

УДК: 535.3 + 535.5

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-2-53-63

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТНЫХ ТВИСТ-ЯЧЕЕК¹

Соломатин А.С., Мащенко В.И., Шашкова Ю.О., Беляев В.В.

*Московский государственный областной университет,
учебно-научная лаборатория теоретической и прикладной нанотехнологии,
105005, г. Москва, ул. Радио, д. 10А, Российская Федерация*

Аннотация В данной работе предложен способ формирования твист-структур в объектах микронных размеров с использованием явления образования капиллярных мостов жидкости в композитных материалах на основе поликапролактона и нематического жидкого кристалла 4-циано-4'-N-гептилбифенил (7ЦБ). Проведено теоретическое моделирование оптических характеристик в микро-твист-объектах.

Ключевые слова: жидкокристаллический оптически анизотропный композит, твист-структуры, домены ЖК, моделирование оптических свойств, поликапролактон, 4-циано-4'-N-гептилбифенил, 7ЦБ.

FORMATION AND OPTICAL PROPERTIES OF TWIST STRUCTURES IN A NEMATIC LIQUID CRYSTAL COMPOSITE

A. Solomatin, V. Mashchenko, Yu. Shashkova, V. Belyaev

*Education & Research Lab of Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University,
ul. Radio 10A, 105005 Moscow, Russian Federation*

Abstract. A method for the formation of twist structures in objects of micron size using the phenomenon of the formation of capillary fluid bridges in composite materials based on polycaprolactone (PCL) and a nematic liquid crystal 4-cyano-4'-N-heptylbiphenyl (7CB) is proposed. Theoretical modeling of optical characteristics in micro-twist objects is carried out.

Key words: liquid crystal optically anisotropic composite, polycaprolactone, 4-cyano-4'-N-heptylbiphenyl, 7CB, LC domains, optical properties simulation.

Введение

Разработки, связанные с формированием твист-структур в нематических жидких кристаллах, представляют практический интерес для создания различных электрооптических устройств, дисплейной техники и электроники [1]. Направление на миниатюризацию электронных устройств ставит задачи по уменьшению размеров устройств до микро- и нано- уровней [2]. Одной из таких

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-57-00089Бел_а, и гранта Президента № МК-7359.2016.9.

© Ройтенберг В.Ш., 2017.

задач современной прикладной науки является уменьшение размера рабочего пикселя для повышения разрешения оптических устройств [1; 2].

Целью данной работы является разработка способа формирования твист-микроструктур в ЖК-композитах и теоретическое моделирование их оптических характеристик.

Экспериментальная часть

В качестве матрицы ЖК-композита использован (рис. 1) поликапролактон, $T_{пл.} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

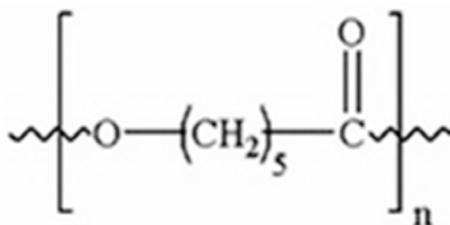


Рис. 1. Поликапролактон.

В качестве ЖК был использован (рис. 2) нематический ЖК 4-циано-4'-N-гептилбифенил (7ЦБ), $T_{CN} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{NI} = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

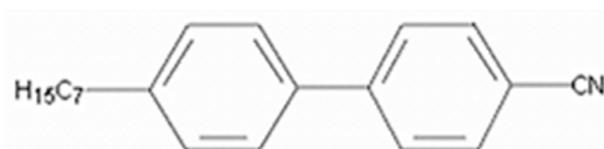


Рис. 2. Нематический ЖК 4-циано-4'-N-гептилбифенил (7ЦБ).

ЖК-композиты были получены с помощью оригинального метода с использованием явления образования Рэлеевских мостов жидкости. Поликапролактон расплавляли и помещали в его объём микрокаплю 7CB. Далее, сочетая одноосные и торсионные деформации, формировали полимерную композитную нить. ЖК-композит фиксировали охлаждением поликапролактона до комнатной температуры.

Микроскопические снимки сделаны с использованием оптического поляризационного микроскопа – Альтами Полар 3 (РФ). Исследовали общий вид цилиндрической нити сбоку и срезы, перпендикулярные продольной оси нити.

Для моделирования оптических свойств использовали программы, представленные группой разработки программного обеспечения Учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии МГОУ.

Результаты и их обсуждение

Микроскопические исследования ЖК-композитов

Микроскопические исследования в скрещенных поляризаторах показали, что образец композита представляет собой полимерную нить, включающую протя-

жённный микроцилиндр с 7СВ. Исследования в проходящем свете показали, что поперечное сечение нити имеет внутреннее отверстие овальной формы (рис. 3).

Двулучепреломление различной интенсивности наблюдается как в полимерном образце (за счёт кристаллической структуры полимера), так и в цилиндре, наполненном ЖК.

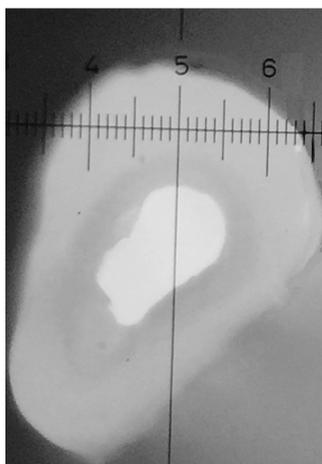


Рис. 3. Микроскопические снимки в скрещённых поляризаторах образца ЖК-композита. Поперечное сечение. Цена деления составляет 10 мкм.

Неоднородные композитные структуры, формирующие твист-ячейку

Как было показано выше, получены экспериментальные (оптические) данные о пропускании поляризованного света через вышеописанную пространственно неоднородную оптически анизотропную среду при скрещённых поляризаторах.

На основании полученных экспериментальных результатов можно предложить способ изготовления твист-структуры.

Следует изготавливать короткую (длиной меньше 1 мм) композитную нить, содержащую, в соответствии с экспериментальными результатами, тонкий ЖК цилиндр. Он, по всей видимости, имеет поперечное сечение, схематически подобное изображенному на рис. 4.

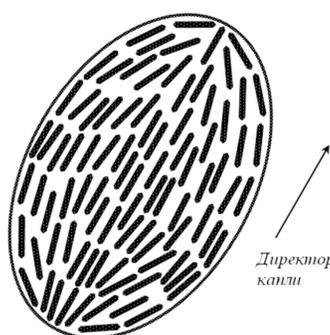


Рис. 4. Поперечное сечение ЖК цилиндра.

Затем один её конец следует повернуть на $\pi/2$. В результате при прохождении луча света вдоль ЖК цилиндра будет происходить поворот плоскости поляризации, как в 90° твист-ячейке.

Угол наклона директора ЖК к направлению прохождения луча отсчитывается как на рис. 5.

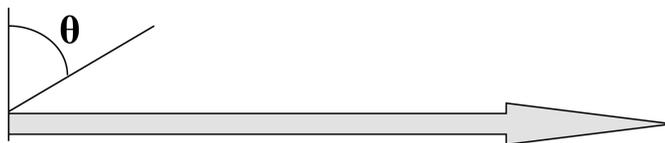


Рис. 5. Угол наклона директора ЖК к направлению прохождения луча отсчитывается от нормали к лучу, то есть от торца цилиндра.

Угол наклона зависит от удлинения при вытягивании. Если задать градиент относительного удлинения при вытягивании, то есть различные участки композитной нити вытягивать различно, то цилиндрическая ЖК ячейка внутри нити будет аналогична рассмотренным в работах [3–7] ячейкам ЖК с неоднородным распределением директора (рис. 6).

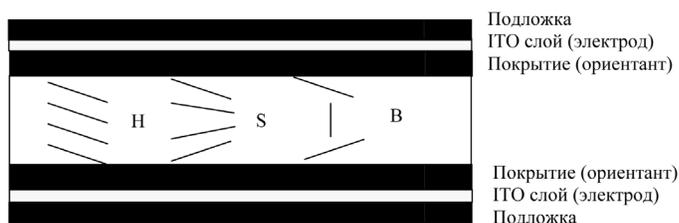


Рис. 6. Нематические жидкокристаллические структуры с неоднородным распределением директора, рассмотренные в [3–7].

На рис. 7 изображена предлагаемая в данной работе ЖК структура. Она представляет собой матрицу из цилиндрических пор с нитями вышеописанного композита в них и затем, последовательно по ходу луча, микролинзы ЖК, описанные в [8]. Этот упорядоченный блок ЖК микролинз и твист-ячеек устанавливается перед матрицей фотоэлементов цифрового фотоаппарата на заранее определённом (толщина прозрачного слоя между матрицей линз и матрицей фотоэлементов) расстоянии, выбранном с учетом фокусного расстояния микролинз. Фотоэлементы стоят по осям микролинз, образуя матрицу с такими же пространственными характеристиками.

Отмеченную в ходе эксперимента склонность цилиндрической ЖК структуры дробиться на капли большего диаметра можно нейтрализовать, если диаметр поры близок к диаметру ЖК цилиндра. Также можно добавить в композит поверхностно-активные вещества, что воспрепятствует формированию мелких капель, так как тогда свободная поверхностная энергия ансамбля капель будет больше, чем у цилиндра.

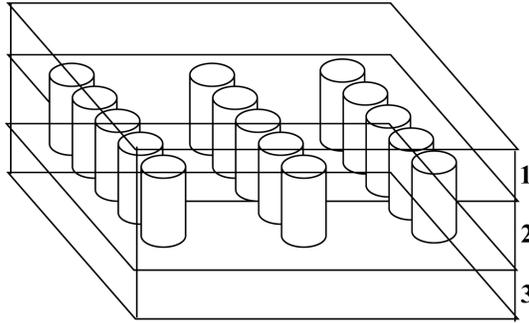


Рис. 7. обозначения: 1 – прозрачный слой сверху (перед матрицей твист-ячеек и микролинз); 2 – непрозрачный слой, содержащий блок твист-ячеек и микролинз (цилиндрические поры, заполненные ЖК); 3 – прозрачный слой, отделяющий микролинзы от фотоэлементов. Фотоэлементы не показаны на рисунке. Свет падает сверху вниз.

Будем в дальнейшем называть торец цилиндрической поры в матрице на рис. 7 подложкой ячейки.

Если направление директора на фронтальной подложке ЖК-ячейки, помещённой между поляризатором и параллельным ему анализатором, совпадает с осью поляризатора, то интенсивность I света, прошедшего через ячейку толщиной L будет равна [9]:

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

где φ_t – угол закрутки твиста, а $q = \pi L \Delta n / \lambda \varphi$. Для 90° твист-эффекта $\varphi_t = \pi/2$.

Интенсивность пропускания I является осциллирующей функцией параметра L/λ . На рис. 8 приведены распределения углов по толщине в твист-ячейке в зависимости от приложенного поля.

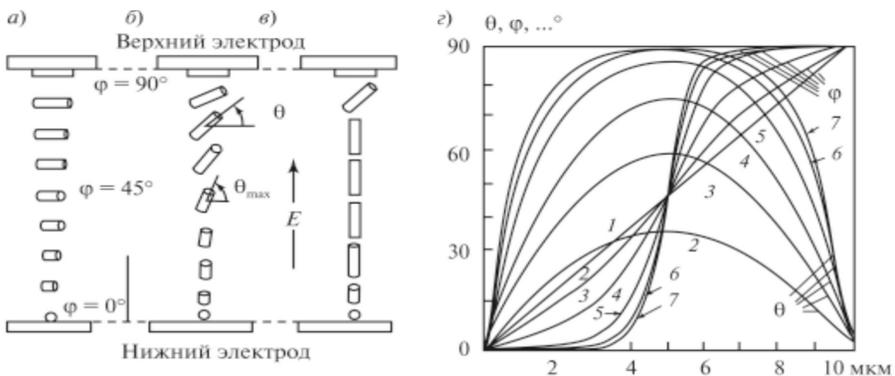


Рис. 8. Твист-эффект в НЖК. Молекулярная ориентация: а) в отсутствии поля; б) при $U \geq U_n$; в) при $U \gg U_n$; г) зависимость углов θ и φ от толщины, где под номером 1 при поле меньше порогового, а под номерами от 2 до 7 при поле, возрастающем до $4U_n$.

Как показано на рис. 8, при отсутствии поля распределение углов по толщине ячейки можно считать линейным, в том числе для случая $K_{33}/K_{11}=1$ будет линейным и распределение угла θ по толщине ячейки.

Исходя из того, что

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

и в то же время разность фазовых задержек

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

получим

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

где

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

Следовательно, можно рассчитать по формуле (1) интенсивность пропускания в параллельных поляризаторах для различных пространственных распределений полярного угла наклона директора.

Симметричная твист-гибридная ячейка (STH)

На рис. 9 показана для STH, то есть твист-гибридной ячейки ЖК с симметричными приповерхностными углами θ и толщиной ЖК слоя L , зависимость интенсивности пропускания I при параллельных поляризаторах от приповерхностных углов и толщины слоя ЖК. $n_o=1,5$, $n_e=1,6$, длина волны света 0,63 мкм, угол закрутки твиста 90° , плоскость поляризации входящего луча света совпадает с директором ЖК на входной поверхности ЖК ячейки.

Симметричная твист-сплей ячейка (STS)

На рис. 10 показана для STS, то есть твист-сплей ячейки ЖК с симметричными приповерхностными углами θ и толщиной ЖК слоя L , зависимость интенсивности пропускания I при параллельных поляризаторах от приповерхностных углов и толщины слоя ЖК. $n_o = 1,5$, $n_e = 1,6$, длина волны света 0,63 мкм, угол закрутки твиста 90° , плоскость поляризации входящего луча света совпадает с директором ЖК на входной поверхности ЖК ячейки.

Симметричная твист-бенд ячейка (STB)

На рис. 11 показана для STB, то есть твист-бенд ячейки ЖК с симметричными приповерхностными углами θ и толщиной ЖК слоя L , зависимость интенсивности пропускания I при параллельных поляризаторах от приповерхностных

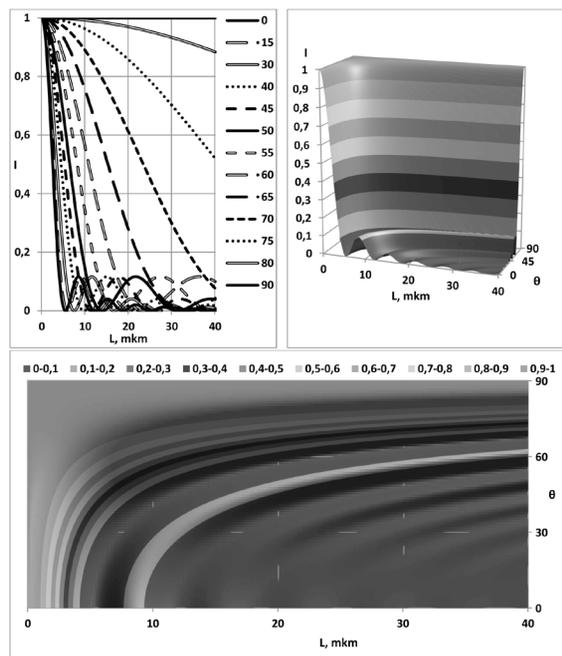


Рис. 9. Для СТН, то есть твист-гибридной ячейки ЖК с симметричными приповерхностными углами, зависимость интенсивности пропускания I при параллельных поляризаторах от приповерхностных углов θ и толщины L слоя ЖК.

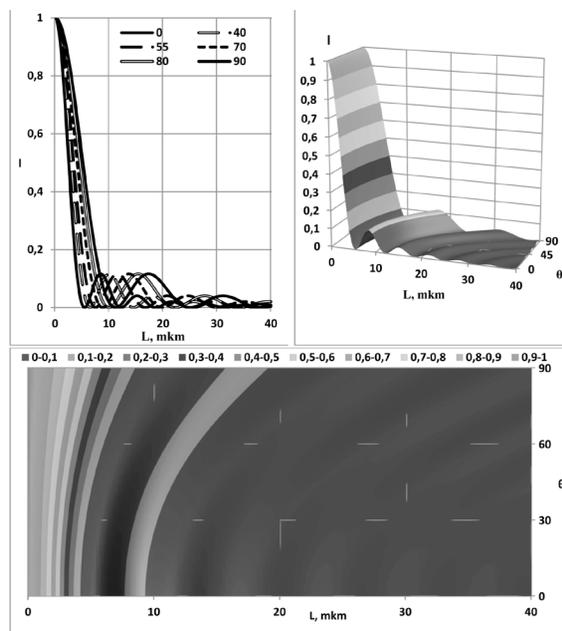


Рис. 10. Для STS, то есть твист-сплей ячейки ЖК с симметричными приповерхностными углами, зависимость интенсивности пропускания I при параллельных поляризаторах от приповерхностных углов θ и толщины L слоя ЖК.

углов и толщины слоя ЖК $n_o = 1,5$, $n_e = 1,6$, длина волны света $0,63$ мкм, угол закрутки твиста 90° , плоскость поляризации входящего луча совпадает с директором ЖК на входной поверхности ЖК ячейки.

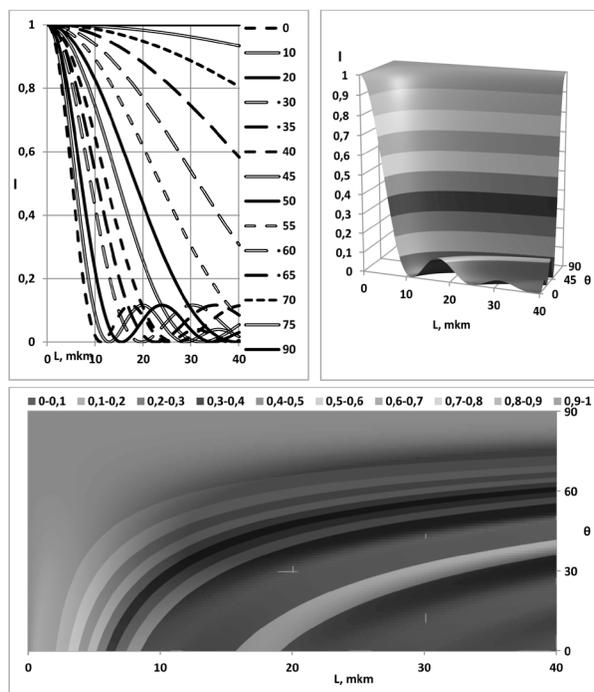


Рис. 11. Для STB, то есть твист-бенд ячейки ЖК с симметричными приповерхностными углами, зависимость интенсивности пропускания I при параллельных поляризаторах от приповерхностных углов θ и толщины L слоя ЖК.

Выводы

Методом оптической поляризационной микроскопии исследованы новые ЖК-композиты с использованием явления образования Рэлеевских мостов жидкости в композитных материалах на основе полимера и нематического жидкого кристалла.

Материалы на базе исследованных ЖК-композитов могут быть использованы в дисплейной технике и оптоэлектронике, например, в качестве волоконно-оптических датчиков, а также при разработке новых устройств для биосовместимой нанoeлектроники.

Разработана методика и смоделированы оптические свойства ячеек ЖК, актуальные для элементной базы средств приема, отображения и обработки информации.

Предложен метод расчёта и выполнена теоретическая и компьютерная модель зависимости интенсивности пропускания от ориентационных параметров ЖК-композитной ячейки.

* * *

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №16-57-00089_Бел_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жаркова Г.М., Сонин А.С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука. 1994. 214 с.
2. Беляев В.В. Дисплеи 90-х годов. М.: Химия, 2000. 91 с.
3. 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. V.21. pp. 4244–4249.
4. 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. V.53. I.29. pp. H51–H57.
5. Беляев В.В., Соломатин А.С. Оптические свойства гибридных жидкокристаллических ячеек при различных углах падения света // *Оптический Журнал*. 2015. Т. 82. № 1. С. 41–48.
6. Belyaev V.V. Solomatin A.S., Chausov D.N. Phase retardation difference of liquid crystal cells with symmetric and asymmetric boundary conditions // *Molecular Crystals & Liquid Crystals*. 2014, vol. 596, pp. 22–29.
7. Беляев В.В., Соломатин А.С., Чаусов Д.Н. Оптические свойства ЖК ячеек с произвольным краевым углом наклона директора // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика*. 2013. № 1. С. 32–41.
8. Соломатин А.С. Линзы на основе жидких кристаллов с неоднородным радиальным распределением директора // *Вестник Московского Государственного областного университета. Серия: Физика-Математика*. 2016. № 3. С. 37–45. DOI: 10.18384/2310-7251-2016-3-37-45
9. Коншина Е.А. Оптика жидкокристаллических сред. СПб: СПб НИУ ИТМО. 2012. 99 с.

REFERENCES

1. Zharkova G.M., Sonin A.S. *Zhidkokristallicheskie kompozity* [Liquid crystal composites]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994. 214 p.
2. Belyaev V.V. *Displei 90-kh godov* [Displays of the 1990s]. Moscow, Khimiya Publ., 2000. 91 p.
3. 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. In: *Optics Express*. 2013, vol. 21, pp. 4244–4249.
4. 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. In: *Applied Optics*. 2014, vol. 53, iss. 29, pp. H51–H57.
5. Belyaev V.V., Solomatin A.S. Optical properties of hybrid liquid crystal cell at various angles of incidence of light. In: *Opticheskii Zhurnal*. T. 82. [Journal of Optics. Vol. 82]. 2015, no. 1, pp. 41–48.
6. Belyaev V.V. Solomatin A.S., Chausov D.N. Phase retardation difference of liquid crystal cells with symmetric and asymmetric boundary conditions. In: *Molecular Crystals & Liquid Crystals*. 2014, vol. 596, pp. 22–29.
7. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Chausov D.N. The optical properties of the LCD cell with arbitrary boundary angle of the Director. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics]. 2013, no. 1, pp. 32–41.

8. Solomatina A.S. Lenses based on liquid crystals with a nonuniform radial distribution of the director. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics And Mathematics]. 2016, no. 3, pp. 37–45.
9. Konshina E.A. *Optika zhidkokristallicheskih sred* [Optics of liquid crystal media]. SPb., SPb NIU ITMO Publ., 2012. 99 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соломатин Алексей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, инженер учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии, Московский государственный областной университет;

e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru

Мащенко Владимир Игоревич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии, Московский государственный областной университет;

e-mail: mashchenko@genebee.msu.su

Шашкова Юлия Олеговна – инженер учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии, Московский государственный областной университет;

e-mail: pirmir123@mail.ru

Беляев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики, Московский государственный областной университет;

e-mail: vic_belyaev@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksei S. Solomatina – PhD in Physico-mathematical Sciences, engineer of the Education & Science Lab for Theoretical and Applied Nanotechnology at the Moscow Region State University;

e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru

Vladimir I. Mashchenko – PhD in Chemical Sciences, senior researcher of the Education & Science Lab for Theoretical and Applied Nanotechnology at the Moscow Region State University;

e-mail: mashchenko@genebee.msu.su

Julia O. Shashkova – engineer of the Education & Science Lab for Theoretical and Applied Nanotechnology at the Moscow Region State University;

e-mail: pirmir123@mail.ru

Victor V. Belyaev – Doctor in Technical Sciences, professor, head of the Department of Theoretical Physics at the Moscow Region State University;

e-mail: vic_belyaev@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Соломатин А.С., Мащенко В.И., Шашкова Ю.О., Беляев В.В. Особенности формирования микроструктуры и оптические свойства жидkokристаллических композитных

твист-ячеек // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика и математика. 2017. № 2. С. 53–63.

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-2-53-63.

CORRECT REFERENCE TO THE ARTICLE

A.S. Solomatin, V.I. Mashchenko, Y.O. Shashkova, V.V. Belyaev. Formation and optical properties of twist structures in a nematic liquid crystal composite. In: *Bulletin of Moscow Region State University*. Series: Physics & Mathematics. 2017, no. 2, pp. 53–63.

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-2-53-63.