

Научная статья

УДК: 535.3 + 535.5

**ПРОПУСКАНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТВИСТ-ЯЧЕЕК
С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ**

В. В. Беляев^{1,2*}, А. С. Соломатин³, Е. В. Царева³, А. А. Беляев², Д. Н. Чаусов²,
М. В. Ермакова², С. И. Данилов¹, М. К. Кузьмин²

¹Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

²Московский государственный областной университет (МГОУ), г. Мытищи, Московская область, Россия

³Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, г. Москва, Россия

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 15.04.2022

Одобрена 5.05.2022

Принята 13.05.2022

Ключевые слова:

жидкие кристаллы,
твист-эффект,
ориентация,
видимый, инфракрасный,
терагерцовый диапазон
спектра,
оптически перезаписываемая
электронная бумага

АННОТАЦИЯ

Выполнена оценка интенсивности пропускания закрученных на 90° жидкокристаллических твист-структур с несимметричными граничными условиями, актуальных для оптико-электронных систем. Угол наклона на каждой из подложек изменяется от 0 до 90°. Предложены конфигурации твист-ячеек для использования в модуляторах света для инфракрасного или терагерцового диапазона или в оптически перезаписываемой электронной бумаге. Показано, что с ростом угла преднаклона жидкого кристалла (ЖК) на подложке толщина слоя ЖК, соответствующая первым двум минимумам Гуча–Тарри, может увеличиться с 6 до 33 мкм.

DOI:

10.18083/LCApp1.2022.2.71

Для цитирования:

Беляев В. В., Соломатин А. С., Царева Е. В., Беляев А. А., Чаусов Д. Н., Ермакова М. В., Данилов С. И., Кузьмин М. К. Пропускание жидкокристаллических твист-ячеек с несимметричными граничными условиями // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2022. Т. 22, № 2. С. 71–78.

*Автор для переписки: vic_belyaev@mail.ru

© Беляев В. В., Соломатин А. С., Царева Е. В., Беляев А. А., Чаусов Д. Н., Ермакова М. В., Данилов С. И., Кузьмин М. К., 2022

Research Article**TRANSMISSION OF LIQUID CRYSTAL TWIST-CELLS WITH ASYMMETRIC BOUNDARY CONDITIONS**

V. V. Belyaev^{1,2*}, A. S. Solomatin³, Ye. V. Tsareva³, A. A. Belyaev², D. N. Chausov²,
M. V. Ermakova², S. I. Danilov¹, M. K. Kuzmin²

¹*RUDN University, Moscow, Russia*

²*Moscow Region State University, Mytishi, Russia*

³*D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

ARTICLE INFO:**Article history:**

Received 15 April 2022

Approved 5 May 2022

Accepted 13 May 2022

Key words:

liquid crystals,
twist effect,
orientation,
visible, infrared, terahertz
range of the spectrum,
optically rewritable
electronic paper

ABSTRACT

The transmission intensity of liquid crystal 90° twisted structures with asymmetric boundary conditions has been estimated. Such structures are relevant for optoelectronic systems. The pretilt angle of nematic mesogen on every cell substrate varied from 0 to 90°. Configurations of twist-cells were proposed for application in infrared or terahertz range light modulators as well as in optically rewritable electronic paper. It was shown that the increase of the pretilt angle value results in rising of liquid crystal layer thickness from 6 to 33 μm corresponding two first Gooch–Tarry minima.

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.2.71

For citation:

Belyaev V. V., Solomatin A. S., Tsareva Ye. V., Belyaev A. A., Chausov D. N., Ermakova M. V., Danilov S. I., Kuzmin M. K. Transmission of liquid crystal twist-cells with asymmetric boundary conditions. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (2), 71–78 (in Russ.).

*Corresponding author: vic_belyaev@mail.ru

© Belyaev V. V., Solomatin A. S., Tsareva Ye. V., Belyaev A. A., Chausov D. N., Ermakova M. V., Danilov S.I., Kuzmin M. K., 2022

Введение

Твист-эффект в нематических жидких кристаллах (ТЭ НЖК; в международной литературе *TN LCD – twist nematic liquid crystal display*) уже более 50 лет является главным электрооптическим эффектом в ЖК, используемым в средствах отображения информации [1, 2]. Твист-ячейка представляет собой слой жидкого кристалла, помещенный между двумя подложками, на внутренние стороны которых нанесены прозрачные электроды и ориентирующие покрытия, формирующие планарную ориентацию в заданном направлении. На противоположных подложках направления ориентации ЖК взаимно перпендикулярны. Благодаря этому и действию упругих сил в отсутствие электрического поля структура ЖК равномерно закручена на угол 90° . Направление поляризации падающего на ячейку света также поворачивается на угол 90° на выходе из ячейки. При приложении напряжения к ячейке ориентация ЖК в объеме ячейки под действием диэлектрических свойств ЖК и упругих сил приобретает вертикальную компоненту. При достаточно большом напряжении угол наклона внутри ячейки становится почти вертикальным. Это приводит к исчезновению эффекта поворота поляризации света, прошедшего через ячейку. Если твист-ячейка помещена между скрещенными поляризаторами так, что директор на передней подложке параллелен направлению поляризации света, то при отсутствии напряжения на выходе получается максимальное пропускание, соответствующее пропусканию параллельных поляризаторов, а при включенном напряжении пропускание будет минимальным, соответствующее пропусканию скрещенных поляризаторов. При параллельной ориентации осей поляризаторов пропускание твист ячейки должно быть минимальным в отсутствие напряжения и максимальным при включенном напряжении.

Благодаря этому твист-эффект является основным электрооптическим эффектом для формирования черно-белого и полутонового изображения в дисплеях.

В литературе достаточно полно описаны оптические характеристики ТЭ в НЖК при начальной планарной ориентации ЖК на подложке (угол наклона $\theta=0$) [3–5]. Одной из важнейших характеристик является пропускание ячейки при изменении параметра $\Delta nL/\lambda$, где Δn – двулучепреломление ЖК, L – толщина слоя ЖК, λ – длина волны

света. При расположении ячейки между параллельными поляризаторами пропускание будет иметь осциллирующий характер с убыванием амплитуды максимумов с ростом $\Delta nL/\lambda$ [6, 7].

При этом неизученным является практически важный случай непланарной исходной ориентации ЖК. Одной из немногих публикаций в этом направлении является [8]. Благодаря появлению методов создания ЖК-ячеек с произвольным значением угла наклона от 0 до 90° появляется возможность управления углами обзора и быстродействием ЖК-ячейки.

Эта проблема имеет актуальность также с точки зрения применения ЖК-ячеек для модуляторов инфракрасного или терагерцового излучения, в которых из-за увеличения рабочей длины волны по сравнению с видимым диапазоном часто приходится применять необычную геометрию прохождения светового пучка через ячейку [9].

Целью работы является исследование пропускания закрученной на 90° ЖК-ячейки при варьировании угла наклона ЖК на каждой подложке ячейки.

Нематическая твист-ячейка

Методика

ЖК-твист ячейка толщиной L помещена между поляризатором и анализатором, плоскости пропускания которых параллельны и совпадают с направлением директора ЖК на фронтальной подложке.

Пусть φ – угол закрутки слоя ЖК, $q = \pi L \Delta n/\lambda\varphi$. Интенсивность пропускания I будет осциллировать в зависимости от L/λ и будет равна [6, 7, 9]

$$I = \frac{\sin^2(\varphi\sqrt{1+q^2})}{1+q^2}. \quad (1)$$

Перепишем выражение для

$$q = \frac{\pi d \Delta n}{\lambda \varphi}. \quad (2)$$

Разность фазовых задержек между необыкновенным и обыкновенным лучами составляет

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d \Delta n}{\lambda}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует

$$q = \frac{\Delta\Phi}{2\varphi}, \quad (4)$$

где

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\int_0^L \frac{n_o n_e dz}{(n_o^2 \cos^2 \theta(z) + n_e^2 \sin^2 \theta(z))^{1/2}} - n_o L \right] \quad (5)$$

Подставим (4) в (1) и для различных пространственных распределений полярного угла наклона директора рассчитаем интенсивность пропускания.

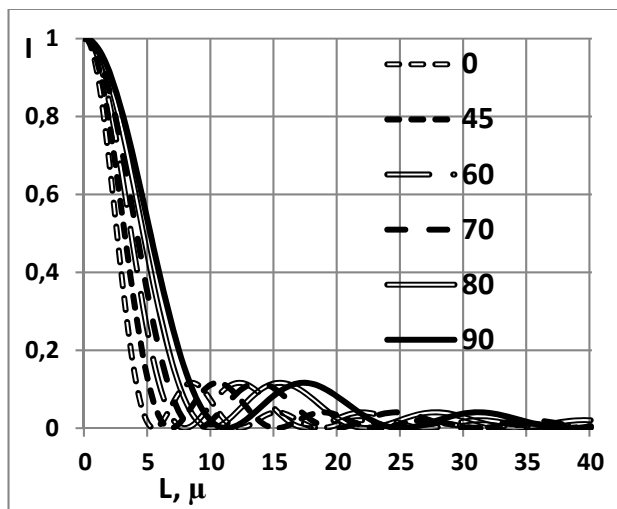
Рассмотрим твист-ячейку с различными (на противоположных подложках) приповерхностными углами θ и θ_{fixed} . Назовем такую ячейку несимметричной твист гибридной ячейкой (NSTH). Пусть длина волны света 0,63 мкм, показатели преломления ЖК $n_o = 1,5$, $n_e = 1,6$, а угол закрутки слоя ЖК равен 90° .

Линейное распределение угла θ по толщине ячейки рассчитывается аналогично описанному для

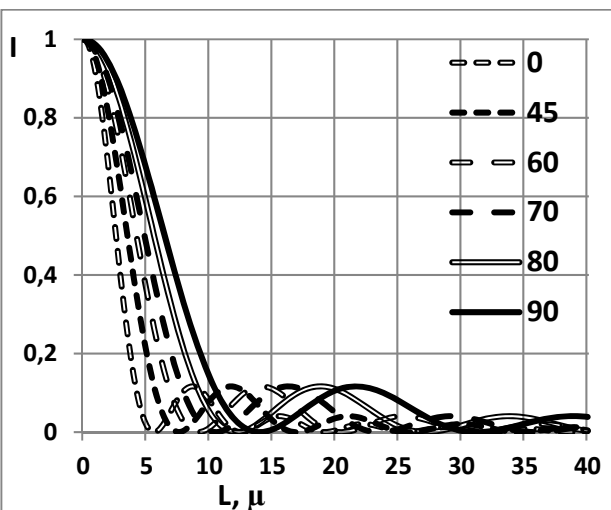
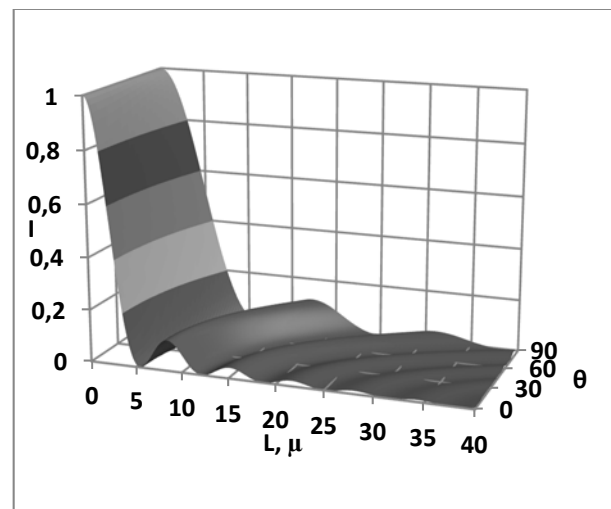
ячеек ЖК разной конфигурации [10–15]. Это распределение соответствует одноконстантному приближению $K_{33}/K_{11} = 1$, где K_{33} и K_{11} – коэффициенты упругости НЖК для деформаций продольного и поперечного изгиба, соответственно.

Результаты

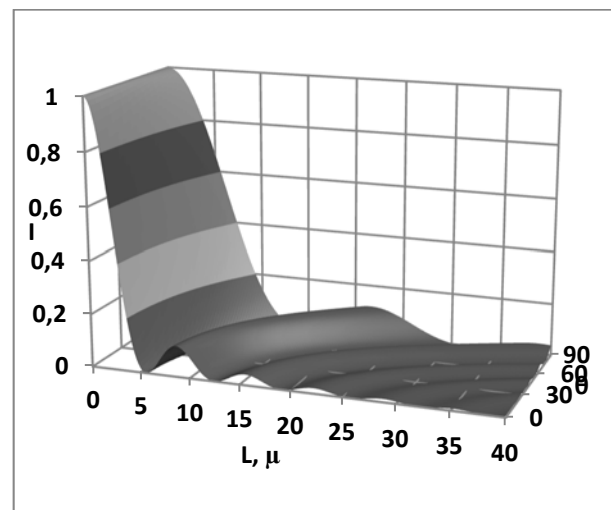
На рисунке для NSTH ячейки показана зависимость интенсивности пропускания I толщины слоя ЖК при разных значениях приповерхностных углов.

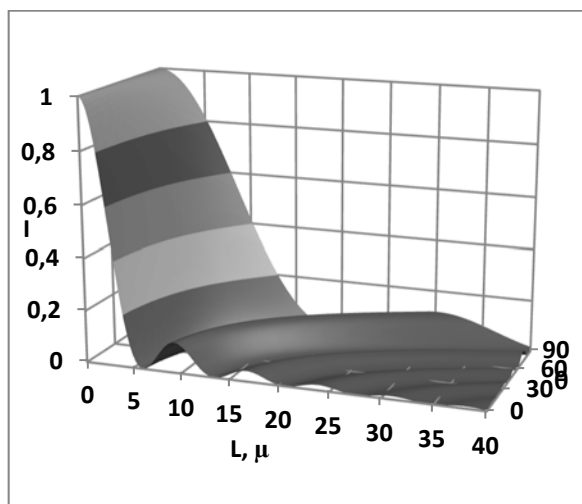
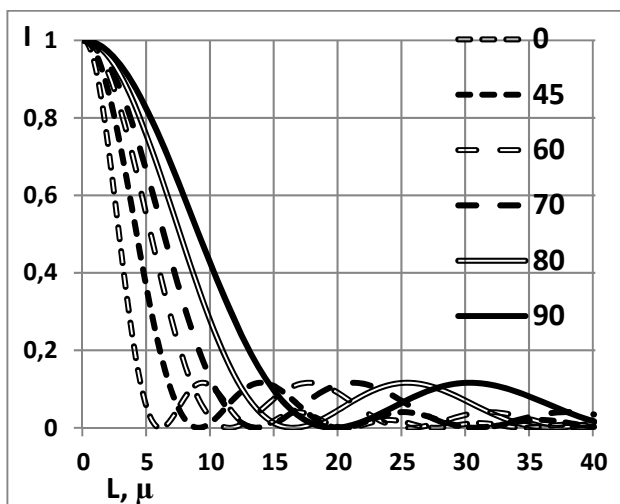


$\theta_{\text{fixed}} = 0$

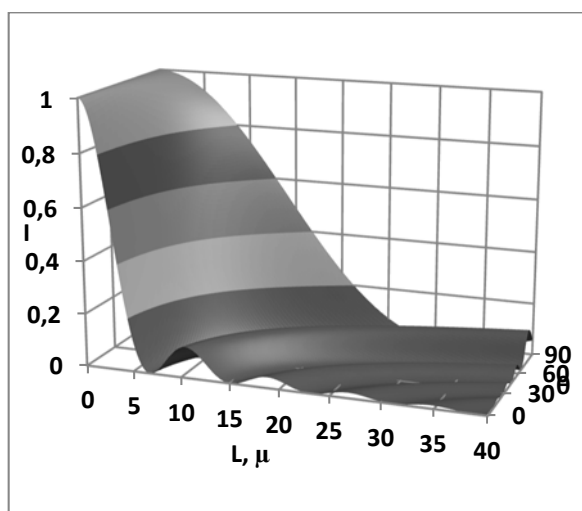
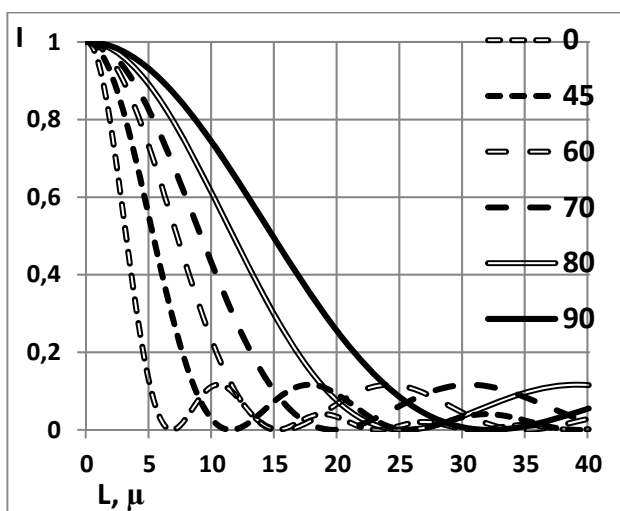


$\theta_{\text{fixed}} = 15^\circ$

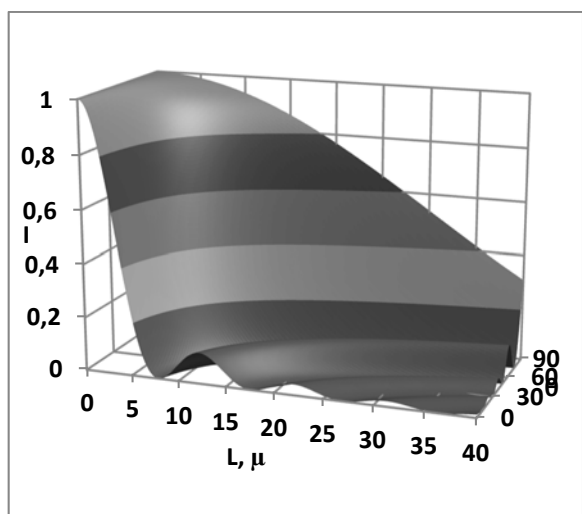
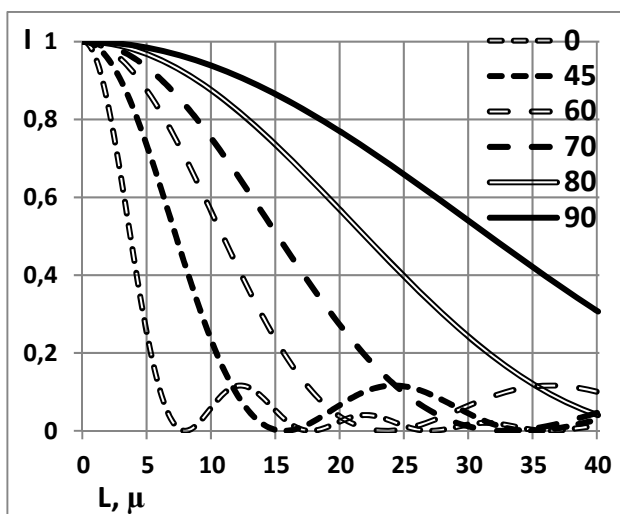




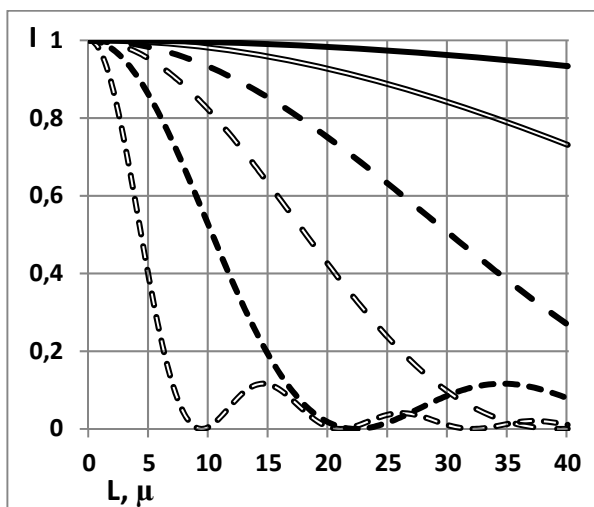
$\theta_{fixed} = 30^\circ$



$\theta_{fixed} = 45^\circ$



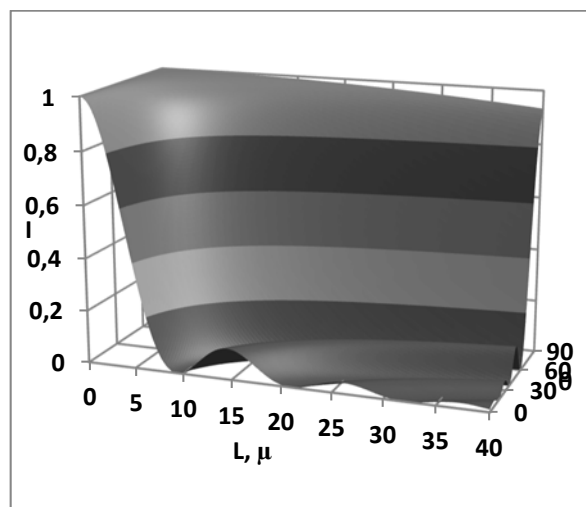
$\theta_{fixed} = 60^\circ$



$$\theta_{\text{fixed}} = 75^\circ$$

Рис. NSTH ячейка. Зависимость интенсивности пропускания I от толщины L ЖК-слоя при варьировании приповерхностных углов θ и θ_{fixed}

Fig. NSTH cell. The dependence of transmission intensity I on the thickness L of LC-layer with varying near-surface angles θ and θ_{fixed}



Обсуждение

На примере NSTH ячейки с фиксированным углом на одной подложке, равным нулю (планарная ориентация), мы видим, что с ростом параметра угла наклона от 0 до 90° на другой подложке положение первых двух минимумов Гуча–Тарри сдвигается в сторону значений толщины, в два раза превышающих первоначальное (с 6 до 12 мкм для 1 минимума и с 12 до 25 мкм для 2 минимума). Минимумы Гуча–Тарри определяют толщину ячейки, при которой контрастное отношение пропускания твист-ячейки в открытом и закрытом состояниях максимально.

При увеличении угла наклона ЖК на обеих подложках положение первых двух минимумов Гуча–Тарри сдвигается в сторону еще больших значений толщины. Отсюда следует вывод, что для работы в ТГц-диапазоне для получения максимально контраста модуляторов можно использовать ячейки с наклонной ориентацией ЖК на подложке. Если при нулевых углах θ и θ_{fixed} толщина, соответствующая 1 минимуму, составляет 6 мкм, то при $\theta = 60^\circ$ и $\theta_{\text{fixed}} = 70^\circ$ она увеличивается до 33 мкм. В ИК- или ТГц-диапазоне увеличение толщины пропорционально компенсирует увеличение длины волны по сравнению с видимым диапазоном. При этом показатели преломления меняются незначительно [16].

Варьирование поверхностных углов наклона θ и θ_{fixed} осуществляется разными методами. В [11] использование кремнийорганических соединений разной молекулярной структуры позволило реализовать углы поверхностной ориентации ЖК от 0 до 90° . Одним из самых перспективных методов получения углов ориентации в широком диапазоне является фотоориентация [17–19]. Применение описанного подхода для задач создания оптически перезаписываемой электронной бумаги [20] позволяет выбирать оптимальный режим фотоориентации (материал и температура) и оптимальную смесь ЖК, формировать стереоскопическое 3D-изображение на дисплее за счет варьирования двумерного распределения поверхностных углов наклона на поверхности слоя ЖК на участках для правого и левого изображений.

Выводы

Рассчитана интенсивность пропускания для различных ориентационных распределений в ЖК-твист-ячейках, актуальных для перспективных оптико-электронных систем. Предложены конфигурации твист-ячеек для использования в модуляторах света для ИК- или ТГц-диапазона или в оптически перезаписываемой электронной бумаге.

Благодарность. По использованию ЖК-ячеек в ИК- и ТГц-диапазоне исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00466, <https://rscf.ru/project/22-29-00466/>.

По методам ориентации ЖК-ячеек исследование частично выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00201, <https://rscf.ru/project/20-19-00201/>.

Acknowledge. On the use of LCD cells in the IR and THz range, the study was partially carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-29-00466, <https://rscf.ru/project/22-29-00466/>.

According to the methods of orientation of LCD cells, the study was partially carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 20-19-00201, <https://rscf.ru/project/20-19-00201/>.

Список источников / References

1. Патент Швейцарии № 532261. Элемент управления освещением / В. Хелфрих, М. Шадт; заявлен 4 декабря 1970. [Patent CH No. 532 261. Lighting control Inventors / W. Helfrich, M. Schadt; filed 4.12.1970].
2. Schadt M., Helfrich W. Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**, 127–128.
3. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М. : Книжный дом «Либроком», 2013. 480 с. [Blinov L.M. Liquid crystals: structure and properties. Stereotype publishing house. M. : URSS, 2018. 482 p. ISBN 978-5-397-06367-8 (in Russ.)].
4. Беляев В. В., Чилая Г. С. Жидкие кристаллы в начале XXI века. М. : ИИУ МГОУ, 2017. 142 p. [Belyaev V.V., Chilaya G.S. Liquid crystals at the beginning of the XXI century. Moscow : Editorial Office of Moscow Region State University, 2017. 142 p. ISBN 978-5-7017-2785-2 (in Russ.)].
5. Wang Q., He S. A new effective model for the director distribution of a twisted nematic liquid crystal cell. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7** (8), 438–444. DOI: 10.1088/1464-4258/7/8/016.
6. Gooch C.H., Tarry H.A. The optical properties of twisted nematic liquid crystal structures with twist angles ≤ 90 degrees. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1975, **8** (13), 1575–1584. DOI: 10.1088/0022-3727/8/13/020.
7. Gharadjedaghi F., Robert J. Comportement électro-optique d'une structure nématique en hélice. application a l'affichage. *Rev. Phys. Appl.*, 1976, **11**, 467–473. DOI: 10.1051/rphysap:01976001104046700.
8. de Rossi D., Robert J. Electro-optic behavior of a field-induced twisted structure with quasihomotropic boundary conditions. *J. Appl. Phys.*, 1978, **49** (3), 1139–1142. DOI: 10.1063/1.325052.
9. Беляев В. В. Жидкокристаллические устройства для амодуляции терагерцового излучения // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2020. №. 5. С. 96–98. [Belyaev V.V. Liquid crystal devices for modulation of terahertz radiation. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2020, (5), 96–98 (in Russ.). DOI: 10.22184/1992-4178.2020.196.5.96.98].
10. Belyaev V.V., Chausov D.N., Solomatin A.S. Phase retardation vs. pretilt angle in liquid crystal cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration. *Optics Express*, 2013, **21**, 4244–4249.
11. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Kurilov A.D., Chausov D.N., Mazaeva V.G. Optical properties of hybrid aligned nematic (HAN) cells with different pretilt angles. *Applied Optics*, 2014, **53** (29), H51–H57.
12. Беляев В. В., Соломатин А. С. Оптические свойства гибридных жидкокристаллических ячеек при различных углах падения света // *Оптический Журнал*. 2015. Т. 82, № 1. С. 47–54. [Belyaev V.V., Solomatin A.S. Optical properties of hybrid liquid crystal cells at different angles of incidence of light. *J. Opt. Technol.*, 2015, **82** (1), 36–42. DOI: 10.1364/JOT.82.000036.
13. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Phase retardation difference of liquid crystal cells with symmetric and asymmetric boundary conditions. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2014, **596**, 22–29.
14. Беляев В. В., Соломатин А. С., Чаусов Д. Н. Оптические свойства ЖК-ячеек с произвольным краевым углом наклона директора // *Вестник МГОУ. Серия «Физика-Математика»*. 2013. № 1. С. 32–41. [Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. Optical properties of LCD cells with an arbitrary edge angle of inclination of the director. *Bulletin of the Moscow Region State University. Series «Physics-Mathematics»*, 2013, (1), 32–41 (in Russ.)].
15. Коншина Е. А. Оптика жидкокристаллических сред. СПб : СПб НИУ ИТМО, 2012. 99 с. [Konshina E.A. Optics of liquid crystal media. Saint-Petersburg : Editorial Office of Saint-Petersburg National Research ITMO University, 2012, 99 p.
16. Lu Y.-Q., Hu W., Liang X. THz Devices based on high birefringence liquid crystals. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, **45** (1), 491–494.
17. Chigrinov V.G., Kozenkov V.M., Kwok H.-S. Photoalignment of liquid crystalline materials: Physics and applications. 1-st edition. Wiley-SID Series in Display Technology. Wiley, 2008. 248 p. ISBN: 978-0470065396.
18. Kamanina N., Toikka A., Barnash, Y., Zak A., Tenne R. Influence of surface relief on orientation of nematic liquid crystals: polyimide doped with WS₂ nanotubes. *Crystals*, 2022, **12** (3), 391. DOI: 10.3390/cryst12030391.

19. Каманина Н. В., Тойкка А. С., Зверева Г. Н., Кужаков П. В., Барнаш Я. В., Тарасов С. А. Рельеф поверхности полиимидных тонкопленочных ориентирующих материалов для жидкокристаллических модуляторов света // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2021. Т. 21, № 4. С. 47–52. [Kamanina N.V., Toikka A.S., Zvereva G.N., Kuzhakov P.V., Barnash Ya.V., Tarasov S.A. Surface relief of polyimide thin-film orienting materials for liquid crystalline light modulators. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2021, **21** (4), 47–52. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.4.47 (in Russ.)].
20. Chigrinov V., Kudreyko A., Jiatong Sun. Photosensitive alignment: advanced electronic paper-based devices. *Crystals*, 2022, **12** (3), Article 364 (13 p.). DOI: 10.3390/cryst12030364.

Вклад авторов:

- ¹Беляев В. В. – постановка задачи, интерпретация результатов.
- ²Соломатин А. С. – программа и координация расчетов.
- ³Царева Е. В. – расчеты для угла 0° и 75°.
- ⁴Беляев А. А. – расчеты для угла 15°.
- ⁵Чаусов Д. Н. – расчеты для угла 30°.
- ⁶Ермакова М. В. – интерпретация результатов для применимости в ИК- и ТГц-диапазоне
- ⁷Данилов С. И. – расчеты для угла 45°.
- ⁸Кузьмин М. К. – расчеты для угла 60°.

Contribution of authors:

- ¹Belyaev V.V. – formulation of the task, results interpretation.
- ²Solomatina A.S. – software development and calculation coordination.
- ³Tsareva Ye.V. – calculation for angles 0° and 75°.
- ⁴Belyaev A.A. – calculation for angle 15°.
- ⁵Chausov D.N. – calculation for angle 30°.
- ⁶Ermakova M.V. – interpretation of results for applicability in the IR- and THz ranges.
- ⁷Danilov S.I. – calculation for angle 45°.
- ⁸Kuzmin M.K. – calculation for angle 60°.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The authors declare no conflicts of interests.

¹orcid 0000-0003-0553-9358

⁵orcid 0000-0002-1287-6427

orcid – отсутствует у остальных авторов

Поступила 15.04.2022, одобрена 5.05.2022, принята 13.05.2022
 Received 15.04.2022, approved 5.05.2022, accepted 13.05.2022