

Физика

Научная статья

УДК 532.783

**МОДУЛЯЦИЯ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ 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

А Н Н О Т А Ц И Я

История статьи:

Поступила 11.08.2023

Одобрена 11.09.2023

Принята 18.09.2023

Ключевые слова:

ансамбли нематических доменов,
электрическое поле,
магнитное поле,
пропускание света

С использованием электрического поля исследовано пропускание света, прошедшего через самоорганизованные ансамбли нематических доменов. Проведено сравнение модуляционных характеристик ансамблей, содержащих домены с неориентированными и сориентированными в магнитном поле линиями дисклинаций. Показано существенное снижение рассеяния света при ориентации линий. Получены расчетные и экспериментальные зависимости пропускания света от электрического напряжения, прикладываемого к жидкокристаллическим ячейкам. Приведены хорошо совпадающие экспериментальные и рассчитанные из полученных ранее выражений зависимости. Изучены осцилляции на кривых светопропускания. Рассмотрены суперпозиции обычных и необычных волн, распространяющихся через доменные ансамбли и однородные планарные слои жидких кристаллов. Представлены спектральные характеристики ансамблей.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.4.49

Для цитирования:

Паршин А. М. Модуляция светопропускания в самоорганизованных ансамблях нематических доменов // Жидк. крист. и их практич. использ. 2023. Т. 23, № 4. С. 49–57.

Physics

Original Article

MODULATION OF LIGHT TRANSMISSION 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 11 August 2023

Approved 11 September 2023

Accepted 18 September 2023

Key words:

ensembles of nematic domains,
electric field,
magnetic field,
light transmission

ABSTRACT

Using an electric field, the transmission of light passing through self-organized ensembles of nematic domains is studied. Modulation characteristics of the ensembles containing domains with non-oriented and magnetic-field-oriented disclination lines are compared. A significant decrease in light scattering is shown when disclination lines are oriented. The calculated and well agreeing with them experimental dependences of light transmission on electric voltage applied to liquid crystal cells are obtained and presented. Oscillations on light transmission curves are studied. Superpositions of ordinary and extraordinary waves propagating through the domain ensembles and homogeneous planar liquid crystal layers are considered. The spectral characteristics of the ensembles are presented.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.4.49

For citation:

Parshin A. M. Modulation of light transmission in self-organized ensembles of nematic domains. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (4), 49–57 (in Russ.).

*Corresponding author: parshin@iph.krasn.ru

© Parshin A. M., 2023

Введение

Модуляция света, обусловленная слоями нематических жидкких кристаллов (ЖК), широко используется и используется в технических устройствах [1–6]. Фазовая модуляция проявляется в оптическом отклике однородного планарного нематического слоя (ОПНС) на внешнее магнитное H или электрическое E поле. Так, в стандартной геометрии S -эффекта слой ЖК находится в ячейке между двумя прозрачными плоскопараллельными пластинами, обработанными для получения ОПНС, и представляет собой линейно-волновую пластину [2]. При падении света на слой ЖК возникают две ортогонально поляризованные, обыкновенная (o) и необыкновенная (e) волны, с показателями преломления n_e и n_o . В оптической схеме до и после ячейки используются поляризатор и анализатор, направления поляризаций которых устанавливаются под углами ϕ_1 и ϕ_2 к директору. Под влиянием внешнего поля директор ЖК отклоняется на угол θ в плоскости, перпендикулярной поверхности ячейки, показатель n_e приближается к показателю n_o , остающемуся неизменным. При $\phi_1 = \phi_2 = 0$ с возникает фазовая модуляция. В часто используемом случае $\phi_1 = \phi_2 = \pi/4$ o - и e -волны, спроектированные в одну плоскость на выходе из анализатора, интерферируют при изменении θ . Интерференция обусловливается разностью фаз между волнами и приводит к модуляции пропускания света [1]. Варьируя электрическое напряжение U при добавлении к нему напряжения смещения U_b для быстрого переключения между экстремумами пропускания, можно интенсифицировать эффекты модуляции света в S -эффекте и использовать их в системах управления и контроля двулучепреломления $\Delta n = n_e - n_o$ с помощью внешнего поля. Переориентация директора ЖК от U_b позволяет оптимизировать такие параметры, как амплитуды переориентирующего напряжения, времена переключения и др. при существенном изменении разности фаз δ , например, на π [1, 3].

Модуляцию пропускания, обусловленную фазовой модуляцией света при варьировании двулучепреломления под влиянием внешнего поля, можно наблюдать также в B -эффекте в ЖК-ячейках с гомеотропной ориентацией директора и в гибридно-упорядоченных нематиках [3, 7]. В последнем случае слой ЖК имеет гомеотропно-

планарную молекулярную ориентацию и также располагается между двумя скрещенными поляризаторами. Как показано в работе [7], колебательная зависимость пропускания света от приложенного электрического напряжения имеет существенный спектральный сдвиг, который может быть использован при создании многоцветных ЖК-дисплеев. Различные виды модуляции света [2, 8] проявляются в твист-ячейках, в которых плоскопараллельные ориентирующие пластины закручены относительно перпендикулярной оси на угол ϕ , а поляризатор и анализатор устанавливаются под углами ϕ_1 и ϕ_2 относительно нематического директора. При $\phi = \pi/2$ и $\phi_1 = \phi_2 = \pi/4$ возникает только фазовая, в случае $\phi_1 = \pi/2$, $\phi_2 = \phi + \pi/2$ присутствует только амплитудная, а при других соотношениях углов реализуется комплексная модуляция света. Наряду с этим, в закрученных нематиках могут обнаруживаться модуляционные эффекты второго порядка [9], возникающие даже в отсутствие анализатора в световом тракте.

Комплексная модуляция света, в которой наряду с интерференционными колебаниями присутствуют амплитудные изменения пропускания, проявляется в оптическом отклике неоднородно ориентированных нематиков на внешнее поле. Так, в каплях ЖК, взвешенных в полимерных матрицах, интерференционные эффекты приводят к модуляции пропускания света, генерирующейся в оптической схеме, содержащей только поляризатор [10, 11]. В таких структурах существенную роль в модуляционных процессах играют рассеяние света и структурные параметры капель. Более ярко подобные эффекты проявляются на зависимостях оптического пропускания нематиков от прикладываемого электрического поля к разориентированным слоям ЖК [12, 13]. Слои представляют собой домены неправильной формы размером 3–10 мкм со случайным распределением поля директора по углам ϕ и θ . Недавно нами были обнаружены и изучены самоорганизующиеся доменные структуры (САНД), возникающие в нематиках на поверхности пленки поликарбоната (ПК) [14–20]. Домены размером 50–200 мкм имеют радиальную конфигурацию с линиями дисклиниаций (ЛД), распространяющуюся в объем слоя ЖК на длину структурной когерентности ξ . С применением электрического и магнитного полей рассмотрены интерференционные эффекты.

В данной работе исследуются модуляционные и спектральные характеристики САНД в электрическом поле. Проводится сравнение модуляции пропускания света, прошедшего через структуры САНД с неориентированными и ориентированными в магнитном поле ЛД с модуляцией пропускания однородного планарного нематического слоя.

Экспериментальная часть

Текстура САНД с неориентированными и ориентированными в магнитном поле линиями дисклинаций (DL) представлена на рис. 1.

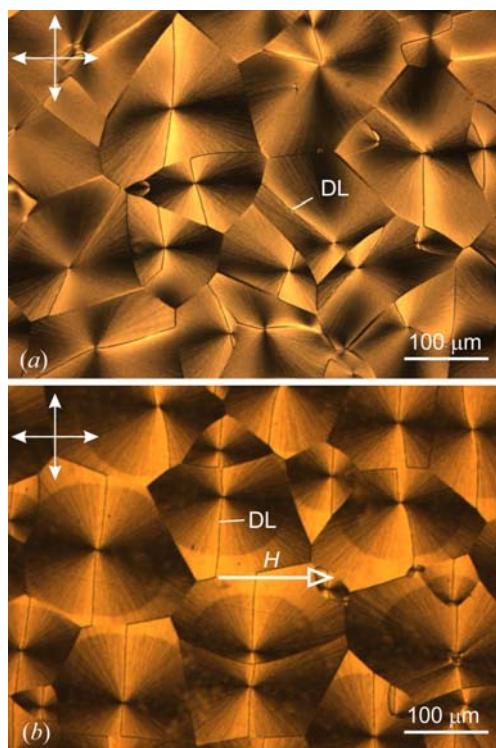


Рис. 1. Текстуры САНД с неориентированными (а) и ориентированными в магнитном поле H (б) линиями дисклинаций DL

Fig. 1. SEND textures with disclination lines DL non-oriented (a) and oriented by magnetic field H (b)

Электрооптические характеристики ячеек были получены с помощью установки, представленной на рис. 2. Свет от галогенной лампы L че-

рез фильтр F падал на ячейку С перпендикулярно пластинам, и пропускание T регистрировалось с помощью фотоумножителя PM. На ячейку подавалось медленно возрастающее напряжение U от генератора G с частотой 1 кГц, и с применением компьютерной программы прописывалась зависимость $T(U)$. При использовании ячеек с САНД поляризаторы в оптический тракт не вводились, в то время как до и после ячеек с однородно ориентированными слоями ЖК на пути света устанавливались поляризатор P и анализатор A под углом $\pi/2$ друг к другу и углом $\pi/4$ ° к директору. Для получения спектральных зависимостей $T(\lambda)$ использовался спектрометр S, принимающий излучение от источника света LS с галогенной и дейтериевой лампами по оптическим волокнам OF через коллиматоры K.

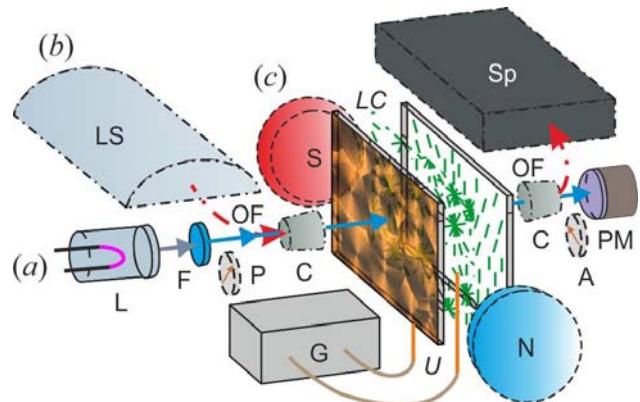


Рис. 2. Электрооптическая (а) и спектральная (б) экспериментальные схемы

Fig. 2. Electro-optical (a) and spectral (b) experimental schemes

Результаты и их обсуждение

Расчетные зависимости $T(U)$ были получены из выражений для пропускания

$$T = \frac{1}{2} [1 + k \exp(-\sigma z) \cos \delta] \quad (1)$$

и разности фаз [15, 17]

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

в которых σ – сечение рассеяния, k – структурный коэффициент (для САНД $k = 2/\pi$, [15, 17], для ОПНС $k = -1$ [1]), λ – длина волны, $v = (n_e^2 - n_o^2)/n_e^2$, $A = [(\pi^3/12 - \pi^2/4 + 1)/2\pi \ln(l/b)]^{1/2}$ [13], l, b = длина и ширина ЛД в домене, $l = \langle 2r \rangle$, r – радиус домена, ξ , $\xi_E = (1/E) (4\pi K/\Delta\epsilon)^{1/2}$ [14] – структурная и электрическая длины когерентности, K – модуль упругости в одноконстантном приближении [21], $\Delta\epsilon$ – диэлектрическая анизотропия ЖК.

Экспериментальная 1 и расчетная 2 зависимости $T(U)$ представлены на рис. 3 и, как видно из рисунка, показывают хорошее совпадение. Расчетная зависимость получена из выражений (1) и (2) при значениях $\lambda = 0,663$ нм, $k = 2/\pi$, $\sigma = \xi = 16,7$ мкм, $l = 50$ мкм $A = 0,332$, $K = 6,21$ пН, $\Delta\chi = 1 \cdot 10^{-7}$, $\Delta\epsilon = 13,8$ [22], $n_o = 1,5271$, $n_e = 1,7103$ [23], $z = \xi_E$, $U = 1,5 - 80$ В. Литературные данные параметров 5ЦБ использованы при температуре 23 °C. Зависимости отражают модуляцию пропускания светового потока, в которой содержится амплитудная и колебательная компонента. Амплитудная компонента определяется рассеянием света и описывается экспоненциальным сомножителем в выражении (2). Действительно, огибающие первых трех максимумов и четырех минимумов в логарифмическом масштабе – прямые линии. Однако последний максимум не отвечает этой закономерности и находится далеко от огибающей. Данное обстоятельство легко объяснить тем, что с увеличением поля E электрическая длина когерентности ξ_E стремится к нулю, экспоненциальный сомножитель в выражении (1) исчезает, и экстремум пропускания T на графике приближается к своему максимальному положению T_H , соответствующему однородной гомеотропной ориентации нематика. Это положение несколько ниже предельного значения $T_m = 1$ вследствие стационарного рассеяния [1] на неоднородностях структуры САНД, которое не зависит от изменения угла θ под влиянием внешнего поля. Колебательная компонента обусловлена фазовой модуляцией света и соответствует второму сомножителю в выражении (1). Набег фаз o - и e -волн происходит на длине структурной когерентности ξ , в пределах которой сохраняется радиальная структура [16].

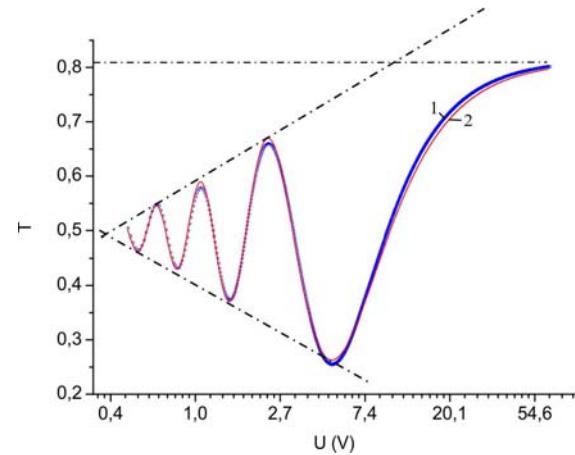


Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости $T(U)$ для САНД

Fig. 3. Experimental (1) and calculated (2) dependences $T(U)$ for SEND

Рассеяние света существенно снижается при упорядочении ЛД в САНД в магнитном поле, так как основной вклад в отклонение светового пучка дают междоменные неоднородности, обусловленные разориентацией ЛД [19]. Зависимость $T(U)$ для САНД с ориентированными ЛД приведена на рис. 4. Из рисунка видно, что значение пропускания T , соответствующее последнему максимуму, так же как для САНД с неориентированными ЛД, остается ниже T_H , однако к нему подтягиваются другие максимумы. Положения минимумов также выравниваются. Зависимость становится похожей на зависимость $T(U)$ для ОПНС (рис. 5), которая определена с использованием в оптической схеме скрещенных поляризаторов. Последняя имеет синусоидальный характер, так как исходит из нулевых значений T и U , а последний экстремум становится минимумом. Фактически, зависимость $T(U)$ для САНД с ориентированными ЛД соответствует зависимости $T(U)$ с фазовой модуляцией для ОПНС, но сдвинута от нее по фазе на $\pi/2$. Такое поведение T следует из выражения (1), так как если в нем допустить для САНД $k = 1$, то в отсутствие рассеяния, зависящего от θ , пропускание станет $T = \cos^2 \delta / 2$, а для ОПНС при $k = -1$ определяется как $T = \sin^2 \delta / 2$.

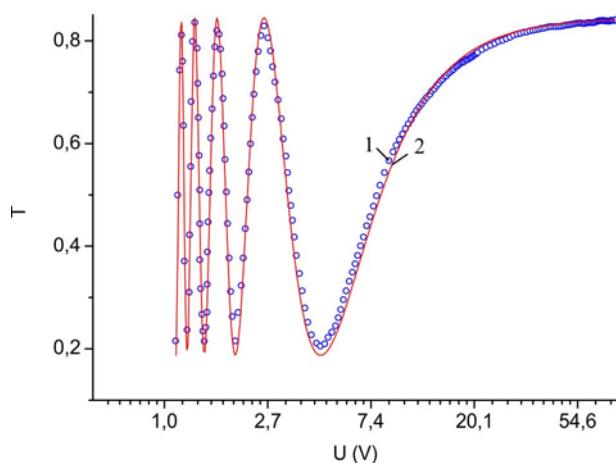


Рис. 4. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости $T(U)$ для САНД с ориентированными ЛД

Fig. 4. Experimental (1) and calculated (2) dependences $T(U)$ for SEND with oriented LD

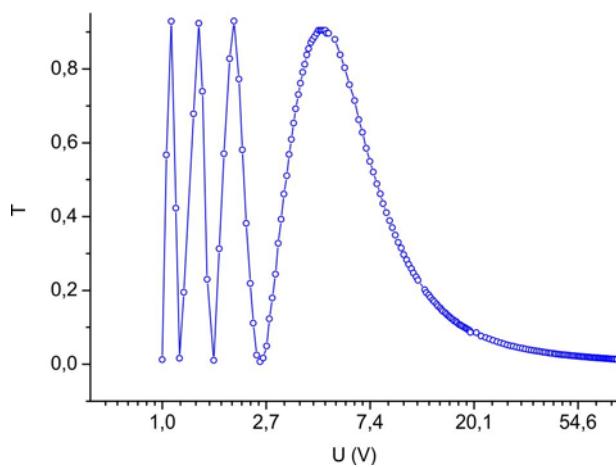


Рис. 5. Экспериментальная зависимость $T(U)$ для ОПНС

Fig. 5. Experimental dependence $T(U)$ for HPNL

Электрооптические характеристики $T(U)$, как аналитически следует из выражений (1) и (2), должны зависеть от длины волны λ . На рис. 6 приведены зависимости $T(U)$ для САНД при различных λ , соответствующих основным цветам: R (red), G (green) и B (blue) видимого диапазона, которые построены в отсутствие поляризаторов при использовании фильтров в электрооптической схеме (рис. 3). На графике наблюдается расщепление максимумов

пропускания кривых R, G, B . При этом кривые имеют разный период колебаний, в связи с чем их суперпозиции зависят от напряжения.

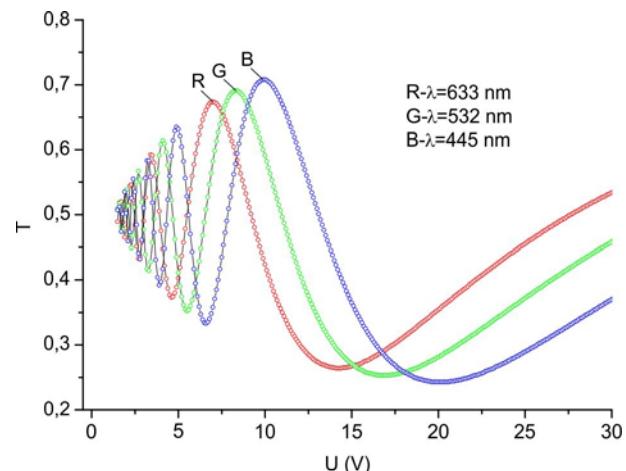


Рис. 6. Спектральные зависимости $T(U)$ для САНД

Fig. 6. Spectral dependences $T(U)$ for SEND

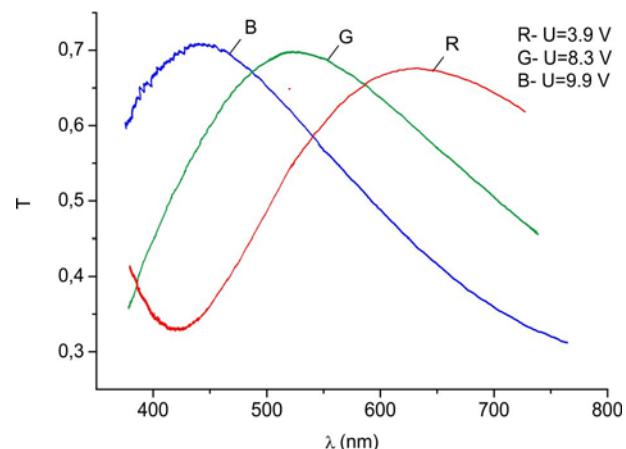


Рис. 7. Спектры пропускания для САНД при напряжениях смещения U : 3,9; 8,3; 9,9 В

Fig. 7. Transmission spectra for SEND at bias voltages U : 3.9; 8.3; 9.9 V

Использование напряжения смещения U_b дает возможность перестроить спектральные характеристики. Так, на рис. 7 представлены спектры пропускания при различных значениях U_b : 3,9; 8,3; 9,9 В, которые соответствуют значениям U на максимумах кривых R, G, B на рис. 6.

Все зависимости $U(\lambda)$ имеют максимумы в соответствующих частях спектра, однако кривая R имеет минимум, близкий к максимуму кривой B в синей части спектра. Суперпозиция смешенных компонент дает значение пропускания, близкое к начальному уровню. То есть, устанавливая значения U_b в максимумах кривых R, G, B , можно получить смещение смежных компонент на π , обеспечив возможность их быстрого переключения.

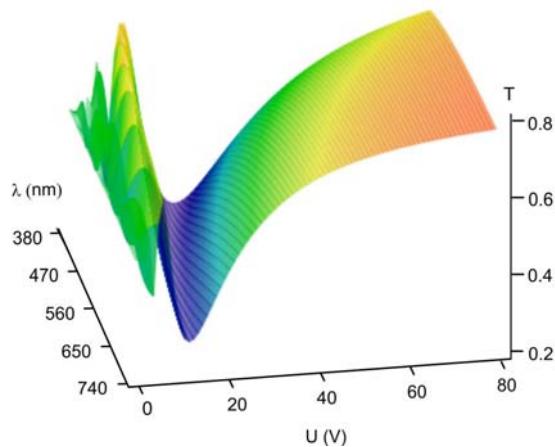


Рис. 8. Зависимости $T(U, \lambda)$ для САНД

Fig. 8. Dependencies $T(U, \lambda)$ for SEND

Зависимость $T(U)$ для САНД при всех значениях λ видимого диапазона представлена на рис. 8. 3D график наглядно показывает степень влияния дисперсии оптического пропускания на электрооптические характеристики САНД при использовании немонохроматического света.

Выводы

В статье исследованы осцилляции пропускания и спектральные характеристики радиально-планарных структур САНД с использованием электрического поля. Структуры формировались в плоскопараллельных ячейках в слоях нематика 5ЦБ в процессе роста на пленке поликарбоната. Для исследований использовались САНД с неориентированными и ориентированными в магнитном поле линиями дисклинаций. Распространение света через слой ЖК рассматривалось в рамках развитой нами ранее модели с использованием выражений для оптического пропускания и разности фаз между o - и e -волнами. Выражение для пропускания содержит экспоненциальный, отвечающий за

рассеяние света, и косинусоидальный, описывающий колебательный характер изменения интенсивности, сомножители. С использованием литературных данных для 5ЦБ получены расчетные зависимости пропускания T от напряжения U для структур САНД. Экспериментальные электрооптические характеристики САНД в виде зависимостей $T(U)$ были получены с помощью установки, включающей в себя галогенную лампу, фильтр и фотоэлектронный умножитель. Экспериментальные и расчетные зависимости показали хорошее совпадение.

Проведено сравнение модуляционных характеристик САНД и ячеек с ОПНС с однородными планарными слоями нематика. При получении зависимостей $T(U)$ для ОПНС в электрооптической схеме использовались поляризаторы. Показано, что в структуре САНД с ориентированными в магнитном поле ЛД рассеивающая компонента в оптическом пропускании исчезает, и кривая $T(U)$ приближается к такой же кривой, полученной для ОПНС. При этом, процессы распространения света в рассматриваемых структурах качественно отличаются друг от друга. Так, в САНД набег фаз o - и e -волн происходит на длине структурной когерентности ξ , в пределах которой сохраняется радиальная структура. Суперпозиция o - и e -волн приводит к их интерференции и модуляции пропускания, для проявления которой не требуется использовать поляризаторы. В то же время, для наблюдения интерференции и модуляции пропускания в ОПНС, необходимо получить проекции o - и e -волн и свести их в одну плоскость на детекторе с применением поляризаторов.

Изучена дисперсия оптического пропускания. На зависимостях $T(U)$, полученных для монохроматического света, установлено расщепление максимумов пропускания кривых R, G, B . При этом, кривые имеют разный период колебаний, в связи с чем их суперпозиции зависят от напряжения. Использование напряжения смещения U_b дает возможность перестроить спектральные характеристики. Например, фиксируя значения U_b в максимумах кривых R, G, B , можно получить смещение смежных компонент на π , обеспечив возможность их быстрого переключения. Степень влияния дисперсии оптического пропускания на электрооптические характеристики САНД при использовании немонохроматического света отражена на 3D графике.

Список источников / References

1. Blinov L.M. Structure and properties of liquid crystals. New York: Springer, 1996. 439 p.
DOI: 10.1007/978-90-481-8829-1.
2. Forbes A. Laser beam propagation. New York: Taylor and Francis, 2014, 202 p. **DOI:** 10.1201/b16548.
3. Yakovlev D., Chigrinov V.G., Kwok H.S. Modelling and optimization of LCD optical performance. (Wiley Series in Display Technology). Chichester: Wiley and Sons, 2015. **DOI:** 10.1002/9781118706749.
4. Perez-Cabre E., Millan M.S. Liquid crystal spatial light modulator with optimized phase modulation ranges to display multiorder diffractive elements. *Appl. Sci.*, 2019, **9**, 2592-1–2592-14. **DOI:** 10.3390/app9132592.
5. Yang S.-W., Choi W., Kim S., Lee J., Na S., Ham S., Park J., Kang H., Ju B.-K., Kim H. Complex spatial light modulation capability of a dual layer in-plane switching liquid crystal panel. *Sci. Rep.*, 2022, **12**, 8277-1–8277-14. **DOI:** 10.1038/s41598-022-12292-4.
6. Mohan M.L.N.M., Pal K. Liquid crystalline light modulation mechanism and shuttering applications. *Functional material processing for switchable device modulation* / ed. by K. Pal and S. Thomas. UK: Elsevier, 2021, 288 p., 141–160.
DOI: 10.1016/C2020-0-01203-X.
7. Matsumoto S., Kawamoto M., Mizunoya K. Field-induced deformation of hybrid-aligned nematic liquid crystals: new multicolor liquid crystal display. *Appl. Phys.*, 1976, **47**, 3842–3845.
8. van Putten E.G. Spatial amplitude and phase modulation using commercial twisted nematic LCDs. *Appl. Opt.* 2008, **47**, 2076–2081.
DOI: 10.1364/AO.47.002076.
9. Davis J.A., Tsai P., Cottrell D.M., Sonehara T., Amako J. Transmission variations in liquid crystals light modulators caused by interference and diffraction effects. *Opt. Eng.*, 1999, **38**, 1051–1057.
DOI: 10.1117/1.1602149.
10. Presnyakov V.V., Zyryanov V.Ya., Shabanov A.V., Vetrov S.Ya. Friedericksz threshold in bipolar nematic droplets with rigidly fixed poles. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1999, **329**, 27–34.
DOI: 10.1080/10587259908025922.
11. 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 films. *SID*, 2005, **13**, 273–279. **DOI:** 10.1889/1.1904926.
12. Aryasova N., Iljin A., Reshetnyak V., Reznikov Yu., Glushchenko A. West J. Orientation of nematic liquid crystals on random anchoring surface. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2002, **375**, 165–173.
DOI: 10.1080/10587250210593.
13. Hotra O., Lopatyanskyj I., Yavorskyj B. New electro-optical effect in liquid crystal for integrated optics elements. *Proc. SPIE*, 2003, **5124**, 112–114.
DOI: 10.1117/12.517065.
14. 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.)].
15. 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.)].
16. 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. Т. 15, № 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, **15** (1), 56–65 (in Russ.)].
17. 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.
18. Паршин А.М., Барапник 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].
19. Паршин А.М., Барапник 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].
20. Паршин А. М. Структурные, магнитные, электрические и оптические когерентности в самоорганизованных ансамблях нематических доменов // Жидк. крист. и их практическ. использ. 2023. Т. 23, № 2. С. 71–80. [Parshin A.M. Structural, magnetic, electric, and optical coherences in self-organized ensembles of nematic domain. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z.* = *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (2), 71–80 (in Russ.).
DOI: 10.18083/LCAppl.2023.2.71].
21. Де Жен П. Физика жидкых 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. **DOI:** 10.1063/1.2808028].
22. 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.
23. 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.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

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

Поступила 11.08.2023, одобрена 11.09.2023, принята 18.09.2023
Received 11.08.2023, approved 11.09.2023, accepted 18.09.2023