

УДК: 532.783; 53.04; 535.016

Н. В. Каманина^{1,2,*}, *Ю. А. Зубцова*¹, *П. В. Кузжаков*¹, *А. Zak*³, *Р. Tenne*^{4,**}

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ СПЕКТРАЛЬНЫМИ, ВРЕМЕННЫМИ И ОРИЕНТАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК С WS₂ НАНОЧАСТИЦАМИ

¹АО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»,
отдел «Фотофизика сред с нанообъектами»,

Кадетская линия, д. 5, корп. 2, 199053 Санкт-Петербург, Россия. *E-mail: nvkamanina@mail.ru

² Санкт-Петербургский электротехнический университет (“ЛЭТИ”),
ул. Профессора Попова, д. 5, 197376 Санкт-Петербург, Россия

³ Holon Institute of Technology, 52 Golomb Street, P.O. Box 305, Holon 58102, Israel

⁴ Weizmann Institute, Department of Materials and Interfaces, Rehovot 76100, Israel,
**E-mail: reshef.tenne@weizmann.ac.il

В настоящей работе на основе анализа спектральных параметров, ориентирующего угла наклона, а также временных зависимостей реакции и релаксации среды: нематическая жидкокристаллическая мезофаза – наночастицы WS₂, установлены корреляционные зависимости, связанные с формированием межмолекулярного взаимодействия между CN-группой жидкого кристалла и WS₂-наночастицами, что подтверждается как экспериментами, так и частично квантово-химическим моделированием.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, процесс сенсibilизации мезофазы, наночастицы WS₂, спектры, угол подвеса молекулярной среды, быстроедействие.

DOI: 10.18083/LCAppl.2020.3.41

N. V. Kamanina^{1,2,*}, *Yu. A. Zubtcova*¹, *P. V. Kuzhakov*¹, *A. Zak*³, *R. Tenne*^{4,**}

CORRELATIONS BETWEEN SPECTRAL, TIME AND ORIENTATION PARAMETERS OF LIQUID CRYSTAL CELLS WITH WS₂ NANOPARTICLES

¹ Lab for Photophysics of media with nanoobjects at Vavilov State Optical Institute
5 Kadetskaya Liniya V.O., korpus 2, Saint-Petersburg, 199053, Russia. *E-mail: nvkamanina@mail.ru

² Saint-Petersburg Electrotechnical University (“LETI”),
5 Prof. Popova St., Saint-Petersburg, 197376, Russia

³ Holon Institute of Technology, 52 Golomb Street, P.O. Box 305, Holon 58102, Israel

⁴ Weizmann Institute, Department of Materials and Interfaces, Rehovot 76100, Israel,
** E-mail: reshef.tenne@weizmann.ac.il

Based on the analysis of spectral parameters, orientation angle, and the time dependency of the reaction and relaxation of the media composed of the nematic liquid crystal mesophase and WS₂ nanoparticles, the correlation associated with the formation of intermolecular interaction between CN-group of the liquid crystal and WS₂ nanoparticle has been established. The correlation was supported by experiments and partially by quantum-chemical modeling.

Key words: liquid crystals, sensitization process of LC mesophase, WS₂ nanoparticles, spectra, molecular media wetting angle, speed.

I. Введение

Известно, что электрическое поле, приложенное к жидкому кристаллу (ЖК), или протекающий через ЖК-среду электрический ток способны переориентировать молекулы ЖК [1–5]. Воздействие электрического поля на ЖК приводит к электрооптическим и динамическим эффектам, не имеющим аналогов среди прочих оптических кристаллических или полимерных сред. Изменение ориентации директора в электрическом поле можно наблюдать при измерении зависимости от поля какого-либо анизотропного параметра, например двулучепреломления, Δn . Метод управляемого двулучепреломления четко описан в классических, широко известных публикациях [2, 4, 5], его использование в приборах представлено, в том числе, в работах [4–9]. В исходном состоянии молекул директор ЖК направлен вдоль оси x и слой нематического жидкого кристалла (НЖК) обладает двулучепреломлением $\Delta n = n_e - n_o = n_{\parallel} - n_{\perp}$. Когда внешнее поле превышает пороговое, молекулы отклоняются от направления вдоль оси x , оставаясь перпендикулярными направлению оси y . Поэтому коэффициент преломления для обыкновенного луча при такой деформации остается неизменным, $n_o = n_{\perp}$. В то же время коэффициент для необыкновенного луча (n_e) уменьшается, стремясь к n_o . Можно связать n_e с углом ориентации директора $\Theta(z)$ [4]:

$$n_e(z) = \frac{n_{\perp} n_{\parallel}}{\sqrt{n_{\perp}^2 \cos^2 \Theta(z) + n_{\parallel}^2 \sin^2 \Theta(z)}}. \quad (1)$$

В такой среде интенсивность света, прошедшего через ячейку и анализатор, зависит от угла ϕ между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора НЖК, а также от фазовой задержки между обыкновенным и необыкновенным лучами.

По сути, в ЖК реализуется четвертый электрооптический эффект, существенно зависящий от ориентации молекулярной среды. Другие известные эффекты: эффект Поккельса [10], когда величина разности фаз лучей пропорциональна первой степени напряженности электрического поля; эффект Керра [11], когда величина двойного луче-

преломления пропорциональна квадрату напряженности поля и ее знак не изменяется при изменении направления поля на противоположное; высококачественный эффект Керра, когда значение показателя преломления зависит от интенсивности световой волны, квадратично связанной с напряженностью электрического поля электромагнитной волны [12]. Естественно, такие факторы, как изначальное создание рельефа поверхности на границе раздела фаз: твердая подложка-ЖК [13, 14], фото-ориентирование [15–17], сенсбилизация мезофазы разного рода наночастицами [14, 18, 19], определенная конфигурация электрических управляющих импульсов [4], варьирование вязкости среды [20, 21], др. существенно влияют на базовые характеристики ЖК, используемые в разных оптико-электронных приборах.

В настоящей работе при многократных наблюдениях установлены корреляционные зависимости между спектральными параметрами, концентрацией наночастиц, углом подвеса молекул сенсбилизированного ЖК на подложке и временными характеристиками ячейки на основе системы: ЖК–наночастицы WS_2 . Стоит обратить внимание, что данная работа является логическим продолжением исследований, начатых для системы ЖК– WS_2 наночастицы, представленных ранее в публикации [22].

2. Экспериментальные условия

В данном исследовании использовались ЖК-структуры 4-pentyl-4-biphenylcarbonitrile, 98 %, приобретенные в фирме *Aldrich Co*. Вручную собирались ЖК-ячейки толщиной 10 микрон в *twist*-конфигурации. Ориентирующий рельеф был выполнен с использованием углеродных нанотрубок (УНТ), осажденных лазерным ориентированным способом в электрическом поле с напряженностью 100 В/см и обработанных поверхностной электромагнитной волной по аналогии, как показано в работе [23]. Наночастицы WS_2 были предоставлены специалистами группы профессора *Reshef Tenne*, скрупулезно изучающими свойства данных систем [24–26]. Размер наночастиц по диаметру был равен ~30 нм. Тестировались ЖК-ячейки с разной концентрацией вводимых наночастиц WS_2 , а именно: 0,05; 0,1; 0,3 мас. %, в сравнении с чистыми ЖК-матрицами.

Для изучения спектральных характеристик, с целью наблюдения проявления bathochromного сдвига применялся спектрофотометр СФ-26, функционирующий в диапазоне длин волн 200–1200 нм. Для контроля спектральных измерений используются калиброванные фильтры. Ошибка в измерениях спектров составляла около 0,2 %. Для измерения угла наклона капли сенсibilизированных ЖК-составов с разной концентрацией наночастиц на создаваемом рельефе поверхности использовался прибор ОСА 15ЕС. Проведено достаточно большое количество измерений наклона капли сенсibilизированного ЖК, естественно, в сравнении с чистой матрицей, при использовании двух созданных рельефов на проводящем контакте ИТО. Первый тип рельефов соответствовал обработке ИТО-слоя осажденными лазерным методом углеродными нанотрубками без их ориентации в электрическом поле и далее обработанных поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ). Второй вид рельефов был создан с использованием углеродных нанотрубок, осаждаемых на ИТО при ориентировании в электрическом поле напряженностью 100 В/см с последующей обработкой ПЭВ. Временные параметры исследования проводились по схеме Фредерикса в «режиме на проход» аналогично [27]. Квантово-химическое моделирование было выполнено с помощью программ *GaussView5.0*, *Gaussian 09W* [28–30], соответственно; применен по умолчанию метод расчета и атомный базисный набор Хартри – Фока HF/STO-3G SP.

3. Результаты и обсуждение

Основные результаты проведенного исследования показаны на рис. 1–4. Проанализируем данные, представленные на рис. 1. Видно, что при проведении процесса сенсibilизации ЖК-матрицы наночастицами WS_2 наблюдается сдвиг спектра в ИК-область при концентрации наночастиц 0,05–0,1 мас. %, дальнейшее увеличение концентрации вводимого сенсibilизатора приводит к существенному уменьшению пропускания без каких-то явных спектральных пиков и полос в ИК-области. По нашему предположению, именно в области концентраций, указанных выше, происходит процесс межмолекулярного комплексообразования между молекулой ЖК и наночастицей; вероятнее всего, что этот процесс осуществляется при разрыве одной из тройных связей CN-группы ЖК. Проведенное квантово-химическое моделирование позволило

построить такую качественную картину, показанную на рис. 2. Естественно, таковые расчеты будут проведены более детально в последующем, однако уже на данном этапе вполне показательна корреляция между спектральными результатами и первыми квантово-химическими данными.

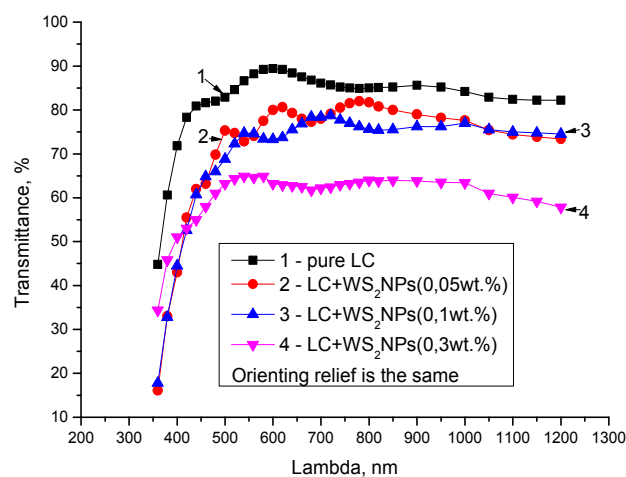


Рис. 1. Спектральные зависимости ЖК-структуры, сенсibilизированной наночастицами WS_2 с разной концентрацией: 0 мас. % (кривая 1), 0,05 мас. % (кривая 2), 0,1 мас. % (кривая 3) и 0,3 мас. % (кривая 4)

Fig. 1. Spectral dependences of the LC cells sensitized with WS_2 nanoparticles of different concentration: 0 wt. % (curve 1), 0,05 wt. % (curve 2), 0,1 wt. % (curve 3) and 0,3 wt. % (curve 4)

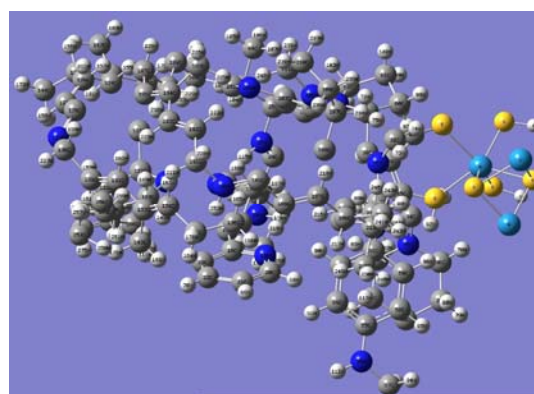


Рис. 2. Качественная модель возможного взаимодействия между молекулой ЖК и наночастицей WS_2 , полученная с помощью программы *GaussView5.0*, *Gaussian 09W*

Fig. 2. Qualitative model of possible interaction between LC-molecule and WS_2 nanoparticle obtained by the *GaussView5.0* program of *Gaussian 09W*

На рисунке 3 приведены результаты установленной зависимости угла наклона капли сенсibilизированного ЖК от концентрации наночастиц при использовании разных рельефов поверхности. Видно, что ковалентная привязка к поверхности ИТО углеродных нанотрубок, ориентированно осаждаемых на поверхность проводящего контакта, что нами было представлено ранее в работе [14], приводит к увеличению угла наклона практически в 2 раза.

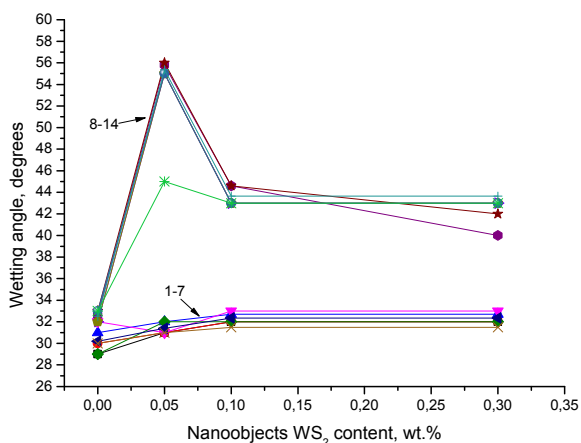


Рис. 3. Зависимость угла наклона капли сенсibilизированного ЖК от концентрации наночастиц при использовании разных рельефов поверхности: кривые 1–7 получены для рельефа ИТО+УНТ (осаждение без поля)+ПЭВ; кривые 8–14 получены для рельефа ИТО+УНТ(осаждение при напряженности электрического поле 100 В/см)+ПЭВ

Fig. 3. Wetting angle dependence of LC drops on different nanoparticles content were obtained using the ITO+CNTs relief: curves 1–7 – deposition without electric field +SEW; curves 8–14 – deposition at the electric field strength of 100 V/cm + SEW

Обратим вновь внимание на результаты, представленные на рис. 3. Четко проявляется тенденция сохранения угла наклона капли сенсibilизированного ЖК при конкретном значении концентрации вводимого сенсibilизатора. Такую тенденцию мы ранее установили и для другого материала, а именно: поливинилового спирта (ПВС),

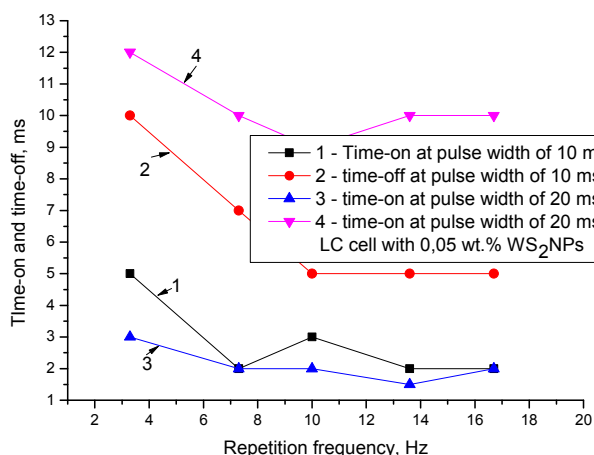
сенсibilизированного фуллеренами и УНТ. Вполне вероятен вывод о том, что для каждой органической системы существует конкретное значение или близкий диапазон значений угла наклона молекул такого материала на поверхности, коррелирующее с вводимой концентрацией сенсibilизатора.

Как следует из данных рис. 3, для ЖК с наночастицами WS_2 неизменное значение угла наклона сохраняется при концентрации наночастиц на уровне 0,1 мас. %, естественно, изменяясь по величине в зависимости от рельефа самой поверхности. Таким образом, учитывая и спектральные данные, можно постулировать, что, скорее всего, концентрация 0,1 мас. % является оптимальной для сенсibilизации нематического ЖК такими наночастицами.

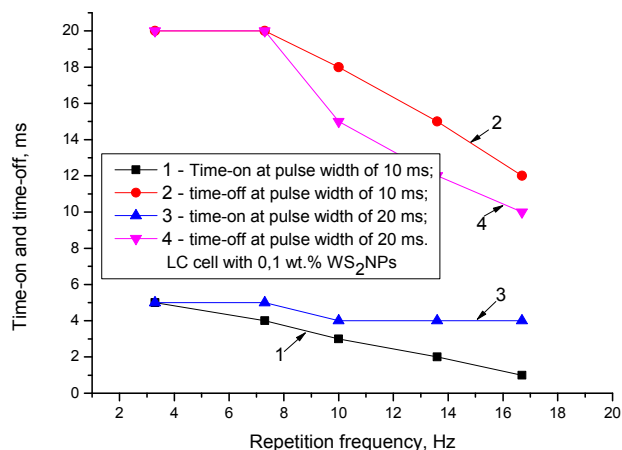
На рисунке 4 показаны временные параметры ЖК-ячеек, исследованных при варьировании концентрацией WS_2 наночастиц.

Анализируя временные зависимости, показанные на рис. 4, видно, что соблюдается классическая тенденция уменьшения времени реакции и релаксации среды при увеличении частоты следования импульсов питания, с учетом и влияния на процесс образования двойных электрических слоев при увеличении длительности импульсов питания. Однако здесь интересно вновь обратиться к корреляции между концентрацией вводимого сенсibilизатора и быстродействием ЖК-ячейки. Как видно, наиболее приемлемое быстродействие получено как раз при концентрации наночастиц в диапазоне 0,05–0,1 мас. %, что хорошо связано как с батохромным сдвигом в ИК-область спектральных параметров, так и со стационарностью угла наклона молекул сенсibilизированного ЖК на создаваемом рельефе.

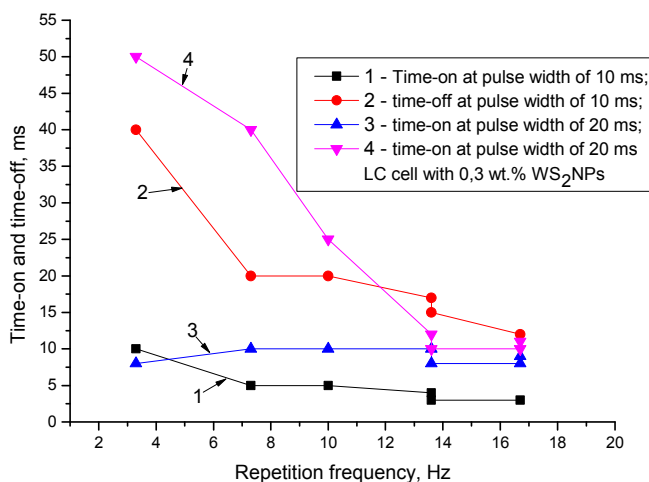
Заметим, что, вероятнее всего, процесс взаимодействия между ЖК-матрицей и введенным сенсibilизатором WS_2 связан с созданием дополнительного дипольного момента, ростом параметра порядка с возможным переходом в квази-сметическую мезофазу, а следовательно, и с измененной поляризацией среды, что было объяснено ранее для ЖК с фуллеренами, а также для полиимидных и пиридиновых композиций [31–35].



a



b



c

Рис. 4. Временные параметры (время включения t_{on} и выключения t_{off}) ЖК-ячеек с разной концентрацией наночастиц при: 0,05 (a), 0,1 (b) и 0,3 мас. % WS₂ (c). Временные зависимости представлены при варьировании длительности импульса питания в зависимости от частоты следования импульсов питания

Fig. 4. Time parameters (on time t_{on} and off time t_{off}) of LC cells with different concentrations of WS₂-nanoparticles: 0,05 wt. % (a), 0,1 wt. % (b) and 0,3 wt. % (c). Time dependencies are presented at the power pulse duration varied depending on the power pulse repetition frequency

В настоящем исследовании появляется перспектива модельно расширить класс сенсibilизаторов ЖК, ранее и ныне используемых нами для модификации свойств нематических жидких кристаллов; такое модельное представление показано на

рис. 5. К числу применяемых нами сенсibilизаторов на основе нано- и биочастиц добавлены наночастицы WS₂ и MoS₂, последние предполагается применить для сенсibilизации ЖК в последующих исследованиях.

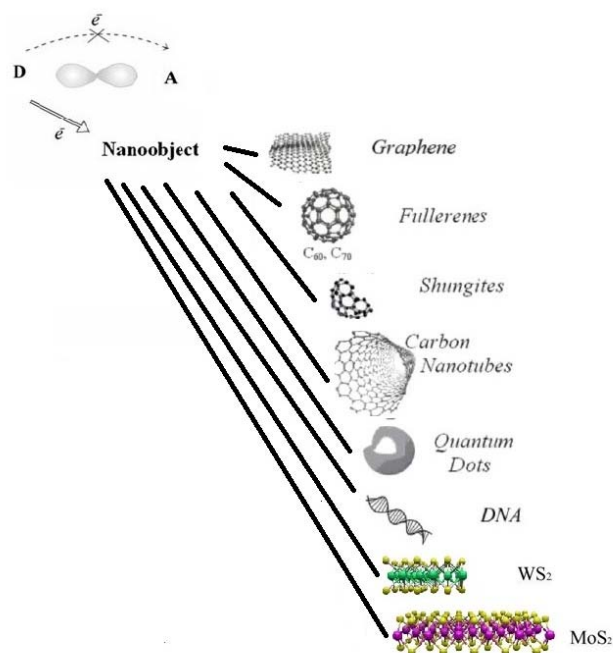


Рис. 5. Модель использования разного рода нано- и биоструктур для реализации процесса межмолекулярного взаимодействия, преобладающего над внутримолекулярным

Fig. 5. A model for using different types of nano- and bio-structures to implement the process of intermolecular interaction which prevails over intramolecular one

Заключение

Анализируя полученные и представленные в данной публикации результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Наночастицы WS_2 вполне могут дополнить ряд сенсibilizаторов, применяемых для изменения свойств нематических жидких кристаллов с целью варьирования спектральных и временных параметров.

2. На основе спектральных зависимостей и их корреляции как с временными параметрами, так и с углом подвеса капли воды на поверхности подложки, можно предположить наличие процесса комплексообразования между CN-группой ЖК и наночастицей WS_2 . Данный процесс, естественно, требует дополнительных исследований, однако вполне вероятно, что такое межмолекулярное взаимодействие в данной, конкретной структуре может быть объяснено ранее выявленными тенденциями роста дипольного момента, параметра порядка и поляризации в сенсibilizированных ЖК-матрицах в сравнении с чистыми ЖК-системами.

3. Установлено, что для структуры ЖК- WS_2 наночастица существует определенный диапазон концентраций, а именно: 0,05–0,1 мас. %, при котором проявляется спектральный сдвиг в ИК-область, наблюдается постоянное значение угла подвеса капли сенсibilizированного ЖК на поверхности, а также обнаруживаются наиболее приемлемые по быстрдействию временные параметры.

4. Выполненные квантово-химические расчеты частично подтверждают возможный процесс взаимодействия между молекулами ЖК и наночастицами WS_2 .

5. Расширение числа нано-сенсibilizаторов для нематических ЖК-матриц может быть полезно как для накопления фундаментальных знаний в материаловедческой области, так и для дальнейшего практического развития дисплейных технологий, а также для совершенствования базовых оптоэлектронных приборов, используемых в телекоммуникационных, лазерных схемах, системах поглощения газов и примесей, в биомедицине.

Авторы благодарят д-ра хим. наук Н. Н. Рожкову (Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск) и д-ра тех. наук В. В. Беляева (МГОУ, Москва) за полезное обсуждение полученных результатов, а также выражают признательность своим коллегам по лаборатории «Фотофизика сред с нанобъектами» (АО «ГОИ им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург) за помощь в работе и конструктивные вопросы на лабораторных семинарах.

Исследования выполнены при частичной поддержке внутренней темы АО «ГОИ им. С. И. Вавилова «ЖК-WS₂», 2019-2020.

Список литературы / References

- Adamczyk A., Strugaiski Z. Liquid Crystals. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warsaw, 1976 [in Polish].
- Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М. : Наука, 1978. 384 с. [Blinov L.M. Electrooptics and Magneto-optics of Liquid Crystals. Moscow : Nauka, 1978, 384 p. (in Russ.)].
- Чандрасекар С. Жидкие кристаллы. М. : Мир, 1980. 344 с. [Chandrasekar S. Liquid crystals. M. : Mir, 1980, 344 p.].
- Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфёнов А. В. Пространственные модуляторы света. М. : Радио и связь, 1987. 320 с. [Vasiliev A.A., Kasasent D., Kompanets I.N., Parfenov A.V. Spatial Light Modulators. M. : Radio and communication, 1987, 320 p.].
- Беляев В. В. Жидкокристаллические дисплеи. Технологии настоящего и будущего. Часть 1. От пикселя до гибкой подложки // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2015. № 8 (148). С. 36–47. [Belyaev V.V. Liquid crystal displays. Technologies of the present and future. Part 1. From a pixel to flexible substrate. *Electronics: Science, technology, business*, 2015, 8, 36–47. (in Russ.)].
- McEwen R.S. Liquid crystals, displays and devices for optical processing. *J. Phys. B: Sci. Instrum.*, 1987, **20**, 364–377.
- Schadt M. Linear and non-linear liquid crystal materials, electro-optical effects and surface interactions. Their application in present and future devices. *Liq. Cryst.*, 1993, **14** (1), 73–104.
- Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск : Наука, 1994. 214 с. [Zhar-kova G.M., Sonin A.S. Liquid crystal composites. No-vosibirsk : Nauka, 1994, 214 p. (in Russ.)].
- de Gennes P.G., Prost J. The Physics of Liquid Crystals. Second Edition, Oxford Science Publications, 1995, 616 p.
- Ландсберг Г. С. Оптика. М. : Наука, 1976. 926 с. [Landsberg G.S. Optics. M. : Nauka, 1976, 926 p. (in Russ.)].
- Сивухин Д. В. Общий курс физики. 3-е изд., стереотип. М. : Физматлит, МФТИ, 2002. Т. IV: Оптика. 792 с. [Sivukhin D.V. Basic course of physics. 3rd Editions, Moscow : Phys. Math. Lit., MPhTU, 2002, 792 p. (in Russ.)].
- Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. М. : МГУ, 1998. 656 с. [Akhmanov S.A., Nikitin S.Yu. Physical Optics. M. : Izd. Moscow University, 1998, 656 p. (in Russ.)].
- Цой В. И., Тарасишин А. В., Беляев В. В., Трофимов С. М. Моделирование дифракции света с пространственной периодичностью оптических параметров вещества и рельефа поверхности // *Оптический журнал*. 2003. Т. 70, № 7. С. 18–23. [Tsoi V.I., Tarasishin A.V., Belyaev V.V., Trofimov S.M. Modeling of light diffraction with spatial frequency of optical parameters of matter and surface relief. *Optical Journal*, 2003, **70** (7), 18–23. (in Russ.)].
- Kamanina N.V., Zubtcova Yu.A., Kukharchik A.A., Lazar C., and Rau I. Control of the IR-spectral shift via modification of the surface relief between the liquid crystal matrixes doped with the lanthanide nanoparticles and the solid substrate. *Optics express*, 2016, **24** (2), 6 pages.
- Chigrinov V.G., Kozenkov V.M., Kwok H.S. New developments in photo-aligning and photo-patterning technologies: physics and applications. *Optical Applications of Liquid Crystals* / Ed. by L. Vicari. Bristol and Philadelphia, Institute of Physics Publishing, 2003, 201–244.
- Xu P., Li X., Chigrinov V. Double Cells Achromatic Ferroelectric Liquid Crystal Displays Using Photoalignment Technology. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **45** (1A), 200–202.
- Казак А. А., Мельникова Е. А., Толстик А. Л., Могильный В. В., Станкевич А. И. Управляемые дифракционные жидкокристаллические структуры на основе полимерного фотоориентанта // *Письма в ЖТФ*. 2008. Т. 34, вып. 20. С. 1–7. [Kazak A.A., Melnikova E.A., Tolstik A.L., Mogilny V.V., Stankevich A.I. Controlled diffraction liquid-crystal structures with a photoalignment polymer. *Letters to ZhTF*, 2008, **34** (10), 861–863.].
- Khoo I.C., Wood M.V., Guenther B.D. Liquid crystals for fast infrared laser switching and optical limiting application. *Proceed. of Symposium "Materials for optical limiting"*, 1998, 229–234. (31 March – 2 April 1997, San Francisco, CA, USA).
- Kurilov A.D., Kazak A.V., Usoltseva N.V., Smirnova A.I., Velichko V.K., Belyaev V.V., Gevorkyan E.V., Rozhkova N.N. Dielectric Properties of Liquid Crystalline Composites with Nanoscale Fragments of Graphene and Shungite Carbon. *Liquid Crystals*, 2019, **46** (9), 1345–1352.

20. Беляев В. В. Физические методы измерения коэффициентов вязкости нематических жидких кристаллов. *УФН*, 2001. Т. 171, № 3. С. 267–298. [Belyaev V.V. Physical methods of measuring the viscosity coefficients of nematic liquid crystals. *Uspekhi Phys.*, 2001, **171** (3), 267–298. (in Russ.)].
21. Pasechnik S.V., Chigrinov V.G., Shmeliova D.V. *Liquid Crystals, Viscous and Elastic Properties*. Berlin, Wiley-VCH, 2009, 424 p. <http://www.wiley-vch.de/publish/dt/books/bySubjectEE00/ISBN3-527-40720-0/?sID=58scjhajapfe2rjeet4pst280>.
22. Каманина Н. В., Зубцова Ю. А., Тойкка А. С., Лихоманова С. В., Zak A., Tenne R. Временные характеристики жидкокристаллической ячейки с наночастицами WS₂: сенсibilизация мезофазы и особенности рельефа // *Жидк. крист. и их пратич. использ.* 2020. Т. 20, № 1. С. 34–40. [Kamanina N.V., Zubtcova Yu.A., Toikka A.S., Likhomanova S.V., Zak A., Tenne R. Temporal characteristics of liquid crystal cell with WS₂ nanoparticles: mesophase sensitization and relief features. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2020, **20** (1), 34–40. DOI: 10.18083/LCAppl.2020.1.34].
23. Патент России № 2405177 (RU 2 405 177 C2). Оптическое покрытие на основе ориентированных в электрическом поле углеродных нанотрубок для оптического приборостроения, микро- и наноэлектроники при нивелировании границы раздела сред: твердая подложка – покрытие / Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И., приоритет от 23 декабря 2008 г.; зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 ноября 2010 г. [Russian Patent № 2405177 (RU 2 405 177 C2). Optical coating based on electric field-oriented carbon nanotubes for optical instrumentation, micro- and nanoelectronics when leveling the interface of media: solid substrate – coating / N.V. Kamanina, P.Ya. Vasiliev, V.I. Studenov; priority of December 23, 2008; registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on November 27, 2010 (in Russ.)].
24. Tenne R., Margulis L., Genut M., Hodes G. Polyhedral and cylindrical structures of tungsten disulphide. *Nature*, 1992, **360**, 444–446.
25. Višić B., Panchakarla L.S., Tenne R. Inorganic Nanotubes and Fullerene-like Nanoparticles at the Crossroads between Solid-State Chemistry and Nanotechnology. *J. Am. Chem. Soc.*, 2017, **139**, 12865–12878.
26. Yadgarov L., Visic B., Abir T., Tenne R., Polyakov A.Yu., Levi R., Dolgova T.V., Zubyuk V.V., Fedyanin A.A., Goodilin E.A., Ellenbogen T., Tenne R., Oron D. Strong light–matter interaction in tungsten disulfide nanotubes. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2018, **20**, 20812–20820. DOI: 10.1039/c8cp02245c.
27. Kamanina N.V., Berendyaev V.I. Influence of solid – liquid crystal interface on characteristics of liquid crystal cells. *Proceed. SPIE*, 1998, **3292**, 154–158. San Jose, CA, USA, 1998. DOI: 10.1117/12.305502.
28. Бутырская Е. В. Компьютерная химия: Основы теории и работа с программами Gaussian и Gaussview. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. 224 с. [Butyrskaya E.V. Computer chemistry: Fundamentals of theory and work with Gaussian and Gaussview programs. M.: Solon press, 2011, 224 p. (in Russ.)].
29. Ochterski J.W. *Thermochemistry in Gaussian*. Gaussian, Inc., 2000, 19 p.
30. The official Gaussian website [В интернете: <http://www.gaussian.com/index.htm>]
31. Каманина Н. В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации. *Успехи физических наук*. 2005. Т. 175, № 4. С. 445–454. [Kamanina N.V. Fullerene-dispersed liquid crystal structure: dynamic characteristics and self-organization processes. *Physics-Uspekhi*, 2005, **48** (4), 419–427.].
32. Каманина Н. В., Комолкин А. В., Евлампиева Н. П. Изменение параметра ориентационного порядка в структуре композита нематический жидкий кристалл–COANP–C₇₀ // *Письма в ЖТФ*. 2005. Т. 31, № 11. С. 65–70. [Kamanina N.V., Komolkin A.V., Yevlampieva N.P. Variation of the Orientational Order Parameter in a Nematic Liquid Crystal–COANP–C₇₀ Composite Structure. *Tech. Phys. Lett.*, 2005, **31** (6), 478–480].
33. Kamanina N.V., Emandi A., Kajzar F., Attias A.-J. Laser-Induced Change in the Refractive Index in the Systems Based on Nanostructured Polyimide: Comparative Study with Other Photosensitive Structures. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2008, **486**, 1–11.
34. Kamanina N.V., Serov S.V., Savinov V.P., Uskoković D.P. Photorefractive and photoconductive features of the nanostructured materials. *International Journal of Modern Physics B (IJMPB)*, 2010, **24** (6–7), 695–702.
35. Каманина Н. В. Влияние пути переноса заряда при межмолекулярном комплексообразовании на нелинейно-оптические и фотопроводниковые характеристики нанокompозитов // *Письма в ЖТФ*. 2012. Т. 38, вып. 3. С. 25–32. [Kamanina N.V. The Effect of the Charge Transfer Pathway during Intermolecular Complex Formation on Nonlinear Optical and Photoconducting Properties of Nanocomposites. *Technical Physics Letters*, 2012, **38** (2), 114–117].

Поступила 4.08.2020 г.

Received 4.08.2020

Принята 26.08.2020 г.

Accepted 26.08.2020