проходил через поляризатор, полупрозрачную пластинку, собирающую линзу, образец, объектив и, отклонившись призмой, через окуляр попадал в цифровую камеру. Такой же путь проходил ослабленный светофильтром луч He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 633$ нм, отражаясь от полупрозрачной пластинки.

Линза устанавливалась таким образом, чтобы ее фокусное расстояние $f = 3$ см совпадало с центром ячейки. Фокусное расстояние и распределение интенсивности в сечении лазерного луча определялось в дополнительном эксперименте с использованием специализированной установки. Нематический ЖК 4-*n*-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ) вводился в зазор между пластинами ячейки при температуре 24 °С. При таком заполнении ячейки в ней можно было выбрать области с однородной планарной или наклонной ориентацией директора \mathbf{n} , обусловленной потоком. Через несколько секунд в пределах выбранной области на поверхности ПК начинали появляться и расти ЖК-домены круглой формы с проходящими через их

центры вдоль диаметров линиями дисклинаций, перпендикулярными \mathbf{n} [9–12]. Через 1–2 мин. ячейка перемещалась на платформе так, чтобы отдельный домен оказывался на пути лазерного луча. Поляризатор устанавливался так, чтобы вектор поляризации световой волны \mathbf{e} был параллелен или перпендикулярен \mathbf{n} . Затем призма и анализатор выводились из оптического тракта, источник белого света выключался и с помощью фотодиода, перед которым устанавливалась диафрагма диаметром 3 мм, детектировалась интенсивность прямо проходящего лазерного луча. Через 10 мин., когда выросшие домены покрывали всю площадь образца, к ячейке прикладывалось электрическое напряжение с частотой 1 кГц.

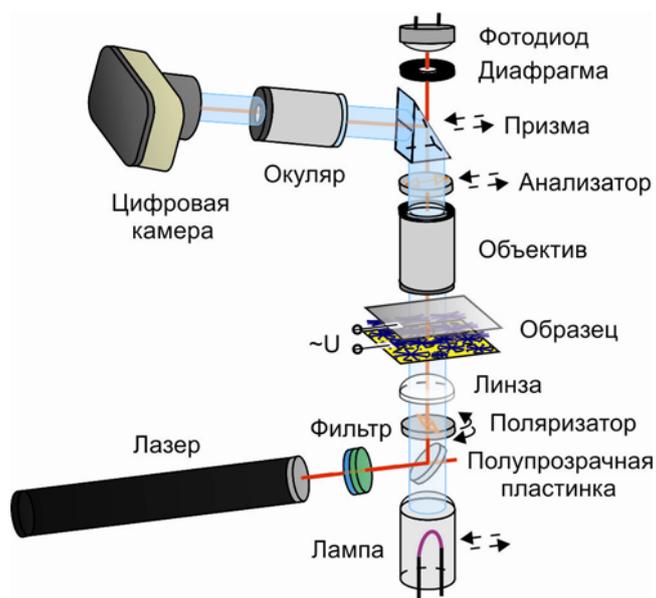


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения пропускания света, проходящего через нематический домен, сформированный пленкой поликарбоната

Для исследования оптического пропускания ансамбля доменов с использованием скрещенных электрического E и магнитного H полей ячейка с ансамблем доменов помещалась в зазор величиной 10 мм между полюсами электромагнита так, чтобы силовые линии H были расположены вдоль ее подложек. Луч He-Ne лазера в отсутствие анализатора пропускался через ячейку перпендикулярно ЖК-слою. Магнитное поле варьировалось в диапазоне $H = 0 - 27$ кЭ. При различных значениях H электрическое напряжение, пода-

ваемое на электроды ячейки, возрастало со скоростью 4 В/мин. в диапазоне $U = 0 - 80$ В.

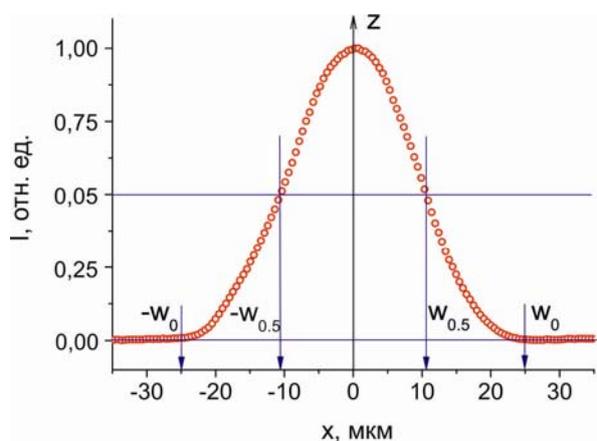
Результаты и обсуждение

На рис. 2, а представлено распределение интенсивности лазерного луча в его поперечном сечении, расположенном в фокусе линзы, в зависимости от расстояния x от центра. Из графика видно, что луч имеет Гауссово распределение, а его перетяжка составляет $w_0 \cong 25$ мкм.

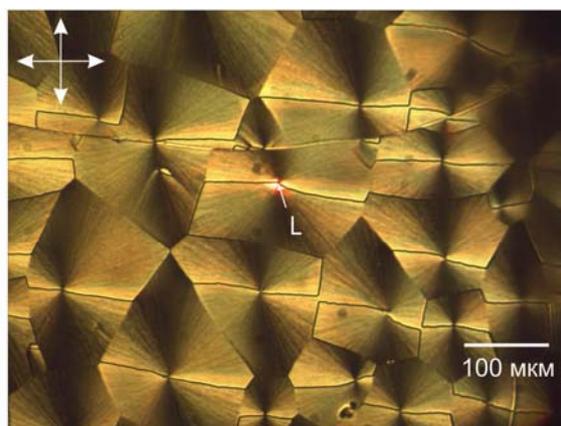
На рис. 2, б представлена микрофотография ансамбля доменов, сформированных поверхностью ПК в ЖК-ячейке, на которой видно пятно лазерного луча L , проходящего через центр отдельного домена.

При зондировании одного домена наблюдалось два типа зависимостей оптического пропускания T от времени роста домена t и электрического напряжения U (рис. 3). Если вектор поляризации света e устанавливался параллельно директору нематика n , то в течение $t \cong 10$ мин. пропускание возрастало на несколько процентов. При приложении напряжения к ячейке

после формирования структуры оптическое пропускание домена после $U > 1,2$ В вначале осциллировало на участке $0 < U < 4$ В, а затем при $U > 4$ В экспоненциально снижалось до значения $T \cong 75$ %, близкого к пропусканию первоначального однородного слоя ЖК (верхняя часть рис. 3). В случае расположения вектора e перпендикулярно n пропускание T убывало в течение роста домена, а затем в электрическом поле после интерференционных колебаний экспоненциально возрастало до первоначального значения T (нижняя часть рис. 3).



а



б

Рис. 2. Характеристики луча He-Ne лазера и его распространение через ЖК домены: а – распределение интенсивности I по радиусу в сечении луча, x – расстояние вдоль радиуса от центра луча; w_0 , $w_{0.5}$ – перетяжка при $I = 0$ и $I = 50$ % от максимального значения I соответственно; б – микрофотография доменов 5ЦБ, сформированных поверхностью ПК, L – пятно луча, проходящего через отдельный домен

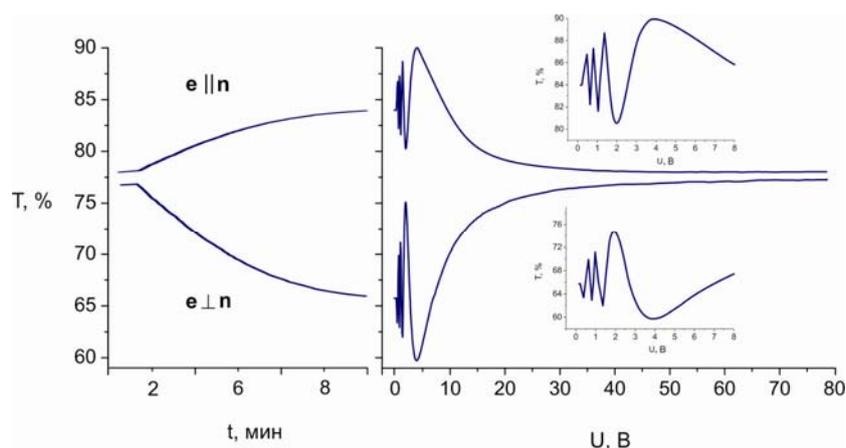


Рис. 3. Режимы изменения оптического пропускания T домена 5ЦБ, сформированного поверхностью ПК, от времени t (слева), а также от электрического напряжения U , приложенного к домену (справа): верхняя часть – вектор поляризации e параллелен директору нематика n , нижняя часть – e и n перпендикулярны. Увеличенные начальные участки зависимостей $T(U)$ представлены во вставках

В эксперименте с использованием скрещенных электрического и магнитного полей наблюдалось последовательное уменьшение числа и амплитуды интерференционных экстремумов с увеличением H (рис. 4). Из зависимости $T(U)$ видно, что первые два экстремума исчезают при достаточно слабых полях $H \cong 3$ кЭ, а последний минимум сохраняется вплоть до $H \cong 27$ кЭ. При этом следует отметить существенное увеличение

амплитуды осцилляций T при зондировании ансамбля доменов по сравнению с зондированием одного домена. Это увеличение обусловливается за счет увеличения амплитуды осцилляций нижней кривой и уменьшения для верхней кривой (рис. 3). При $H > 27$ кЭ зависимость $T(U)$ сначала резко увеличивается от $T \cong 53$ % при пороговом значении $U \cong 12,7$ В, а затем монотонно приближается к значению $T \cong 90$ % на участке $U > 80$ В.

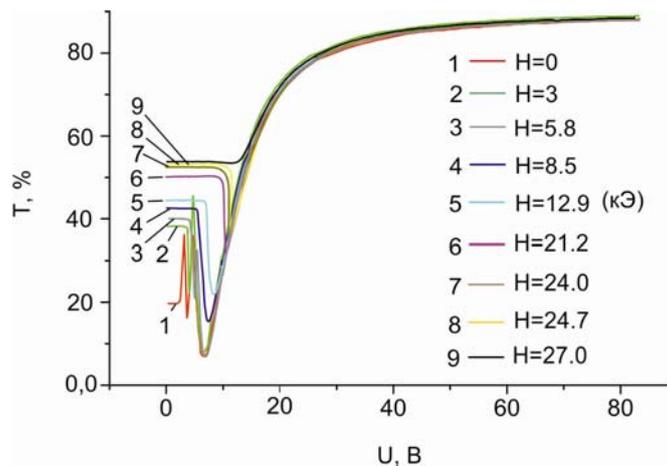


Рис. 4. Зависимости оптического пропускания ансамбля доменов 5ЦБ, сформированных поверхностью ПК, от электрического напряжения U , приложенного к ансамблю, при фиксированных значениях (1–9) магнитного поля H , направленного в плоскости ПК пленки. Поляризация света $e \perp n$

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Как было показано нами ранее [9–12], конфигурация поля директора ЖК в домене (рис. 5, а, б) возникает в результате конкурирующего влияния трех факторов. Радиальная конфигурация директора нематика, формирующаяся из зародыша на пленке ПК, распространяется в объем домена. В этот же объем передается однородная планарная ориентация от поверхностной линии дисклинации, проходящей через центр радиальной структуры (рис. 5, а).

Длину когерентности ξ (расстояние от поверхности ПК пленки, на котором радиальная конфигурация переходит в планарную ориентацию) можно найти из выражения [12]:

$$\xi = \sqrt{\frac{\pi(\pi-3)+12}{24\pi \ln\left(\frac{2r}{b}\right)}} r, \quad (1)$$

где r – радиус домена; b – ширина поверхностной линии дисклинации.

Домены в данном случае имеют текстуру с двумя полосами погасания (рис. 2, б), в которую превращается текстура с четырьмя полосами погасания при наложении на радиальную структуру планарного слоя ЖК. Ориентация директора ЖК от верхней границы ячейки также распространяется в объем домена. При толщине ячейки $d > \xi$ текстура с двумя полосами погасания сохраняется даже в том случае, если верхняя пластина в ЖК-ячейке обработана так, чтобы формировалась наклонная или гомеотропная ориентация директора нематика. То есть при $d > \xi$ влияние радиальной конфигурации ПК пленки и однородной ориентации от поверхностной линии дисклинации существенно превышает влияние внешней ограничивающей поверхности. Однако на расстоянии ξ , на котором аннулируется радиальная структура, должен оставаться наклон молекул ЖК при их наклонной или гомеотропной ориентации на верхней границе домена.

Такую конфигурацию поля директора ЖК в домене будем условно называть «псевдо-планарной» ориентацией (рис. 5, *б*), к которой, как мы полагаем, приводит выбранный нами способ обработки верхней пластины ЖК-ячейки. Кроме того, вклад в наклонную ориентацию должна давать узкая ~ 2 мкм стенка, исходящая от поверхностной линии дисклинации в объем домена. Электрическое

поле, прикладываемое перпендикулярно подложкам, стремится ориентировать гомеотропно директор нематика в объеме домена, создавая вырожденную гибридно-упорядоченную нематическую структуру [13] с текстурой, имеющей четыре ветви погасания. Магнитное поле, прикладываемое вдоль пластин ячейки, способствует развитию планарной ориентации от центров доменов к их границам.

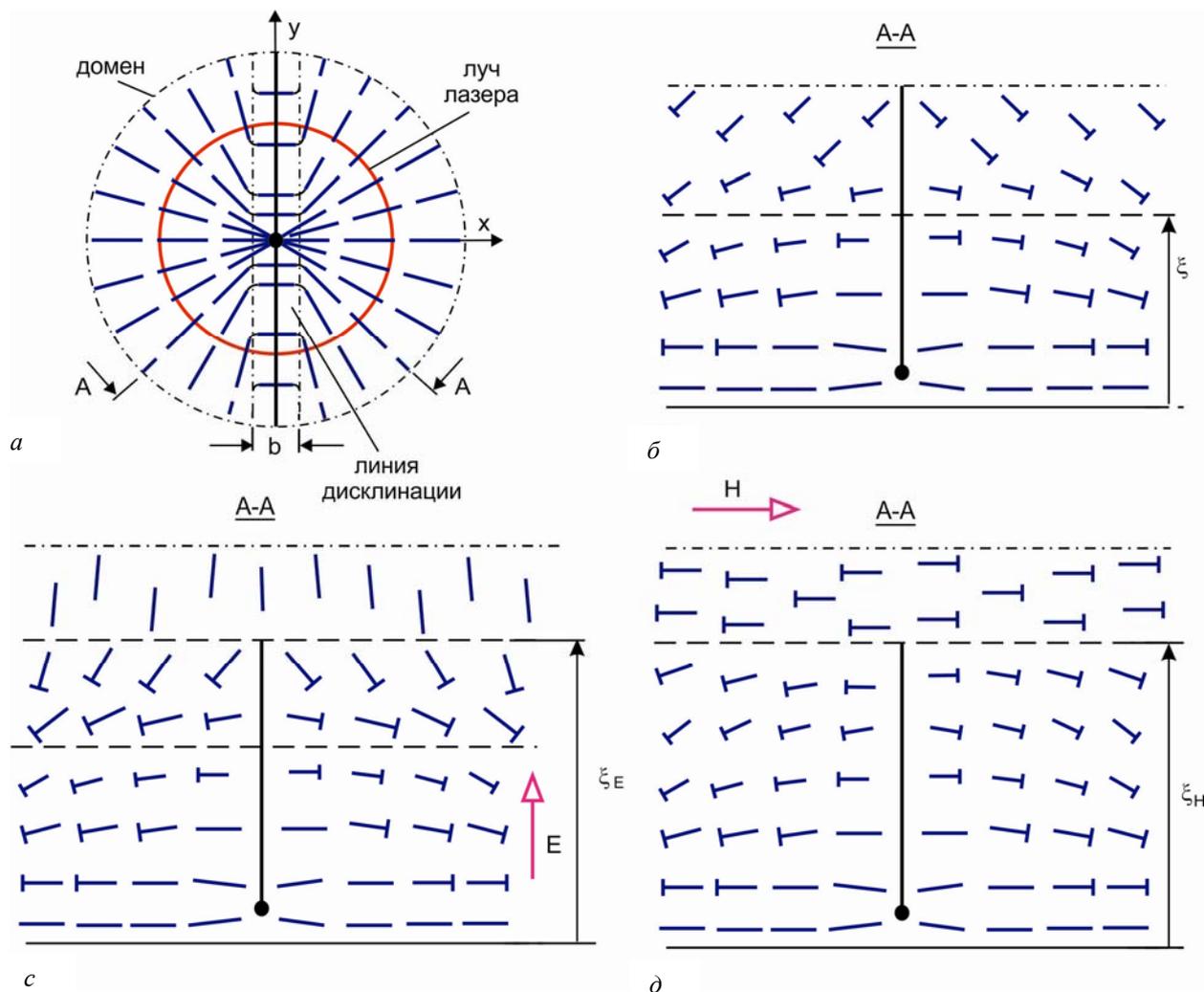


Рис. 5. Распределение поля директора ЖК в домене, сформированном поверхностью ПК:

a – в плоскости xy на расстоянии $z > \xi$ от поверхности ПК пленки; *б–д* – в сечении A-A без воздействия внешнего поля (*б*), в присутствии электрического поля E (*с*), при приложении скрещенных электрического E и магнитного H полей (*д*)

Поскольку формирование ЖК-структуры начинается от центра домена и от поверхностной линии дисклинации, то можно предположить, что вдоль радиального направления ρ в плоскости $z\rho$ возникает неоднородное распределение поля директора. Этому способствует тот факт, что в нашем случае ЖК ограничен лишь верхней и нижней подложками, а не со всех сторон, как в КПЖК-пленках [3–8]. Показатель преломления n_e необыкновенного луча света, проходящего через домен вдоль оси z , должен зависеть от угла ориентации директора \mathbf{n} относительно z . Он будет стремиться к показателю преломления n_{\parallel} или n_{\perp} однородного слоя ЖК вблизи поверхностной линии дисклинации в зависимости от направления вектора поляризации \mathbf{e} относительно директора \mathbf{n} . Неоднородное распределение показателей преломления луча света в плоскости xu может привести к эффекту градиентной линзы [14, 15]. Поскольку лучи в такой линзе отклоняются в сторону большего показателя преломления, при $\mathbf{e} \parallel \mathbf{n}$ линза будет собирающей, а при $\mathbf{e} \perp \mathbf{n}$ рассеивающей. Это объясняет изменения оптического пропускания T , наблюдаемые в процессе роста доменов за время t (рис. 3), которые соответствуют суммарному отклоняющему эффекту, накопленному при прохождении лазерного луча по толщине нематического слоя.

Изменение угла ориентации директора \mathbf{n} относительно z в электрическом поле сопровождается стремлением показателя преломления для необыкновенного луча n_e к показателю преломления обыкновенного луча n_o при переходе слоя ЖК к гомеотропной ориентации. На выходе из ЖК-слоя необыкновенный и обыкновенный лучи, прошедшие через соседние участки домена, имеют разность фаз, в результате которой возникает интерференция. При этом разность фаз будет набираться в основном на расстоянии ξ . На участке $z > \xi$ показатели преломления при ориентации в сильном электрическом или магнитном поле выравниваются, что приводит к исчезновению интерференционных осцилляций (рис. 3, рис. 4). Таким образом, разность фаз между n_e и n_o определится интегрированием по когерентной длине ξ :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{\xi} [n_e(x, y, z) - n_o] dz \approx \frac{2\pi}{\lambda} \langle [n_e(x, y, z) - n_o] \rangle \xi, \quad (2)$$

где

$$n_e = \frac{n_{\parallel} n_{\perp}}{(n_{\parallel}^2 \sin^2 \theta(x, y, z) + n_{\perp}^2 \cos^2 \theta(x, y, z))^{1/2}}, \quad (3)$$

где θ – угол отклонения директора нематика от ограничивающих поверхностей; n_{\parallel} , n_{\perp} – предельные значения n_e , соответствующие однородной планарной или гомеотропной ориентации ЖК.

Максимальное число экстремумов на зависимостях $T(U)$ на рис. 3 и рис. 4 равно $N = (n_e - n_{\perp}) \xi / \lambda$, $N \approx 3,5$. Подставив значения $\lambda = 0,633$, $r = 85$ мкм (рис. 2), $b = 10$ мкм [9–12], а также значения показателей преломления для 5ЦБ при температуре 24 °С $n_{\parallel} = 1,7081$, $n_{\perp} = 1,5276$ [16], получим среднее значение угла $\langle \theta \rangle \approx \pi/4$.

Поскольку зависимости $T(U)$ для ансамбля доменов и для одного домена подобны, можно предположить, что изменение оптического пропускания ансамбля обусловлено суммарными эффектами градиентных линз отдельных доменов, если пренебречь рассеянием на их границах. Такое суммирование приводит к расширению диапазона T на рис. 3 и 4.

Магнитное поле H , прикладываемое в плоскости пластин ячейки, способствует созданию однородной планарной ориентации в объеме нематического слоя на магнитной длине когерентности $\xi_H = (K/\Delta\chi)^{1/2}/H$ [17], где K – модуль упругости в одноконстантном приближении, $\Delta\chi$ – анизотропия магнитной восприимчивости. Вследствие обратной зависимости $\xi_H(H)$ с увеличением поля при малых значениях H величина ξ_H быстро уменьшается. Так, уже в поле $H = 1$ кЭ при $K = 6 \times 10^{-7}$ дин, $\Delta\chi = 1,18$ [11] она имеет величину $\xi_H = 22,5$ мкм, близкую к значению $\xi \approx 24,5$ мкм, полученному из выражения (1). Это соответствует быстрому исчезновению первых двух экстремумов, которые обусловлены началом трансформации структуры ЖК в электрическом поле E в центре ячейки. При значении $H > 27$ кЭ кривая $T(U)$ на рис. 4 аналогична классическим пороговым зависимостям перехода Фредерикса, полученным для тонких планарных нематических слоев при малых толщинах с применением скрещенных поляризаторов [18]. Действительно, значение $H = 27$ кЭ соответствует очень малой величине $\xi_H = 0,8$ мкм, сравнимой с длиной волны света $\lambda = 0,633$ мкм.

Заключение

Радиально-планарные домены, сформированные в процессе роста на поверхности поликарбоната [9–12], имеют размеры $d \sim 50\text{--}200$ мкм и плотную упаковку на поверхности поликарбоната. Чтобы выявить особенности распространения света в таких объектах, в данной статье исследовалось оптическое пропускание монохроматического лазерного луча, прошедшего через отдельный домен нематика 5ЦБ, а также луча, распространяющегося через ансамбль доменов с использованием скрещенных электрического и магнитного полей. Экспериментально было установлено, что оптическое пропускание T как функция электрического напряжения U зависит от направления поляризации света e относительно директора нематика n планарного слоя домена. При $e \parallel n$ в течение роста домена T сначала возрастало, а затем при прохождении лазерного луча через сформированный домен под действием U осциллировало и снижалось до первоначального значения. В случае $e \perp n$ зависимости $T(U)$ получались обратные. В эксперименте с использованием скрещенных электрического и магнитного полей наблюдалось последовательное исчезновение интерференционных экстремумов с увеличением магнитного поля. Полученные зависимости удалось объяснить, рассматривая домен в виде градиентной линзы с суммарным отклоняющим эффектом, накапливающимся на когерентной длине ξ при прохождении лазерного луча через домен. Интерференционные колебания на зависимостях $T(U)$ обуславливались разностью фаз между необыкновенным и обыкновенным лучами, прошедшими через соседние участки домена.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-02-06924 и № 16-53-00073), а также за счет проектов СО РАН через комплексные программы № П.2Р 0358-2015-0011 и № 0358-2015-0010.

Список литературы / References

1. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М. : Наука, 1978. 384 с. [*Blinov L.M. Electro- and magneto-optic of liquid crystals. Moscow : Nauka, 1978, 384 p. (in Russ.)*].
2. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами: пер. с англ. Т. В. Водопьяновой; под

ред. В. В. Соболева. М. : Иностранная литература, 1961. 536 с. [*Van de Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. New York : Wiley, 1957, 460 p.*].

3. Zumer S., Doane J.W. Light scattering from a small nematic droplet. *Phys. Rev. A*, 1986, **34**, 3373–3386.
4. Zumer S. Light scattering from nematic droplet: Anomalous-diffraction approach. *Phys. Rev. A*, 1988, **37**, 4006–4015.
5. Конколович А. В., Пресняков В. В., Зырянов В. Я., Лойко В. А., Шабанов В. Ф. Интерференционное гашение света, проходящего через монослойную пленку капсулированных полимером нематических жидких кристаллов // *Письма в ЖЭТФ*. 2000. Т. 71, вып. 12. С. 710–713 [*Konkolovich A.V., Loiko V.A., Presnyakov V.V., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Interference quenching of light transmitted through a monolayer film of polymer-dispersed nematic liquid crystal. JETP Letters, 2000, 71 (12), 486–488*].
6. Barannik A.V., Shabanov V.F., Zyryanov V.Ya., Lapanik V.I., Bezborodov V.S. Interference and ion effects in the electro-optical response of PDNLC film. *J. SID*, 2005, **13/4**, 1–7.
7. Прищепа О. О., Шабанов А. В., Зырянов В. Я., Паршин А. М., Назаров В. Г. Пороговое поле Фредерикса в биполярных каплях нематика с сильным поверхностным сцеплением // *Письма в ЖЭТФ*. 2006. Т. 84, вып. 11. С. 723–728 [*Prishchepa O.O., Shabanov A.V., Zyryanov V.Ya., Parshin A.M., Nazarov V.G. Friedericksz threshold field in bipolar nematic with strong surface anchoring. JETP Letters, 2006, 84 (11), 607–612*].
8. Prishchepa O.O., Parshin A.M., Shabanov A.V., Zyryanov V.Ya. Magneto-optical study of Friedericksz threshold in polymer dispersed nematic liquid crystals. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2008, **488**, 309–316.
9. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Доменные структуры нематиков на поверхности полимера // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2012. Вып. 1. С. 42–51 [*Parshin A.M., Gunyakov V.A., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Nematic domain structures on polymer surface. Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2012, 1, 42–51 (in Russ.)].
10. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Физико-химическое взаимодействие нематиков с поверхностью полимера // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2012. Вып. 2. С. 51–59 [*Parshin A.M., Gunyakov V.A., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Physico-chemical interaction of nematics with polymer surface. Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2012, 2, 51–59 (in Russ.)].

11. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Ориентационные переходы в электрическом и магнитном поле в двухслойных структурах нематика, индуцированных поверхностью полимера // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2013. Вып. 2. С. 26–36 [Parshin A.M., Gunyakov V.A., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Orientational transitions in electric or magnetic field in two-layer nematic structures induced by polymer surface. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2013, 2, 26–36 (in Russ.)].
12. Паршин А. М., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Конфигурации директора в структурах нематика, адсорбированного на поверхности полимера // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2015. Вып. 1. С. 56–65 [Parshin A.M., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Nematic director configurations in the structures, adsorbed on the polymer surface. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, 1, 56–65 (in Russ.)].
13. Lavrentovich O.D., Nastishin Yu.A. Defects in degenerate hybrid aligned nematic liquid crystals. *Europhys. Lett.*, 1990, **12**, 135–141.
14. Asatryan K., Presnyakov V., Tork A., Zohrabyan A., Bagramyan A., Galstyan T. Optical lens with electrically focus using an optically hidden dielectric structure. *Opt. Express*. 2010, **18**, 13981–13991.
15. Sova O., Reshetnyak V., Galstian T., Asatryan K. Electrically variable liquid crystal lens based on the dielectric dividing principle. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2015, **32**, 803–808.
16. Bunning J.B., Grellin D.A., Faber T.F. The effect of molecular biaxiality on the bulk properties of some nematic liquid crystals. *Liq. Cryst.*, 1986, **1**, 37–51.
17. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М. : Мир, 1977. 400 с. [de Gennes P.G. *The Physics of Liquid Crystals*. Oxford : Clarendon Press; 1974, 360 p.].
18. Podoprigora V.G., Gunyakov V.A., Parshin A.M., Khrustalev B.P., Shabanov V.F. Liquid crystals on the solid state surface – the determination of anchoring energy under an applied magnetic field. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1991, **209**, 117–121.

Поступила в редакцию 27.07.2016 г
Received 27 July 2016