

УДК 532.783

А. М. Паршин^{1,2}, А. В. Баранник¹

ОПТИЧЕСКОЕ ПРОПУСКАНИЕ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ НЕМАТИКА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

¹Институт физики им. Л. В. Киренского, Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,
Академгородок, д. 50, 660036 Красноярск, Россия. E-mail: parshin@iph.krasn.ru

²Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, 660041 Красноярск, Россия

Исследовано распространение лазерного луча через слой гибридно-упорядоченного нематика с поверхностной линией дисклинации, состоящий из доменов с радиальной конфигурацией нематического директора на пленке поликарбоната. Ориентационная структура в объеме домена трансформируется в планарную одноосную, задаваемую линией дисклинации, либо в гомеотропную под действием магнитного поля. Получена зависимость интенсивности света, прошедшего через слой, от магнитного поля, прикладываемого перпендикулярно поверхности полимера. Оптическое пропускание сопровождалось интерференционными минимумами и максимумами. Представлена модель интерференции света, основанная на двулучепреломлении, учитывающая рассеяние на ориентационно-структурных неоднородностях доменного ансамбля. Из рассмотрения свободной энергии жидкого кристалла и эффектов двулучепреломления выведено аналитическое выражение, устанавливающее зависимость между интенсивностью света и напряженностью магнитного поля, совпадающее с экспериментом.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, поликарбонат, доменная структура, интерференция света, рассеяние света, магнитное поле.

DOI: 10.18083/LCAppl.2020.2.62

А. М. Parshin^{1,2}, А. V. Barannik¹

OPTICAL TRANSMISSION OF THE NEMATIC DOMAIN STRUCTURE ON THE POLYMER SURFACE IN A MAGNETIC FIELD

¹Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS,
50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: parshin@iph.krasn.ru

²Siberian Federal University, 70 pr. Svobodnyy, Krasnoyarsk, 660041, Russia

The propagation of a laser beam through a layer of a hybrid ordered nematic on a polycarbonate film is studied. The nematic has a surface disclination line consisting of domains with a radial configuration of the nematic director. The orientational structure in the domain volume can be transformed into a planar uniaxial structure defined by a disclination line or into a homeotropic one under the influence of a magnetic field. The dependence of the light intensity transmitted through the layer on the magnetic field applied perpendicular to the polymer surface is obtained. Optical transmission was accompanied by interference minima and maxima. Light interference model based on birefringence which takes into account scattering by the orientation-structural inhomogeneities of the domain ensemble is presented. Considering the analysis of the liquid crystal free energy and the birefringence effects, an analytical expression is derived. It establishes the relationship between the light intensity and the magnetic field strength, which coincides with the experiment.

Key words: nematic liquid crystal, polycarbonate, domain structure, light interference, light scattering, magnetic field.

Введение

Для исследования оптических характеристик и практических применений нематических жидких кристаллов (ЖК) обычно используют ячейки с плоскопараллельными поверхностями, на которых задается однородная ориентация директора. Условия ориентации на обеих поверхностях в таких ячейках, как правило, симметричны [1–3]. В зависимости от граничных условий нематика на поверхности, в объеме ЖК возникают однородная планарная, гомеотропная или наклонная ориентации. Помещая ячейку между двумя поляризаторами и воздействуя электрическим или магнитным полем, перпендикулярным ее плоскости, можно наблюдать изменение интенсивности проходящего света, сопровождаемое интерференционными минимумами и максимумами. Эффект обусловлен двулучепреломлением плоскополяризованного света в нематике и возникновением разности фаз между обыкновенными и необыкновенными волнами, интерферирующими в анализаторе [3]. Также существуют гибридно-упорядоченные нематические (HAN) слои [4, 5], в которых директор на одной поверхности ориентирован планарно, а на другой гомеотропно. В HAN ячейках также проявляется интерференционный характер светопропускания, обусловленный изменением ориентационной структуры ЖК и его двулучепреломления под действием внешнего поля. В дальнейшем были получены структуры с вырожденной планарной ориентацией на одной поверхности ячейки и гомеотропной на другой, названные «гибридно-упорядоченные (HAND) пленки» [6], и исследованы их топологические особенности [7]. Недавно мы синтезировали и исследовали структуру, содержащую ансамбль доменов с радиальной конфигурацией директора ЖК на пленке поликарбоната (ПК), постепенно переходящую в объеме ячейки в однородную ориентацию, задаваемую поверхностной линией дисклинации (SDL) и противоположной поверхностью [8–12]. Следуя логике обзора, такую структуру в дальнейшем будем называть слоем гибридно-упорядоченного нематика с поверхностной линией дисклинации (HANL). Предложенная модель интерференции света, распространяющегося через такую структуру, основана на суперпозиции обыкновенных и необыкновенных волн, но без использования поляризаторов [12]. Модель получила хорошее экспериментальное подтверждение, но только для ансамбля доменов с согласованно ориентированными SDL. В

этом случае значение светопропускания в минимумах и максимумах, последовательно проявляющихся в оптическом отклике на нарастающее электрическое поле, оставалось неизменным. Однако во многих экспериментах, в которых для приготовления HANL не использовались специальные методы ориентации SDL, с увеличением поля наблюдалось также и увеличение амплитуды колебаний в интерференционной картине отклика [9, 11].

Целью данной статьи является развитие интерференционной модели [12] с учетом рассеяния на неоднородностях ориентационной структуры слоя HANL с неориентированными SDL. Применение магнитооптических методов исследования позволит исключить необходимость учета диэлектрической неоднородности HANL.

Теоретическая часть

Рассмотрим особенности ориентационной структуры молекулярного ансамбля нематика и ее трансформацию под действием магнитного поля в HANL. На рисунке 1 показан отдельный домен в схеме, когда направление распространения света и магнитное поле перпендикулярны плоскости ячейки. Свободную энергию нематика в объеме домена V запишем в виде [3]

$$F = \frac{1}{2} \int \left\{ K \left[(\operatorname{div} \mathbf{n})^2 + (\operatorname{rot} \mathbf{n})^2 \right] - \Delta \chi H^2 \cos^2 \theta \right\} dV, \quad (1)$$

где константа упругости $K = (K_{11} + K_{22} + K_{33}) / 3$ представляет собой среднее значение констант поперечного изгиба, продольного изгиба и кручения, соответственно, а магнитная энергия зависит от анизотропии магнитной восприимчивости $\Delta \chi$ и угла θ между директором нематика \mathbf{n} и полем H . Представив $\operatorname{div} \mathbf{n}$ и $\operatorname{rot} \mathbf{n}$ в цилиндрических координатах (ρ, φ, z) с компонентами директора $n_\rho = -\sin\theta$, $n_\varphi = 0$, $n_z = \cos\theta$, и используя уравнение Эйлера – Остроградского для определения минимума свободной энергии F , получим

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

где ξ_H – магнитная длина когерентности [3], $\nabla^2 \theta = (1/\rho) \partial/\partial \rho (\rho \partial \theta / \partial \rho) + (1/\rho^2) (\partial^2 \theta / \partial \varphi^2) + \partial^2 \theta / \partial z^2$ – оператор Лапласа. При $\partial \theta / \partial \rho = 0$, $(\partial^2 \theta / \partial \varphi^2) = 0$ [14] и фиксированном $\rho = r$, где r – радиус домена, решение дифференциального уравнения (2) дает

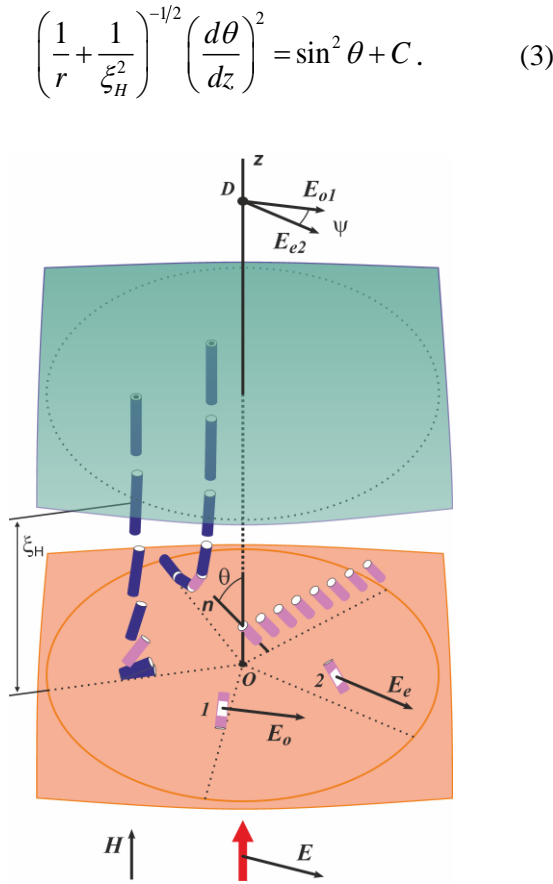


Рис. 1. Ориентационная структура домена HANL в магнитном поле H . Лазерный луч направлен вдоль оси z . Линия дисклиниции на схеме не показана

Fig. 1. Orientational structure of the HANL domain in the magnetic field H . The laser beam is directed along the z axis. The disclination line is not shown in the scheme

Константу интегрирования C определим следующим образом. При любом значении H на поверхности $z = 0$ домена (рис. 2, *a*) для нематика выполняются жесткие планарные граничные условия $\theta = \pi/2$ с азимутально вырожденной радиальной ориентацией директора [8, 10]. В отсутствие внешнего поля в объеме домена конфигурация директора обусловлена конкурирующим влиянием

радиальной структуры и SLD. На когерентной длине ξ_i планарная ориентационная структура постепенно переходит от радиальной к одноосной, ориентированной перпендикулярно SDL (рис. 2, *b*). При достаточно большой толщине ЖК-ячейки [9–12] на длине ξ_H планарная ориентация под действием магнитного поля трансформируется в гомеотропную, где $\theta = 0$ и $\partial\theta/\partial z = 0$ (рис. 2, *c* и *d*). Из этого следует, что $C = 0$.

Как рассматривалось нами ранее [12], в любой локальной области ПК, характеризуемой директором \mathbf{n} , свет расщепляется на обыкновенную и необыкновенную волны с напряженностями \mathbf{E}_o и \mathbf{E}_e , поляризованные взаимно перпендикулярно [13]. В HANL домене с радиальной структурой директора (рис. 1) векторы \mathbf{E}_{o1} и \mathbf{E}_{e2} , соответствующие выбранным в плоскости $z = \text{const}$ областям 1 и 2, расположены под углом ψ . Для амплитуд волн, образующих суперпозицию $\mathbf{E}_{12} = \mathbf{E}_{o1} + \mathbf{E}_{e2}$ в некоторой удаленной точке D , с учетом разности фаз δ_z , можно записать

$$E_{12}^2 = E_{o1}^2 + E_{e2}^2 + 2E_{o1}E_{e2} \cos\psi \cos\delta_z. \quad (4)$$

В результате распространения монохроматического света через весь домен между волнами возникает разность фаз δ . Выражение для δ на длине ξ_H получим интегрированием по dz разности между эффективным необыкновенным n_{eff} , изменяющимся вдоль z , и постоянным обыкновенным n_o показателями преломления

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

где λ – длина волны света в вакууме. Показатель $n_{\text{eff}}(z)$ не зависит от ориентации директора в плоскости, перпендикулярной оси z , и определяется только углом наклона θ [2],

$$n_{\text{eff}} = n_o (1 - \nu \sin^2 \theta)^{-1/2}, \quad (6)$$

где $\nu = (n_e^2 - n_o^2)/n_e^2$.

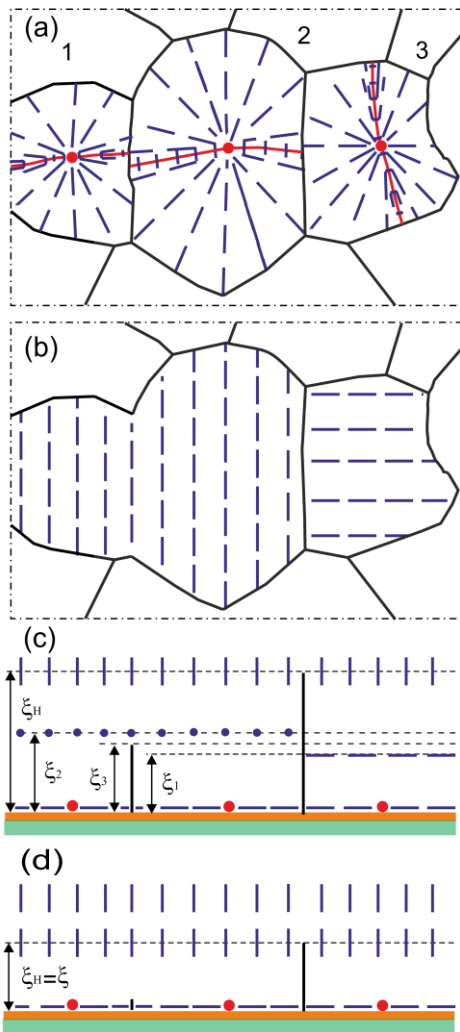


Рис. 2. Ориентационная структура ансамбля доменов: *a* – на поверхности ПК; *b* – в сечении на длине когерентности $\xi = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3) / 3$ для доменов 1, 2, 3; *c, d* – в сечении, перпендикулярном слою HANL, проведенном через центры радиальной структуры

Fig. 2. Orientation structure of the ensemble of domains: *a* – on the surface of the PC; *b* – on the coherence length $\xi = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3) / 3$ for domains 1, 2, 3; *c, d* – in a section perpendicular to the HANL layer drawn through the centers of the radial structure

Следует отметить, что уравнение (3), связывающее ориентационную структуру нематика с морфологией домена, строго справедливо только для модели, в которой объект имеет форму цилиндра. Общее выражение для разности фаз в такой модели выводилось с учетом среднего радиуса доменов [12]. На практике исследуемые нами экспериментальные образцы представляют собой ансамбли доменов, в основании которых лежит по-

лигональная сетка, спонтанно сформированная на поверхности ПК (рис. 2, *a*). Более корректное описание объекта может быть выполнено при использовании в модели не радиуса, а когерентной длины ξ_i радиальной структуры в каждом обособленном домене. С учетом разброса морфологических параметров по ансамблю введем среднюю когерентную длину $\xi = \langle \xi_i \rangle$. Тогда, подставляя dz и n_{eff} из уравнений (3) и (6) в уравнение (5), получим выражение для разности фаз

$$\delta = \frac{2\pi n_o}{\lambda(A^2/\xi^2 + 1/\xi_H^2)^{1/2}} \int_0^{\pi/2} \left[(1 - \nu \sin^2 \theta)^{-1/2} - 1 \right] \frac{1}{\sin \theta} d\theta, \quad (7)$$

где $A = [(\pi^3/12 + \pi^2/4 + 1)/2\pi \ln(l/b)]^{1/2}$ получено из выражения, выведенного для ξ [14]. Здесь $l = \langle 2r \rangle$ – средняя длина SLD, b – ширина.

Рассмотрим вклад эффектов, обусловленных взаимной ориентацией SLD в ансамбле, в общую картину оптического пропускания. На рисунке 2 проиллюстрирован характер превращений поля директора в гибридно-структурированных слоях с одинаковым (1 и 2) и различным (2 и 3) направлениями SLD. В первом случае в отсутствие внешнего поля, в объеме HANL слоя на расстоянии ξ формируется однородная планарная структура с ориентацией директора, перпендикулярной преимущественному направлению SLD. Трансформация директора в таком слое под действием поля к преимущественно гомеотропной ориентации не должна сопровождаться возникновением дефектов, вызывающих сильное рассеяние проходящего света. Полученное нами ранее выражение для интенсивности света, прошедшего через HANL, соответствует именно такому случаю [12]. Рассеяние на стационарных дефектах и шероховатостях поверхности, а также потери при отражении на границах конструктивных элементов ячейки упрощенно учитывались посредством введения в расчетную формулу поправочного члена и линейного коэффициента. Иная картина наблюдается во втором случае. Обособленный характер ориентационных превращений в каждом домене неизбежно ведет к оптической неоднородности слоя. Эффективность светорассеяния, вызванного этой неоднородностью, должна экспоненциально снижаться с уменьшением ξ_H при увеличении действующего поля. Рассеяние обусловлено пространственной неоднородностью оптической анизотропии ЖК $\Delta n = n_e - n_o$ [1].

Справедливость рассмотрения нами такого типа рассеяния основывалась на результатах экспериментальных наблюдений роста ансамбля доменов на пленке ПК, сопровождаемого ликвидацией шпирен-текстуры или нитевидной текстуры (8–10, 12, 14). Следовательно, в выражении для интенсивности прошедшего света $I = \sum \langle E_{12}^2 \rangle$ интерференционный член $J_{12} = 2\sum \langle \mathbf{E}_{e1} \cdot \mathbf{E}_{e2} \rangle$ [13] должен содержать множитель $\exp(-\xi_H/\xi)$. В результате усреднения (4) получим

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[1 + \frac{2}{\pi} \exp(-\xi_H/\xi) \cos \delta \right], \quad (8)$$

где I_0 – интенсивность света, прошедшего через ячейку с однородным гомеотропным слоем нематика, которая меньше интенсивности падающего света. Такой подход позволяет отказаться от учета стационарных эффектов, не принципиальных в предложенной модели оптического пропускания. Рассеяние света, зависящее от энергии сцепления ПК с поверхностью [15, 16], не рассматривается вследствие жестких граничных условий нематика на пленке ПК [14]. Молекулярное рассеяние, характеризующееся длиной свободного пробега фотона через слой ПК [17], считаем малым по сравнению с рассеянием на дефектах структуры [1].

Экспериментальная часть

ЖК-ячейки для магнитно-оптических измерений собирались из двух плоскопараллельных стеклянных пластин с ИТО покрытием. При помощи центрифуги на одну из пластин наносился ПК из 2 % раствора в CH_2Cl_2 . Другая пластина покрывалась лецитином из 4%-го спиртового раствора. Зазор формировался тефлоновыми прокладками толщиной 30 мкм. Плоский капилляр ячейки заполнялся ЖК *4-н-пентил-4'-цианобифенил* (5ЦБ). В течение приблизительно двадцати минут на пленке ПК образовывался ансамбль доменов [8, 10]. Ориентационная структура нематика в ячейке исследовалась с помощью поляризационного микроскопа. Область, выбранная для зондирования лазерным лучом, выделялась диафрагмой диаметром 1 мм. Образец устанавливался в термостатируемом кювете между полюсами электромагнита так, чтобы силовые линии поля были перпендикулярны стеклянным пластинам. В этом же направлении, вдоль отверстий на осевой линии сердечни-

ка электромагнита, через образец распространялся луч лазера $\lambda = 633$ нм. Регистрировалась интенсивность I света, прошедшего в прямом направлении, в зависимости от постоянного магнитного поля H . При медленном нарастании достигалось максимальное значение напряженности 20 кЭ. Для определения интенсивности I_0 к ИТО электродам прикладывалось переменное 1 кГц электрическое напряжение 80 В, достаточное для создания гомеотропной ориентации в слое ЖК [9]. Все процедуры проводились при температуре 23 °С.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 изображен фрагмент HANL, исследуемый в геометрии скрещенных поляризаторов. Анализ текстуры не выявляет доминирующего направления в ориентационной структуре нематика. Темные линии, соответствующие дисклинациям на поверхности ПК, ориентированы произвольно. Результаты подсчета длин SLD во всем ансамбле доменов приведен на гистограмме (рис. 3). Средние значения длины и ширины SLD примем $l = 100$ мкм и $b = 10$ мкм, соответственно. Экспериментально измеренные и рассчитанные с помощью выражения (8) характеристики светопропускания приведены на рис. 4. Расчет теоретической кривой в сравнении с экспериментальной проводился от некоторой пороговой величины $H_{th} = 1,57$ кЭ, при которой магнитная длина когерентности $\xi_H = (1/H)(K/\Delta\chi)^{1/2} = 16,6$ мкм и когерентная длина $\xi = [(\pi^3/12 + \pi^2/4 + 1)/8\pi \ln(l/b)]^{1/2} = 16,6$ мкм имеют равные значения. Входящая в выражение (8) разность фаз $\delta(H)$, вычисленная при подстановке материальных констант 5ЦБ в (7), приведена на вставке. Использованы литературные значения: $n_o = 1,5271$, $n_e = 1,7103$ [18], $K = 6,21 \cdot 10^{-7}$ дин, $\Delta\chi = 0,97 \cdot 10^{-7}$ [19], соответствующие температуре 23 °С. Спад δ , обратно пропорциональный H , соответствует приближению значения n_{eff} к n_o при перестройке ориентационной структуры к однородно гомеотропной. В результате последовательного достижения значений δ , кратных π , на кривых $I(H)$ возникают интерференционные минимумы и максимумы. Нарастающий размах отклонения экстремальных значений светопропускания от $I_0/2 = 0,5$ обусловлен экспоненциальным уменьшением рассеяния света на постепенно исчезающих ориентационных дефектах в HANL.

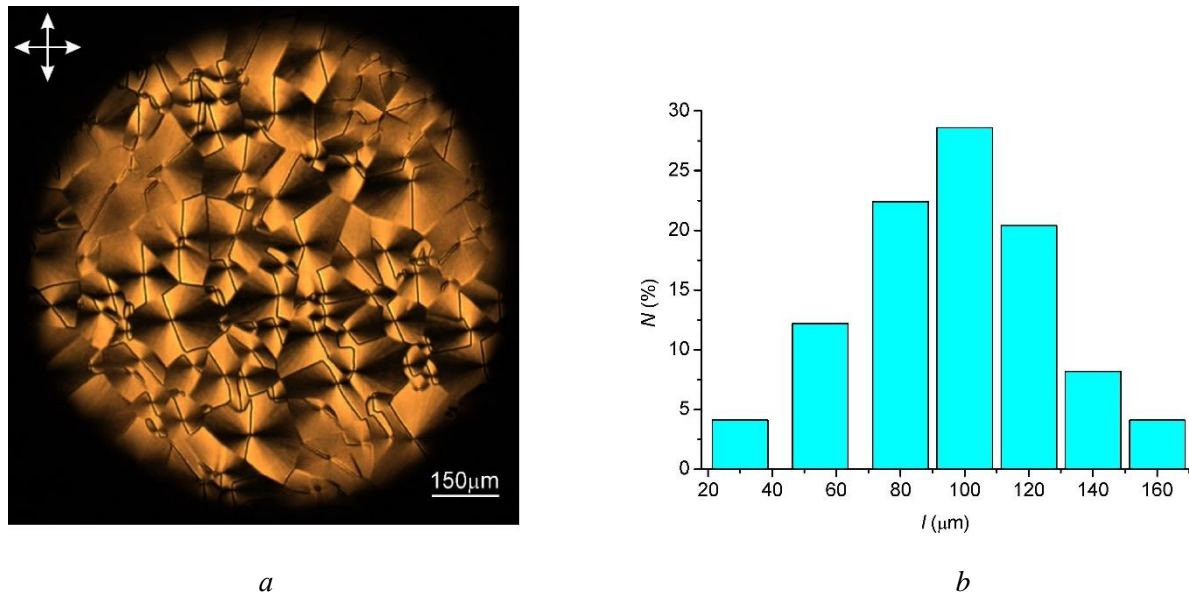


Рис. 3. Фрагмент HANL, ограниченный диафрагмой диаметром 1 мм; направления скрещенных поляризаторов показаны стрелками (а). Статистическое распределение длин линий дисклинаций в HANL (b)

Fig. 3. The fragment of HANL bounded by a diaphragm with a diameter of 1 mm; arrows show the direction of crossed polarizers (a). Statistical distribution of disclination line lengths in HANL (b)

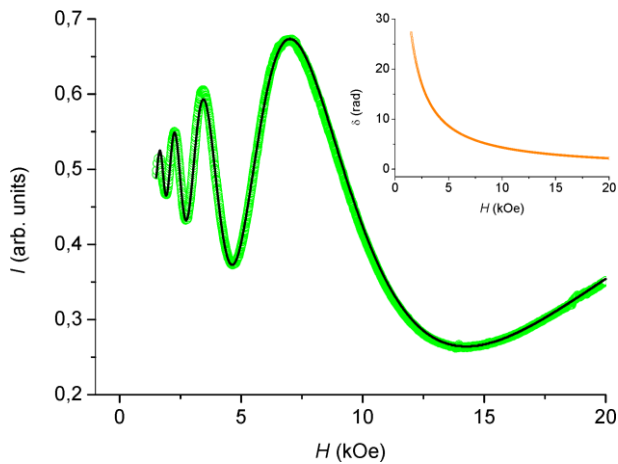


Рис. 4. Интенсивность света I в зависимости от магнитного поля H : экспериментальная (зеленая линия) и теоретическая (черная сплошная линия). Разность фаз δ в зависимости от H приведена на вставке

Fig. 4. The light intensity I dependence on the magnetic field H : experimental (green line) and theoretical (black solid line). The phase difference δ depending on H is shown in the inset

Следует отметить, что выражение (8) соответствует частному случаю ансамбля доменов. Обобщенно, оно может быть дополнено коэффициентом в

экспоненциальном множителе, учитывающим взаимную ориентацию SDL.

Выводы

В статье исследовано распространение лазерного излучения через слой гибридно-упорядоченного нематика с поверхностной линией дисклинации, который мы предложили назвать HANL. Слой состоит из доменов с радиальной конфигурацией директора нематика на пленке поликарбоната. На длине когерентности ξ радиальная конфигурация постепенно трансформируется в одноосно ориентированную. Расширена предложенная нами ранее модель интерференции света, основанная на суперпозиции обыкновенных и необыкновенных волн, на случай с неупорядоченными линиями поверхностных дисклинаций. Получено аналитическое выражение, связывающее интенсивность прошедшего света I , в зависимости от магнитного поля H со структурными параметрами HANL. В интерференционный член введен множитель, характеризующий экспоненциальное снижение светорассеяния с уменьшением магнитной длины когерентности ξ_H относительно когерентной длины радиальной структуры ξ .

Рассеяние обусловлено неоднородностью ориентационной структуры HANL и оптической анизотропии ЖК. Хорошее совпадение экспериментальной и теоретической кривых $I(H)$ подтверждает правильность модельных представлений.

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.)]. [Blinov L.M., Chigrinov V.G. Electrooptic effects in liquid crystal materials. New York : Springer-Verlag, 1996, 464 p.]
2. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: структура и свойства. М. : Книжный дом «Либроком», 2013. 480 с. [Blinov L.M. Structure and Properties of Liquid Crystals. Dordrecht, Heidelberg, London, New York : Springer, 2011, 379 p.]
3. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М. : Мир, 1977. 400 с. [de Gennes P.G. The Physics of Liquid Crystals. Oxford, 1974, 350 p.] [de Gennes P.G. and Prost J. The Physics of Liquid Crystals. Oxford, Clarendon press, 1993, 597 p.]
4. Matsumoto S., Kawamoto M., Mizunoya K. Field-induced deformation of hybrid-aligned nematic liquid crystals: new multicolor liquid crystal display. *J. Appl. Phys.*, 1976 **47**, 3842–3844.
5. Calcagno E.A., Valenty B., Barbero G., Bartolino R., Simoni F. Electro-optics of the hybrid nematic cell. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1985, **127**, 215–227.
6. Lavrentovich O.D., Nastishin Yu.A. Defects in Degenerate hybrid aligned nematic liquid crystals. *Europhys. Lett.*, 1990. **12** (2), 135–141.
7. Kleman M., Lavrentovich O.D. Topological point defects in nematic liquid crystals. *Phil. Mag.*, 2006, **86** (25–26), 4117–4137.
8. 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. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2012, **1**, 42–51 (in Russ.)].
9. 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. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2013, **2**, 26–36 (in Russ.)].
10. Parshin A.M., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Alignment of liquid crystals by polymers with residual amounts of solvents. *Scientific Reports*, 2017, **7** (342), 1–8.
11. 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. Вып. 3. С. 49–57 [Parshin A.M., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Orientational transitions in electric or magnetic field in two-layer nematic structures induced by polymer surface. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2016, **3**, 49–57 (in Russ.)].
12. Паршин А. М., Баранник А. В. Interference in the electro-optical response of a nematic in a domain structure on a polycarbonate surface // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2019. Т. 19, № 1. С. 62–69 [Parshin A.M., Barannik A.V. Orientational transitions in electric or magnetic field in two-layer nematic structures induced by polymer surface. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2019, **19** (1), 62–69 (in Russ.)].
13. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М. : Наука, 1973. 720 p. [Born M., Wolf E. Principles of optics. Cambridge University Press, 1999.]
14. 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. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **1**, 56–65 (in Russ.)].
15. Marusii T.Ya., Reznikov Yu.A., Reshetnyak V.Yu., Soskin M.S., Khizhnyak A.I. Scattering of light by nematic liquid crystals in cells with a finite energy of the anchoring of the director to the walls. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 1986, **91**, 851–860.
16. Marusii T.Ya., Reznikov Yu.A., Reshetnyak V.Yu., Soskin M.S., Khizhnyak A.I. Effect of surface-induced anchoring on NLC light scattering characteristics. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1987, **152**, 495–502.
17. Blinov L.M. Scattering and amplification of light in a layer of a nematic liquid crystal. *JETP Letters*, 2008, **88** (3), 160–163.
18. 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.
19. 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** (9), 1513–1520.

Поступила 6.05.2020 г.
Received 6.05.2020
Принята 05.06.2020 г.
Accepted 05.06.2020