

Научная статья
УДК 532.783

СТРУКТУРНЫЕ, МАГНИТНЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ В САМООРГАНИЗОВАННЫХ АНСАМБЛЯХ НЕМАТИЧЕСКИХ ДОМЕНОВ

Александр Михайлович Паршин*

*Институт физики им. Л. В. Киренского, Федеральный исследовательский центр «Красноярский
научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия
Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия*

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 14.04.2023

Одобрена 15.05.2023

Принята 22.05.2023

Ключевые слова:

нематик,
поликарбонат,
магнитное поле,
электрическое поле,
интенсивность света

АННОТАЦИЯ

Исследованы структурные, магнито- и электрооптические свойства самоорганизованного ансамбля нематических доменов, сформированных на пленке поликарбоната в присутствии остаточного растворителя. Пленка наносилась на одну из плоскопараллельных стеклянных пластин жидкокристаллической ячейки. Магнитное поле, стабилизирующее планарную ориентацию жидкого кристалла, прикладывалось параллельно, а переориентирующее электрическое поле направлялось перпендикулярно поверхностям ячейки. Получены зависимости интенсивности прошедшего через доменный ансамбль света от электрического напряжения при различных фиксированных значениях магнитного поля. Проведено сравнение экспериментальных зависимостей с расчетными, определенными с использованием процедуры минимизации свободной энергии жидкого кристалла, с хорошим совпадением результатов. Из сопоставления структурной, магнитной и электрической длин когерентностей оценено взаимное влияние структурных элементов ансамбля и эффекты фазовой модуляции света.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.2.71

Для цитирования:

Паршин А. М. Структурные, магнитные, электрические и оптические когерентности в самоорганизованных ансамблях нематических доменов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 2. С. 71–80.

*Адрес для переписки: parshin@iph.krasn.ru

© Паршин А. М., 2023

Research Article**STRUCTURAL, MAGNETIC, ELECTRIC AND OPTICAL COHERENCES
IN SELF-ORGANIZED ENSEMBLES OF NEMATIC DOMAINS**

Alexander M. Parshin*

*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

ARTICLE INFO:**Article history:**

Received 14 April 2023

Approved 15 May 2023

Accepted 22 May 2023

Key words:

nematic,
polycarbonate,
magnetic field,
electric field,
light intensity

ABSTRACT

Structural, magneto- and electro-optical properties of a self-organized ensemble of nematic domains (SEND) formed on a polycarbonate film in the presence of a residual solvent have been studied. The film was deposited on one of the plane-parallel glass plates of a liquid-crystal cell. The magnetic field stabilizing the planar orientation of the liquid crystal was applied in parallel, while the reorienting electric field was directed perpendicular to the cell surfaces. The dependences of the intensity of light transmitted through the domain ensemble on the electric voltage are obtained for various fixed values of the magnetic field. The experimental dependences are compared with the calculated ones determined using the procedure for minimizing the free energy of the liquid crystal, with good agreement between the results. From a comparison of the structural, magnetic, and electrical coherence lengths, the mutual influence of the structural elements of the ensemble and the effects of phase modulation of light are estimated.

DOI:**10.18083/LCAppl.2023.2.71**

For citation:

Parshin A.M. Structural, magnetic, electric, and optical coherences in self-organized ensembles of nematic domains. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (2), 71–80 (in Russ.).

*Corresponding author: parshin@iph.krasn.ru

© Parshin A.M., 2023

Введение

Самоорганизующиеся структуры жидких кристаллов (ЖК) в настоящее время активно исследуются и находят практическое применение [1]. Формированию структур способствует тенденция ЖК к молекулярному упорядочению. Даже в отсутствие специфического взаимодействия с твердыми поверхностями нематические ЖК формируют характерные ориентационные структуры, наблюдаемые в поляризационный микроскоп как нитевидные или шпирен-текстуры [2, 3]. Более сложные структуры нематиков образуются в замкнутых цилиндрических или сферических объемах [3], например, в каплях ЖК, диспергированных в полимерах (polymer dispersed liquid crystals, *PDLC*) [4, 5]. Под влиянием магнитного [6, 7] или электрического [4] поля, прикладываемого к *PDLC*, можно эффективно изменять светорассеяние и возбуждать фазовую модуляцию света без применения поляризаторов, что широко используется в системах отображения информации [4]. Существенное внимание в исследовательском и прикладном аспектах отводится также нематикам в плоскопараллельных ячейках с поверхностями, покрытыми светоактивным веществом, например, азокрасителями, в виде монослоя или полимерной пленки [8]. Облучение покрытия светом приводит к гомеотропно-планарному переходу или к изменению структуры ЖК. При изучении данных процессов необходимо учитывать конкуренцию между *транс*- и *цис*-конфигурациями ориентанта [9], корреляцию между поверхностной и объемной ориентациями [10], влияние молекулярной структуры ЖК на процесс фотоупорядочения [11]. Конкурирующие факторы способствуют формированию паттернов [12, 13], которые искусственно можно создать на локальных участках ЖК-ячейки с помощью поляризованного света [10, 14, 15] или варьируемого по амплитуде электрического поля [16]. Паттерны являются привлекательным материалом из-за большого разнообразия дифракционных и интерференционных эффектов [11].

Недавно нами были обнаружены и фрагментарно исследованы самоорганизующиеся паттерны нематических ЖК на поверхности поликарбоната (ПК) [17–26]. Такие паттерны возникают спонтанно в процессе роста на границе ЖК-полимер в присутствии остаточного растворителя. С течением времени в слое ЖК возникает самоорганизованный ансамбль нематических доменов (САНД) с

линиями дисклинации (ЛД). Как показали исследования, самоорганизация обусловлена физико-химическим взаимодействием молекул ЖК с цепями ПК [17, 19, 21, 22] при конкурирующем влиянии планарной радиальной (ПР) структуры и ЛД на когерентной длине ξ . В электрическом или магнитном поле в ячейках с САНД наблюдались интерференционные колебания со значительно большей амплитудой, чем в *PDLC*, а также эффекты светорассеяния [18, 21]. Электро- и магнитооптические исследования САНД с хорошим совпадением расчетных и экспериментальных результатов были проведены в работах [23, 24] с использованием магнитной ξ_H или электрической ξ_E длин когерентности в одноконстантном приближении [27]. Однако сопоставление ξ , ξ_H и ξ_E с анализом конкурирующего влияния ПР и ЛД на структуру и оптические свойства САНД с использованием магнитного поля [28], стабилизирующего планарную ориентацию, не проводилось.

Целью данной работы является исследование структурных и оптических характеристик САНД с использованием стабилизирующего магнитного и переориентирующего электрического полей. Исследование предполагает получение и сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей светопропускания от магнитного и электрического полей с сопоставлением структурных, магнитных и электрических длин когерентности.

Теоретическая часть

Рассмотрим кратко формирование структуры САНД. На пленке ПК в присутствии остаточного растворителя спонтанно возникают зародыши, из которых растут дискообразные структуры нематиков. Диаметры дисков равномерно увеличиваются в течение 2÷20 минут, в зависимости от условий приготовления [21], и в объемном слое ЖК формируется плотноупакованный ансамбль доменов с текстурой, представленной на рис. 1, *a*. Из центров к краям доменов по разные стороны вдоль радиусов исходят ЛД [29]. Границы доменов, которые в процессе роста соприкасаются и обрезают друг друга, очерчивают паттерны (рис. 1, *a*, *b*), хорошо поддающиеся описанию с помощью алгоритма инверсной тесселяции Вороного [13]. Конфигурация ансамбля доменов на поверхности ПК представлена на рис. 1, *b*.

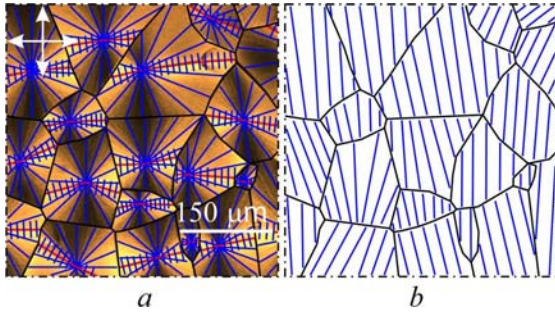


Рис. 1. Самоорганизованный ансамбль нематических доменов 5ЦБ на пленке поликарбоната: *a* – текстура и структура при $z = 0$, *b* – структура при $z < \xi$

Fig. 1. Self-organized ensemble of nematic domains (SEND) of 5CB on PC film: *a* – texture and structure at $z = 0$, *b* – structure at $z < \xi$

$$F = \frac{1}{2} \int_V \left\{ K \left[(\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + (\nabla \times \mathbf{n})^2 \right] - \Delta\chi (\mathbf{n} \cdot \mathbf{H})^2 - \frac{1}{4\pi} \Delta\varepsilon (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})^2 \right\} dV, \quad (1)$$

где K – постоянная упругости в одноконстантном приближении, $\Delta\chi$, $\Delta\varepsilon$ – диамагнитная и диэлектрическая анизотропии, соответственно.

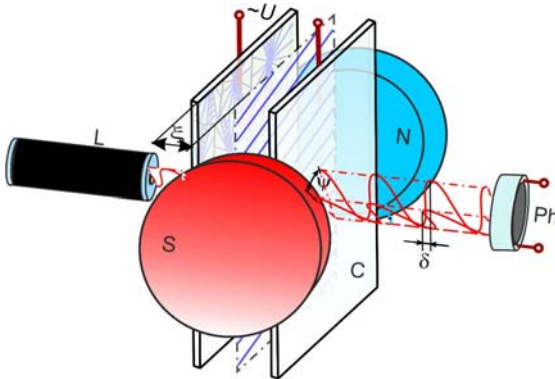


Рис. 2. Магнитно- и электрооптическая схема: L – лазер, C – ячейка САНД, N-S – полюса электромагнита, U – электрическое напряжение, ξ – длина структурной когерентности, ψ – угол между плоскостями поляризаций и δ – разность фаз (o) и (e) волн

Fig. 2. Magnetic and electro-optical scheme: L – laser, C – SEND cell, N-S – electromagnet poles, U is the electric voltage, ξ is the structural coherence length, ψ is the angle between the polarization planes and δ is the phase difference of (o) and (e) waves

Магнитно-электрооптическая схема представлена на рис. 2. Стандартная процедура минимизации свободной энергии нематика после записи выражения (1) в цилиндрических координатах

Задавая слабое сцепление [27] ЖК со стеклянной поверхностью или преднаклон [30] и прикладывая магнитное поле H в плоскости подложки, можно получить планарную однородную ориентацию (ОО) в объеме ячейки на длине ξ_H от пленки ПК. Электрическое поле E , прикладываемое перпендикулярно поверхностям ячейки, будет стремиться установить в слое ЖК на длине ξ_E от пленки ПК гомеотропную ориентацию. Равновесную конфигурацию \mathbf{n} можно определить, сопоставляя длины когерентности ξ , ξ_H , ξ_E и находя минимум свободной энергии нематика F . Выражение для F в объеме домена V в скрещенных магнитном и электрическом полях запишем в виде:

(ρ , φ , z) с подстановкой в него компонент директора $n_\rho = -\sin\theta$, $n_\varphi = 0$, и $n_z = \cos\theta$, где θ – угол отклонения \mathbf{n} от нормали к поверхностям ячейки, дает:

$$\nabla^2\theta = \left(\frac{A^2}{\xi^2} + \frac{1}{\xi_H^2} + \frac{1}{\xi_E^2} \right) \sin\theta \cos\theta, \quad (2)$$

где $A = [(\pi^3/12 - \pi^2/4 + 1)/2\pi \ln(l/b)]^{1/2}$ [19], $l = \langle 2r \rangle$, r – радиус домена, $\xi_H = (1/H)(K/\Delta\chi)^{1/2}$, $\xi_E = (1/E)(4\pi K/\Delta\varepsilon)^{1/2}$ – магнитная и электрическая длины когерентности, $\nabla^2\theta = (1/\rho)\partial/\partial\rho(\rho\partial\theta/\partial\rho) + (1/\rho^2)(\partial^2\theta/\partial\varphi^2) + \partial^2\theta/\partial z^2$ – лапласиан. Полагая $\partial\theta/\partial\rho = 0$, $(\partial^2\theta/\partial\varphi^2) = 0$ [19] и интегрируя выражение (2), получим:

$$\left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 = \left(\frac{A^2}{\xi^2} + \frac{1}{\xi_H^2} + \frac{1}{\xi_E^2} \right) \sin^2\theta. \quad (3)$$

Константа, появляющаяся при интегрировании, принята $C = 0$, так как ПР конфигурация на длинах ξ и ξ_H постепенно переходит в планарную, а на длине ξ_E – в гомеотропную ОО с $\theta = 0$ и $\partial\theta/\partial z = 0$.

Световая волна с напряженностью электрического поля E , распространяемая через ПР структуру, при падении на кристаллическую пластинку перпендикулярно оптической оси разделится на обыкновенную (o) E_o и необыкновенную (e) E_e компоненты с показателями преломления n_o и n_e . В анализируемом случае одноосной нематической

среды будем считать n_o не зависящим от углов φ и θ , а n_e от φ и использовать его как эффективный показатель преломления $n_{\text{eff}} = n_e n_o / (n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta)^{1/2}$ [31]. В скрещенных магнитном и электрическом полях интегральная δ при длине волны λ в слое ЖК

$$\delta = \frac{2\pi n_o}{\lambda (A^2/\xi^2 + 1/\xi_E^2 + 1/\xi_H^2)^{1/2}} \int_0^{\pi/2} \left[\frac{n_e}{(n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} - 1 \right] \frac{1}{\sin \theta} d\theta \quad (6)$$

Усредняя компоненты в уравнении (2) за длительное время и по размерам доменов, получим выражение для интенсивности света, прошедшего через САНД:

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[1 + \frac{2}{\pi} \exp(-\alpha z) \cos \delta \right], \quad (7)$$

где I_0 – интенсивность света, миновавшего гомеотропный слой ЖК, α – коэффициент, характеризующий ослабление светового пучка вследствие рассеяния.

Эксперимент

ЖК-ячейка конструировалась из двух стеклянных пластин с ИТО токопроводящими покрытиями размером 10x15 мм. На краях пластин к покрытиям припаивались медные проводники для подачи на них электрического напряжения. На нижнюю пластину в центрифуге наносилась полимерная пленка из 2 %-го раствора ПК в CH_2Cl_2 . На пленке размещались две тефлоновые прокладки толщиной 30 мкм, на которые укладывалась верхняя стеклянная пластина, промытая в кипящих ацетоне и гексане. Пластины склеивались между собой эпоксидной смолой, и сформированная ЖК-ячейка устанавливалась в 12 мм зазоре между полюсами электромагнита. Ячейка фиксировалась так, чтобы магнитное поле H было направлено параллельно, а электрическое E , возникающее после прикладывания напряжения U к проводникам, перпендикулярно пластинам. Вертикальный луч He-Ne лазера ослаблялся светофильтром и

толщиной $\zeta = (\xi_H + \xi_E) \leq \xi$, обусловленной длинами когерентностей ξ_H и ξ_E , определится как:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{\zeta} [n_{\text{eff}}(z) - n_o] dz. \quad (5)$$

Подстановка dz из (3) в (5) дает:

направлялся к фотодиоду через центр ячейки перпендикулярно пластинам. Ячейка заполнялась ЖК *4-n-pentyl-4'-cyanobiphenyl* (5ЦБ) в нематической фазе. Развитие структуры САНД отслеживалось по изменению интенсивности лазерного излучения. Напряженность магнитного поля фиксировалась при определенном значении в диапазоне $H = 0 \div 27$ кЭ. При каждой фиксации H напряжение от генератора частотой 1 кГц сканировалось со скоростью 4 В/мин в диапазоне $U = 0 \div 80$ В. Значения интенсивности света регистрировались при отсутствии и наличии пустой и заполненной ЖК-ячейки в оптическом тракте. По окончании эксперимента текстура САНД наблюдалась в поляризационный микроскоп и фотографировалась (рис. 1, а). Все процедуры проводились при 23 °С.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 экспериментальная кривая 1 показывает уменьшение интенсивности света I от момента начала роста доменов $t_1 = 0$ ($I = I_1$) до значения, соответствующего окончанию формирования структуры САНД – $t_2 \approx 3$ мин ($I = I_2$). Это уменьшение экспоненциальное и хорошо описывается выражением $I = I^* \exp(a + bt + ct^2)$, где I^* – интенсивность света, прошедшего через пустую ячейку. Для простоты значения I нормировались на $I^* = 1$, и с помощью экспоненциальной подгонки были получены коэффициенты $a = -0,321$, $b = -0,2191$, $c = 0,03372$, при которых кривая 1' с хорошей точностью совпадает с кривой 1.

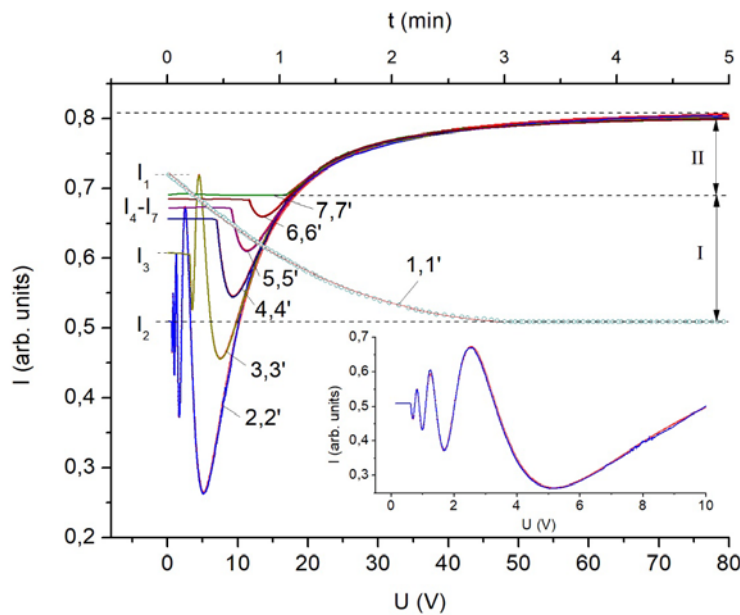


Рис. 3. Зависимости $(I_1 - I_2)(t)$ (оси слева и сверху), полученные для процесса формирования САНД; $(I_2 - I_7)$ – при переориентации САНД под действием U (оси слева и внизу) при $H = 0; 5; 10; 15; 20; 27$ кЭ, 2–7 – экспериментальные, 2'–7' – расчетные. Вставка: начальный участок $I(U)$ при $H = 0$

Fig. 3. Dependencies of $(I_1 - I_2)(t)$ (axes on the left and on the top), obtained for the process of SEND formation; $(I_2 - I_7)$ – when the SEND is reoriented under the action of U (axes on the left and at the bottom) at $H = 0; 5; 10; 15; 20; 27$ kOe, 2–7 – experimental, 2'–7' – calculated. Insert: initial section $I(U)$ at $H = 0$

Три члена в рассматриваемом выражении можно соотнести с различными независимыми вкладками в рассеяние отдельных структурных элементов САНД. Величина I в таком случае представляет собой вероятность прохождения света без рассеяния через слой ЖК и равна произведению вероятностей пропускания структурных элементов. При $t = 0$, I соответствует значению $I_1 = 0,725$, полученному для слоя ЖК с нитевидной текстурой. Уменьшение интенсивности I^*/I_1 в $\sim 1,4$ раза обусловлено рассеянием на флуктуациях директора [27] и неоднородностях неориентированного слоя ЖК [32]. Эмпирический коэффициент $a = -0,321$ характеризует такие виды рассеяния.

Второй член в выражении линейно зависит от t и связан с развитием доменов. Принимая во внимание эффективное сечение рассеяния σ , этот член можно записать как $I_1' = I^* \exp(-\sigma z)$, и поскольку САНД распространяется вдоль z на длину ξ от пленки ПК, $\sigma = 1/\xi$. В то же время экспериментально установлено, что радиус домена r ,

а также ξ , вследствие того, что $\xi = Ar$, линейно увеличиваются со временем, поэтому $\sigma = 1/t_m$. Следует отметить, что рассеяние света происходит не на всем домене, а только на его светлых секторах в текстуре, проявляющейся в скрещенных поляризаторах (рис. 1, а), где имеет место существенное расхождение векторов \mathbf{n}_r и \mathbf{n}_l , соответствующих директору \mathbf{n} на ПР структуре и ЛД. При этом, площади светлых и темных секторов примерно равны. Кроме того, домен не является однородным, а на длине ξ экспоненциально переходит от сильно рассеивающей ПР структуры к планарной слабо рассеивающей ОО (рис. 1, б). Усреднение функции $\exp(-z/\xi)$ от $z = 0$ до $z = \xi$ дает e^{-1} . Поэтому $I_1' = 2 \exp(-t/t_m)/e$. Используя экспериментальное значение $t_m = 3$ мин, получим $b = -1/t_m 2/e = 0,245$, близкое к $b = -0,2191$. Небольшое расхождение между оценочным и подгоночным значениями можно объяснить несовершенством структуры САНД и погрешностью эксперимента.

ЛД стремятся распространить ОО на длину ξ , поэтому они способствуют просветлению, а границы ЛД и доменов оказывают влияние на затемнение САНД. Вклад этих структурных элементов в оптическое пропускание можно выразить через интенсивность $I_1'' = I^* \exp(\sigma''z - \sigma'''z)$, где σ'' , σ''' – сечения рассеяния на ЛД и на границах ЛД и доменов, соответственно. Коэффициент σ'' должен зависеть от отношения площадей сечений ЛД и домена S_1''/S_d'' и поэтому определится как $\sigma'' = 1/\xi^2 = 1/t_m^2 = 0,111t^2$. Коэффициент σ''' можно получить из отношения площадей стенок от ЛД и домена $\sigma''' = S_1'''/S_d''' = b^*l^*/\pi r^2$, где $b^* \sim 1$ мкм – ширина стенки ЛД, l – общий периметр ЛД и домена. Уточняя $b^* = 1,13$ мкм, получим $\sigma''' = 0,077$ и $c = \sigma'' - \sigma''' = 0,034t^2$, что соответствует значению $c = 0,03372$, в подгоночном выражении.

Прикладывание магнитного поля H к САНД в плоскости пленки ПК ведет к выпрямлению линий директора \mathbf{n} в доменах и установлению планарной ОО на расстоянии $z \geq \xi_H$. С увеличением значений H ЖК-ячейка просветляется, так как уменьшается толщина рассеивающего нематического слоя, ограниченного ξ_H . На рис. 3 можно видеть, что при каждом более высоком значении H начальные интенсивности $I_2 - I_7$ становятся больше. Напряжение U , прикладываемое при различных H , приводит к переориентации ЖК с преобразующимися зависимостями $I(U)$. При $H = 0$ девиация I начинается с порогового значения $U_0 = 0,5$ В. Выйдя из допороговой области, кривая $I(U)$ возрастает и сопровождается рядом поперечных колебаний, которые имеют существенный размах по амплитуде и обусловлены фазовой модуляцией света вследствие интерференции обыкновенной и необыкновенных волн. При больших значениях U вольт-контрастная характеристика стремится к напряжению насыщения U_s при интенсивности I_0 , соответствующей пропусканию гомеотропного слоя ЖК. С увеличением H значения U_0 возрастают, амплитуды интерференционных колебаний уменьшаются, а монотонный ход кривой $I(U)$ в область насыщения сохраняется. При $H = 27$ кЭ экстремумы полностью исчезают, определяя границу, где кривая $I(U)$ с начальным значением I_7 переходит из области модуляции в область насыщения. Увеличение начальной интенсивности от I_2 до I_7 происходит по экспоненциальному закону, поскольку такое просветление описывается выражением $I = I_7 - I_2' \exp(-\xi_{Hm}/\xi_H)$, где I_2' , ξ_{Hm} – ам-

плитудные значения I и ξ_H для переходной области.

Экспериментальная и расчетная зависимости $I(U)$ на рис. 3 хорошо совпадают. Расчетные кривые были получены из выражения для интенсивности света (7) при подстановке в него разности фаз δ , вычисленной из выражения (6). Для расчетов использовались литературные данные при 23°C : $K = 6,21 \cdot 10^{-7}$ дин, $\Delta\chi = 0,97 \cdot 10^{-7}$ [33], $n_o = 1,5271$, $n_e = 1,7103$ [34], экспериментальные значения $d = 35$ мкм, $r = 48$ мкм, $l = 96$ мкм, $b = 10$ мкм, $\xi = r[(\pi^3/12 - \pi^2/4 + 1)/2\pi \ln(l/b)]^{1/2} = 16,2$ мкм, $A = 0,337$. В процедуре расчета δ задавались значения $H = 0; 5; 10; 15; 20; 27$ кЭ и $E = 0,5 - 72$ (СГС) ($U = 0,5 - 80$ В) для каждого H , по которым определялись длины когерентностей $\xi_E = (1/E)(4\pi K/\Delta\epsilon)^{1/2}$ и $\xi_H = (1/H)(K/\Delta\chi)^{1/2}$ [26]. Соответствующие эксперименту решения выражения (7) были получены при использовании сечения рассеяния $\sigma = \zeta/\xi$. Такое соответствие обусловлено тем, что прикладывание полей E и H к САНД ведет к переориентации нематика в доменах и установлению ОО на расстоянии $z \geq \zeta$. С увеличением E или H ЖК-ячейка просветляется, так как уменьшается толщина рассеивающего нематического слоя, ограниченного ζ . При медленном сканировании E в каждый момент времени устанавливается равновесная конфигурация директора \mathbf{n} , отвечающая минимуму свободной энергии нематика.

В каждом сечении, перпендикулярном оси z , свет проходит через множество неоднородностей, формируя на фотоприемнике случайную интерференционную картину (спекл), обусловленную суперпозицией когерентных о и е-волн с расположенными под углом ψ плоскостями поляризации (рис. 2). Спекл характеризуется неизменными по сечению эффективным показателем преломления n_{eff} и $\langle \cos\psi \rangle$, которые не зависят от магнитного поля. Поэтому на рис. 3 с увеличением H на зависимостях $I(U)$ наблюдается смещение пороговых значений U_0 без изменения характера фазовой модуляции. Модуляция возникает при изменении полярного угла θ под влиянием электрического поля, вследствие чего о и е-волны, распространяющиеся вдоль z с разными скоростями, сдвигаются по фазе на величину δ и интерferируют. В данных условиях интерференция на фотоприемнике проявляется как модуляция света.

Выводы

В статье исследована структура самоорганизованных нематических доменов в скрещенных магнитном H поле и электрическом напряжении U оптическим методом. При минимизации свободной энергии нематика получены выражения для разности фаз между о- и е-волнами и интенсивности света I , пропущенного через исследуемую структуру. С использованием известных параметров выбранного нематика 5ЦБ получены расчетные зависимости $I(U)$ при различных значениях H . Ансамбли доменов формировались в ячейке с плоскопараллельными стеклянными поверхностями на пленке поликарбоната в процессе роста в присутствии остаточного растворителя. ЖК-ячейка помещалась между полюсами электромагнита, и магнитное поле H прикладывалось вдоль пленки. Электрическое напряжение U подавалось на проводящие покрытия ИТО, нанесенные на стеклянные поверхности ячейки, для создания в слое ЖК электрического поля E , перпендикулярного H . Луч He-Ne лазера распространялся через ячейку и регистрировался с помощью фотодиода. Электрическое поле медленно сканировалось при различных фиксированных значениях H , и прописывалась экспериментальная зависимость $I(U)$, которая сравнивалась с расчетной с хорошим совпадением результатов. Из сопоставления структурной ξ , магнитной ξ_H и электрической ξ_E длин когерентностей оценено влияние структурных элементов самоорганизованного ансамбля друг на друга. Изучены оптические характеристики ансамбля, такие как фазовая модуляция света, наблюдаемая в отсутствие поляризаторов в оптической схеме, и рассеяние света на различных участках исследованной структуры.

Список источников / References

1. Buka A., Kramer I. Pattern formation in liquid crystals. New York: Springer, 1996, 339 p.
2. Dierking I. Textures of liquid crystal. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 218 p. DOI: 10.1002/3527602054.
3. Kleman M., Lavrentovich O.D. Topological point defects in nematic liquid crystals. *Philos. Mag.*, 2006, **86** (25–26), 4117–4137. DOI: 10.1080/14786430600593016.
4. Doane J.W. Polymer dispersed liquid crystals displays. Liquid crystals: application and uses / ed. by B. Bahadur. Singapore: World Scientific, 1990, Ch. 14, 361–394. DOI: 10.1142/9789814368278_0010.
5. Prishchepa O.O., Shabanov A.V., Zyryanov V.Ya. Director configurations in nematic droplets with inhomogeneous boundary conditions. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**, 031712-1–031712-11. DOI: 10.1103/PhysRevE.72.031712.
6. Prishchepa O.O., Parshin A.M., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Magneto-optical study of Friedericksz threshold in polymer dispersed nematic liquid crystals. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2008, **488** (1), 309–316. DOI: 10.1080/15421400802241167.
7. Parshin A.M., Nazarov V.G., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Magnetic-field-induced structural transition in polymer-dispersed liquid crystals. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2012, **557** (1), 50–59. DOI: 10.1080/15421406.2011.632237.
8. Palomares L.O., Reyes J.A., Janossy I. Director reorientation in a nematic liquid crystal with a photosensitive layer. *Phys. Rev. E*, 2014, **90**, 062503-1–062503-8. DOI: 10.1103/PhysRevE.90.062503.
9. Toth-Katona T., Janossy I. Photoalignment at the nematic liquid crystal-polymer interface: Experimental evidence of three-dimensional reorientation. *J. Mol. Liq.*, 2019, **285**, 323–329. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.04.074.
10. Nys I. Patterned surface alignment to create complex three-dimensional nematic and chiral nematic liquid crystal structures. *Liq. Cryst. Today*, 2020, **29**, 65–83. DOI: 10.1080/1358314X.2020.1886780.
11. Nassrah A.R.K., Janossy I., Kenderesi T., Toth-Katona T. Polymer–nematic liquid crystal interface: on the role of the liquid crystalline molecular structure and the phase sequence in photoalignment. *Polymers*, 2021, **13**, 193-1–193-13. DOI: 10.3390/polym13020193.
12. Ball P. Nature's Patterns. Oxford: University Press, 2009, 274 p.
13. Dierking A., Flatley A., Greenhalgh. Voronoi patterns in liquid crystal textures. *J. Mol. Liq.*, 2021, **335**, 116553-1–116553-8. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116553.
14. Nys I., Beeckman J., Neyts K. Switchable. 3D liquid crystal grating generated by periodic photo-alignment on both substrates. *Soft Matter.*, 2015, **11**, 7802-1–7802-8. DOI: 10.1039/c5sm01294e.
15. Lu Ya-Q., Hu W., Srivastava A., Chigrinov V. Fabrication of liquid crystal gratings based on photoalignment technology. *Proc. SPIE*, 2013, **8642**, 8642010G-1–8642010G-10. DOI: 10.1117/12.2004245.

16. Kosa T., Coutino P., Munoz A., Taheri B., Janossy I. Large-scale periodic pattern in homeotropic liquid crystals induced by electric field. *Liq. Cryst.*, 2019, **46**, 145–150. DOI: 10.1080/02678292.2018.1477209.
17. 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 the polymer surface. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2012, 1, 42–51 (in Russ.)].
18. 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.)].
19. 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.)].
20. Паршин А. М., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Электро- и магнитооптические эффекты в жидкокристаллических доменах, сформированных поверхностью полимера // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2016. Т. 16, № 3. С. 49–57. [Parshin A.M., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Electro- and magneto-optic effects in liquid crystal domains formed by polymer surface. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2016, **16** (3), 49–57 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2016.3.49].
21. Parshin A.M., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Alignment of liquid crystals by polymers with residual amounts of solvents. *Sci. Rep.*, 2017, **7**, 3042-1–3042-8. DOI: 10.1038/s41598-017-03243-5.
22. Паршин А. М., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Структурообразование в поверхностном слое пленки поликарбоната при взаимодействии с нематическим жидким кристаллом // *Высокомолекуляр. соед.* 2018. Т. 60, № 1. С. 27–36. DOI: 10.7868/S2308114718010041. [Parshin A.M., Zyryanov V.Y., Shabanov V.F. Structuring of the surface layer of polycarbonate film upon interaction with nematic liquid crystal. *Polym. Sci. Ser. C*, 2018, **60** (1), 23–31. DOI: 10.1134/S181123821801006X].
23. Паршин А. М., Баранник А. В. Проявление интерференции в электрооптическом отклике нематика в доменной структуре на поверхности поликарбоната // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2019. Т. 19, № 1. С. 62–69 [Parshin A.M., Barannik A.V. Interference phenomenon in electro-optic response of nematic in domain structure on polycarbonate surface. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2019, **19** (1), 62–69 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2019.1.62].
24. Паршин А. М., Баранник А. В. Оптическое пропускание доменной структуры нематика на поверхности полимера в магнитном поле // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2020. Т. 20, № 2. С. 62–68 [Parshin A.M., Barannik A.V. Optical transmission of the nematic domain structure on the polymer surface in magnetic field. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2020, **20** (2), 62–68 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2020.2.62].
25. Паршин А. М. Отклик гибридно-упорядоченного нематика с поверхностной линией дисклинации на импульс магнитного поля // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2021. Т. 21, № 3. С. 60–67. [Parshin A.M. Response of a hybrid-aligned nematic with a surface disclination line to a magnetic field pulse. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2021, **21** (3), 60–67 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2021.3.60].
26. Паршин А. М., Гуняков В. Я., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. Структура и оптические свойства самоорганизованных ансамблей нематических доменов на поверхности поликарбоната // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2022. Т. 22, № 1. С. 84–88. [Parshin A.M., Gunyakov V.A., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Structure and optical properties of self-organized nematic domains ensembles on polycarbonate surface. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z. = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (1), 84–88 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2022.1.84].
27. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 400 с. [de Gennes P.G. The Physics of Liquid Crystals. Oxford, 1974, 350 p.]
28. Glogarova M., Durand G. Anchoring strength of a nematic liquid crystal on a ferroelectric crystal interface. *J. Phys. France*, 1988, **49**, 1575–1581. DOI: 10.1051/jphys:019880049090157500.
29. Vitek V., Kleman M. Surface disclinations in nematic liquid crystals. *J. Phys. France*, 1975, **36**, 59–67. DOI: 10.1051/jphys:0197500360105900.

30. Evangelista L.E. Weak anchoring or pretilt? *Phys. Lett. A.*, 1995, **205**, 203–207.
31. Blinov L.M. Structure and properties of liquid crystals. New York: Springer, 1996, 439 p. **DOI:** 10.1007/978-90-481-8829-1.
32. Blinov L.M., Chigrinov V.G. Electrooptic effects in liquid crystal materials. New York: Springer, 1994, 464 p. **DOI:** 10.1007/978-1-4612-2692-5.
33. Bradshaw M.J., Raynes E.P., Bunning J.D., Faber T.E. The Frank constants of some nematic liquid crystals. *J. Phys. France*, 1985, **46**, 1513–1520. **DOI:** 10.1051/jphys:019850046090151300.
34. Bunning J.D., Crellin 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. **DOI:** 10.1080/02678298608086488.

<https://orcid.org/0000-0002-5731-0523>

Поступила 14.04.2023, одобрена 12.05.2023, принята 16.05.2023
Received 14.04.2023, approved 12.05.2023, accepted 16.05.2023