

УДК: 532.783; 53.04; 535.016

Н. В. Каманина^{1,2}, *Ю. А. Зубцова*¹, *А. С. Тойкка*², *С. В. Лихоманова*¹, *А. Зак*^{3,4}, *Р. Тенне*^{3,*}

**ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ
С НАНОЧАСТИЦАМИ WS₂: СЕНСИБИЛИЗАЦИЯ МЕЗОФАЗЫ
И ОСОБЕННОСТИ РЕЛЬЕФА**

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.

³Weizmann Institute, Department of Materials and Interfaces,

Rehovot 76100, Israel. *E-mail: reshef.tenne@weizmann.ac.il

⁴ Holon Institute of Technology, Faculty of Sciences, 52 Golomb Street, Holon 58102, Israel

В настоящей работе рассмотрены временные параметры (время реакции и релаксации среды) жидкокристаллической ячейки, сенсibilизированной наночастицами WS₂ и сконструированной с учетом модификации проводящего покрытия ITO углеродными нанотрубками. Углеродные нанотрубки осаждались на поверхность проводящего слоя вертикально с применением лазерного метода и ориентационного воздействия электрического поля с напряженностью 600 В/см. Использование двух управляющих функций, а именно процесса сенсibilизации объема мезофазы и наноструктурирование поверхности раздела твердое тело – жидкий кристалл, позволило повысить быстродействие переключения мезофазы и существенно снизить сопротивление проводящих слоев, выполняющих роль ориентанта и проводника.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, процесс сенсibilизации мезофазы, наночастицы WS₂, рельеф поверхности границы раздела, углеродные нанотрубки, лазерный ориентированный метод осаждения.

DOI: 10.18083/LCAppl.2020.1.34

N. V. Kamanina^{1,2}, *Yu. A. Zubtsova*¹, *A. S. Toikka*², *S. V. Likhomanova*¹, *A. Zak*^{3,4}, *R. Tenne*^{3,*}

**TEMPORAL CHARACTERISTICS OF LIQUID CRYSTAL CELL WITH WS₂ NANOPARTICLES:
MESOPHASE SENSITIZATION AND RELIEF FEATURES**

¹ Vavilov State Optical Institute, Department of Photophysics of Media with Nanoobjects,

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 Weizmann Institute, Department of Materials and Interfaces,

Rehovot 76100, Israel. *E-mail: reshef.tenne@weizmann.ac.il

⁴ Holon Institute of Technology, Faculty of Sciences, 52 Golomb Street, Holon 58102, Israel

Time parameters (reaction time and relaxation time of medium) of liquid crystal cell sensitized with WS₂ nanoparticles and constructed taking into account the modification of the conductive ITO coating by carbon nanotubes are considered. Carbon nanotubes were vertically deposited on the surface of the conductive layer using the laser method and the orientation effect of an electric field with a strength of 600 V/cm. The use of two control functions, namely: the sensitization process of mesophase volume and nanostructuring of the solid – liquid crystal interface allowed increasing the mesophase switching performance and significantly reducing the resistance of the conductive layers acted as orientant and conductor.

Key words: liquid crystals, sensitization process of LC mesophase, WS₂ nanoparticles, surface relief of interface, carbon nanotubes, laser oriented deposition method.

Введение

Известно, что оптимизацией свойств жидкокристаллической (ЖК) среды занимается довольно много научно-технических групп [1–9]. Внимание уделяется ряду основных параметров: разрешению, чувствительности, контрасту, быстродействию. Естественно, что для конкретных условий применения ЖК-среды выбирается компромисс между базовыми свойствами. Учитываются условия на границе раздела слоев в сложной конструкции ЖК-ячейки, условия питания и облучения ЖК-мезофазы, способы ориентирования ЖК-молекул, а также модификация мезофазы разного рода частицами, как то: фуллеренами, квантовыми точками, шунгитами, оксидами графена, *J*-агрегатами, др. [10–23]. Вполне понятно, что как процесс сенсбилизации ЖК, так и граничные условия существенно влияют на физические свойства ЖК, в том числе на временные параметры устройств на их основе,

характеризующие реакцию и релаксацию мезофазы.

В настоящем исследовании для структурирования ЖК-среды были применены наночастицы WS_2 , а рельеф поверхности модифицирован углеродными нанотрубками (УНТ), осаждаемыми вертикально в электрическом поле напряженностью 600 В/см с последующей обработкой поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ-SEW).

Экспериментальные условия

Результаты экспериментов по изучению однородности ЖК-ячейки с введенными наночастицами WS_2 представлены на рис. 1. На рисунке 1, *a* приведена лабораторная экспериментальная установка для визуализации особенностей ЖК-мезофазы, модифицированной наночастицами, указанными выше; на рис. 1, *б* показана картина ориентированного распределения наночастиц вдоль направления укладки ЖК-молекул.

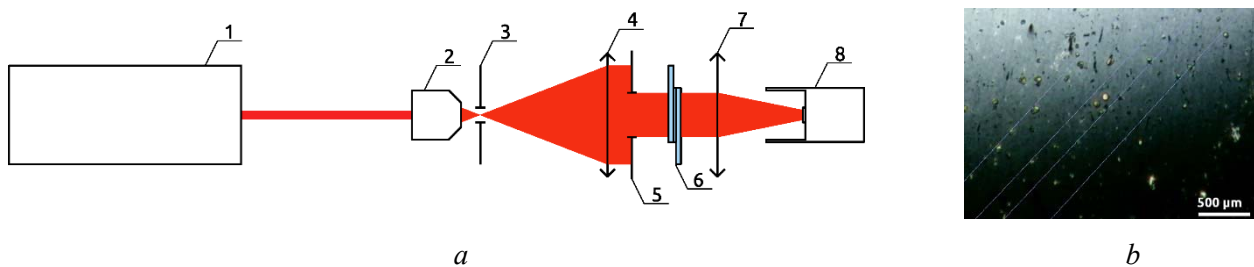


Рис. 1. Установка для изучения однородности среды (*a*) и вид распределения наночастиц WS_2 в мезофазе (*b*): 1 – He-Ne-лазер; 2 – объектив микроскопа; 3 – диафрагма для чистки пучка; 4 – линза или объектив, что дают параллельный пучок; 5 – прямоугольная диафрагма с соотношением сторон 16:9 для соответствия пучка размерам кадра веб-камеры; 6 – исследуемая ЖК-ячейка; 7 – линза, собирающая пучок в размер матрицы веб-камеры (диагональ 1/6 дюйма или 4,23 мм); 8 – веб-камера

Fig. 1. Setup for the study of media homogeneity (*a*) and the distribution view of WS_2 nanoparticles in LC-mesophase (*b*): 1 – He-Ne-laser; 2 – microscope lens (objective); 3 – aperture for cleaning a beam; 4 – lens or objective that give a parallel beam; 5 – rectangular aperture with an aspect ratio of 16: 9 to match the beam to the size of the webcam frame; 6 – the investigated LC cell; 7 – lens collecting the beam in the size of the webcam matrix (diagonal 1/6 inch or 4.23 mm); 8 – webcam

Стоит отметить, что данные по однородности приведены для ЖК-ячейки с введенными наночастицами WS_2 на уровне 0,5 вес. %. Использовались ЖК-структуры 4-pentyl-4-biphenylcarbonitrile, 98 %, приобретенные в фирме *Aldrich Co*. Толщина ячейки была 10 мкм. Наночастицы WS_2 были детально изучены и синтезированы в группе профессора *Reshef Tenne* [24–28]. Размер наночастиц по диаметру был равен примерно 30 нм. Стоит

обратить внимание на тот факт, что технологии формирования разных видов наночастиц также детально показаны в работе [29].

Что касается конструирования ЖК-ячейки, она была собрана в классической *S*-конфигурации, однако проводящие контакты подвергались осаждению УНТ с применением лазерной технологии, описанной в патентах [30–32].

Применялся CO₂-лазер с *p*-поляризованным излучением на длине волны 10,6 мкм мощностью 30 Вт. Электрическая схема ориентированного осаждения УНТ размещалась под вакуумным колпаком и позволяла варьировать напряженность электрического поля в диапазоне 100–600 В/см. Вариант схемного решения установки для такого процесса приведен в работе [33]. Углеродные нанотрубки (*SWCNTs*, *mun № 704121*, с варьируемым диаметром в диапазоне 0,7–1,1 нм) были приобретены в фирме *Aldrich Co*. Сопротивление ITO-контактов изменялось с ориентированным осаждением УНТ и последующей обработкой поверхностной электро-

магнитной волной (ПЭВ) следующим образом: 700 Ом→500 Ом→200 Ом.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 приведены осциллограммы, показывающие изменение отклика сенсibilизированной ЖК-среды с наночастицами WS₂ при разных условиях управляющего воздействия. Видно, что временные параметры, характеризующие реакцию и релаксацию ЖК-мезофазы чистой и сенсibilизированной ЖК-ячейки, различны.

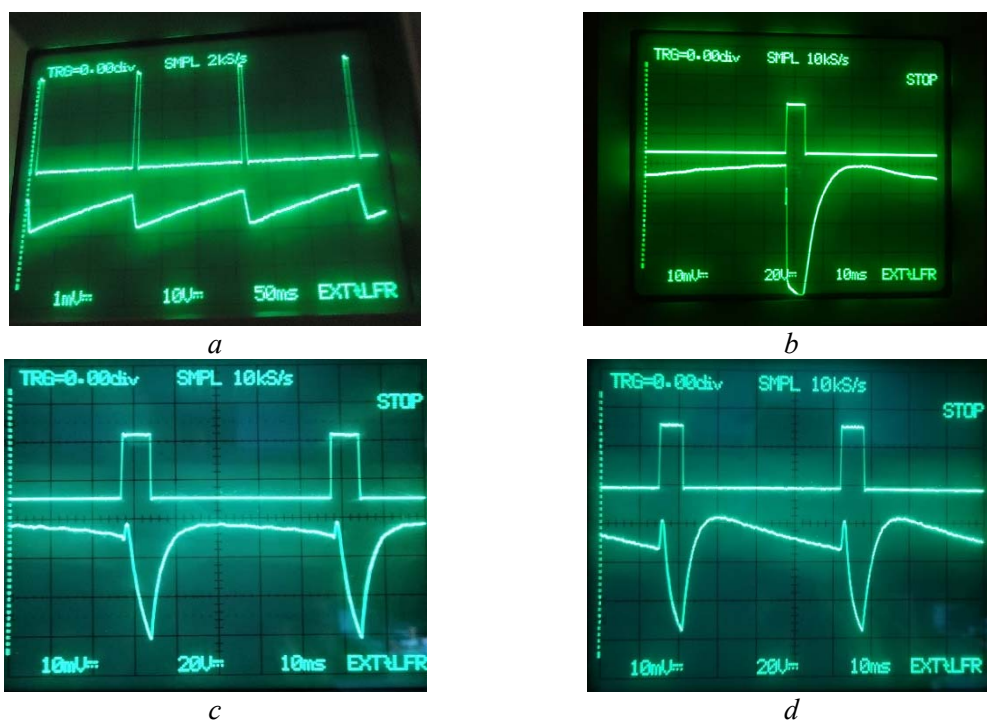


Рис. 2. Осциллограммы отклика чистой (а) и сенсibilизированной ЖК-ячейки, полученные сразу после заполнения (b), через месяц после заполнения (c) и через 6 месяцев после заполнения (d).

Режим питания следующий: амплитуда импульса питания $A = 35$ В, частота следования $T = 16,7$ Гц

Fig. 2. Responses of the pure (a) and sensitized LC cell obtained immediately after filling (b), one month after filling (c) and 6 months after filling (d). The supply voltage is as follows: the amplitude of the power pulse $A = 35$ V, the repetition rate $T = 16,7$ Hz

Итак, кратко рассмотрим подходы, позволяющие объяснить изменение отклика ЖК-среды при введении нанообъектов и при модификации поверхности раздела. *Первый путь* связан с применением нами ранее сенсibilизации (допирования) ЖК такими наночастицами, как фуллерены,

шунгиты, квантовые точки, другие наночастицы, в том числе в настоящей работе – из группы WS₂. Введение межмолекулярного наносенсibilизатора с высоким значением сродства к электрону позволяет формировать межмолекулярный комплекс с переносом заряда в ЖК-среде. Это способствует

образованию повышенного дипольного момента, повышенной поляризуемости единицы объема среды, следовательно, макрополяризации системы в целом, изменению параметра порядка с переходом нематика в квази-смектик [34–36], что в итоге ведет к улучшению временных параметров при переориентировании ЖК-молекул. *Второй путь* связан с применением сенсibilизации ЖК новыми наночастицами на основе WS_2 , введение которых может способствовать снижению вязкости ЖК-среды, следовательно, также вызывает проявление более быстрой реакции и релаксации ЖК-молекул при

внешнем воздействии, которое в настоящем исследовании реализуется в приложении управляющего напряжения питания. *Третий путь* обусловлен эффектом модификации границы раздела сред: твердое тело–ЖК при структурировании проводящего контакта ITO вертикально осажденными углеродными нанотрубками, обработанными поверхностной электромагнитной волной [37–39]. Для примера, пути модификации ITO-проводящего контакта, что способен выполнять дополнительную роль и ориентирующего слоя, представлены на рис. 3.

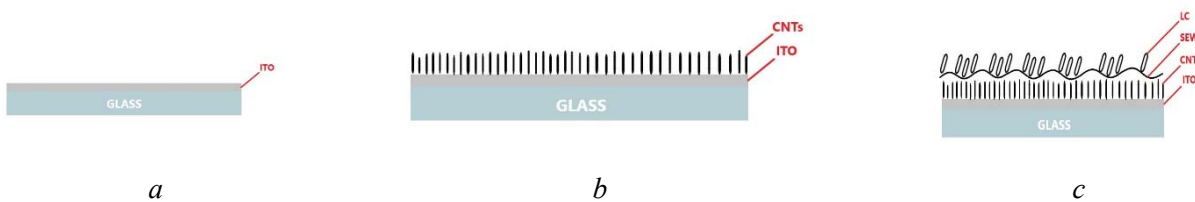


Рис. 3. Пути модификации ITO-рельефа:

a – ITO на стеклянной подложке, *b* – ITO с УНТ, осажденными лазерным ориентированным методом, *c* – ITO с УНТ, обработанными поверхностной электромагнитной волной для получения ориентирующего рельефа

Fig. 3. Ways of modification of the ITO-relief:

a – ITO on a glass substrate, *b* – ITO with CNT deposited by laser oriented method, *c* – ITO with CNT treated with a surface electromagnetic wave to obtain an orienting relief

Естественно, более детальное изучение отмеченного эффекта улучшения временных параметров нематических жидких кристаллов при введении наночастиц требует проведения скрупулезных исследований топологии поверхности раздела и эллипсометрических измерений рефрактивных свойств сенсibilизированной мезофазы, в сравнении с чистой. Однако уже в данном кратком сообщении расширена группа наносенсibilизаторов ЖК-матриц за счет введения WS_2 частиц, которые могут эффективно применяться для оптимизации динамических параметров инерционных ЖК-смесей при реализации конкретных технических задач.

Заключение

Анализируя приведенные краткие результаты исследования, можно сделать следующие выводы:

1) Структурирование объема ЖК наноструктурами WS_2 с предполагаемым созданием межмолекулярных комплексов с переносом заряда

приводит к изменению динамических свойств мезофазы. Регистрируется улучшение времени реакции и релаксации среды в сравнении с чистой мезофазой. Отмеченные особенности не противоречат ранее проведенным экспериментам с другими типами наночастиц, например с фуллеренами, квантовыми точками, шунгитами.

2) Создание наноструктурированного рельефа на основе УНТ на границе раздела фаз твердая подложка–ЖК–мезофаза определенно влияет на изменение ряда параметров ЖК-системы, в том числе на ее временные характеристики и уровень приложенного напряжения. Изменение времени реакции и релаксации ЖК-среды при введении WS_2 не противоречит ранее отмечаемым улучшениям временных параметров в ЖК с фуллеренами, шунгитами, квантовыми точками и УНТ.

3) При сочетании как процесса наноструктурирования объема ЖК-комплексными с переносом заряда, так и модификации границы раздела фаз твердая подложка–ЖК за счет применения лазер-

ного ориентированного метода осаждения УНТ, скорее всего, ведет к изменению энергетической системы уровней в такой сложной композиционной системе, что требует проведения дальнейших исследований, а также выполнения аналитических или квантово-химических расчетов.

4) Проведенные исследования могут расширить материаловедческую базу данных органических жидкокристаллических композитов в целях применения изучаемых систем для лазерной, дисплейной и биомедицинской техники.

Авторы благодарят д-ра хим. наук Н. Н. Рожкову (Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск) и д-ра техн. наук В. В. Беляева (МГОУ, Москва) за полезное обсуждение полученных результатов, а также выражают признательность ст. науч. сотр. П. Я. Васильеву (АО «ГОИ им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург) за помощь при модернизации схемы осаждения УНТ на поверхность разных материалов.

Исследования выполнены при частичной поддержке внутренней темы АО «ГОИ им. С. И. Вавилова» «Поляризационные пленки видимого диапазона спектра для активации жидкокристаллических ячеек с наночастицами WS_2 », 2019.

Список литературы / References

1. Arakelyan S.M., Chilingaryan Yu.S. *Nonlinear Optics of Liquid Crystals*. Moscow : Nauka, 1984, 360 p.
2. 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*. М. : Radio and Svyaz', 1987, 320 p. (in Russ.)].
3. Блинов Л. М., Кац Е. И., Сонин А. С. Физика поверхности термотропных жидких кристаллов // *Успехи физ. наук*. 1987. Т. 152, вып. 3. С. 449–477. [Blinov L.M., Katz E.I., Sonin A.S. Surface physics of the thermotropic liquid crystals. *Soviet Physics Uspekhi*, 1987, **152** (3), 449–477. (in Russ.)].
4. Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск : ВО «Наука», 1994. 214 с. [Zharkova G.M., Sonin A.S. *Liquid crystal composites*. Novosibirsk : Izd. "Nauka", 1994, 214 p. (in Russ.)].
5. de Gennes P.G. and Prost J. *The Physics of Liquid Crystals*. 2 ed., Oxford Science Publications, 1995, 616 p.
6. Ono H., Saito I., Kawatsuki N. Orientational photorefractive effects observed in poly(vinyl alcohol)/liquid crystal composites. *Applied Physics B*, 1998, **B66** (4), 527–529.
7. Lei Wang, Xiao-wen Lin, Xiao Liang, Jing-bo Wu, Wei Hu, Zhi-gang Zheng, Biao-bing Jin, Yi-qiang Qin, Yan-qing Lu. Large birefringence liquid crystal material in terahertz range. *Opt. Mater. Express*, 2012, **2** (10), 1314–1319.
8. Minasyan A., Galstian T. Surface-polymer stabilized liquid crystals with dual-frequency control. *Applied Optics*, 2013, **52** (22), E60–E67. DOI: 10.1364/AO.52.000E60.
9. Chun-Ta Wang, Chung-Lun Wu, Han-Wei Zhang, Tsung-Hsien Lin, Chao-Kuei Lee. Polarization-independent 2 pi phase modulation for terahertz using chiral nematic liquid crystals. *Opt. Mater. Express*, 2016, **6** (7), 2283–2290. DOI:10.1364/OME.6.002283.
10. Qingbing Wang, Ruipeng Sun, Yanqing Tian, Ximin Huang. Effect of polymer network on liquid crystal molecules orientation. *SPIE*, 1998, **3319**, 260–262. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org>.
11. Smalyukh I.I., Lavrentovich O.D. Anchoring-Mediated Interaction of Edge Dislocations with Bounding Surfaces in Confined Cholesteric Liquid Crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90** (8), 085503-1–085503-4.
12. Цой В. И., Тарасишин А. В., Беляев В. В., Трофимов С. М. Моделирование дифракции света с пространственной периодичностью оптических параметров вещества и рельефа поверхности // *Оптим. журн.* 2003. Т. 70, № 7. С. 18–23. [Tsoi V.I., Tarasishin A.V., Belyaev V.V., Trofimov S.M. Modeling of diffraction of light by structures with spatial periodicity of the optical parameters of the substrate and of the surface relief. *J. of Opt. Tech.*, 2003, **70** (7), 465–469].
13. Hui-Yu Chena, Wei Lee, Noel A. Clark. Faster electro-optical response characteristics of a carbon-nanotube-nematic suspension. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90** (3), 033510-1–033510-3. DOI: 10.1063/1.2432294.
14. Buchnev O., Dyadyusha A., Kaczmarek M., Reshetnyak V., Reznikov Yu. Enhanced two-beam coupling in colloids of ferroelectric nanoparticles in liquid crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24** (7), 1512–1516.
15. 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, 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. *Tech. Phys. Lett.*, 2008, **34** (10), 861–863. DOI: 10.1134/S1063785008100155].
16. Blanc Ch., Coursault D., Lacaze E. Ordering nano- and microparticles assemblies with liquid crystals. *Liq. Cryst. Rev.*, 2013, **1** (2), 83–109. DOI: 10.1080/21680396.2013.818515.
17. Kamanina N.V., Zubtcova Yu.A., Kukharchik A.A., Lazar C., 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. *Opt. Express*, 2016, **24** (2), A270, 6 p. DOI: 10.1364/OE.24.00A270.

18. Chen P.-J., Chen M., Ni S.-Ya, Chen H.-Sh., Lin Yi-H. Influence of alignment layers on crystal growth of polymer-stabilized blue phase liquid crystals. *Opt. Mater. Express*, 2016, **6** (4), 1003 (8 p.). DOI: 10.1364/OME.6.001003.
19. Wenqiang Wan, Wen Qiao, Wenbin Huang, Ming Zhu, Yan Ye, Xiangyu Chen, Linsen Chen. Multiview holographic 3D dynamic display by combining a nano-grating patterned phase plate and LCD. *Opt. Express*, 2017, **25** (2), 1114 (9 p.). DOI: 10.1364/OE.25.001114.
20. Haiwei Chen, Fangwang Gou, Shin-Tson Wu. Submillisecond-response nematic liquid crystals for augmented reality displays. *Opt. Mater. Express*, 2017, **7** (1), 195–201. DOI: 10.1364/OME.7.000195.
21. Chausov D.N., 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. *Liq. Cryst.*, 2019, **46** (9), 1345–1352. DOI: 10.1080/02678292.2019.1566503.
22. Chausov D.N., Kurilov A.D., Kazak A.V., Smirnova A.I., Belyaev V.V., Gevorkyan E.V., Usoltseva N.V. Conductivity and dielectric properties of cholesteryl tridecylate with nanosized fragments of fluorinated graphene. *J. Mol. Liq.*, 2019, **291**, 111259. 7 p. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111259.
23. Belyaev V., Gorbunov A., Solomatin A., Suarez D., Light Propagation Through Composite Heterophase Objects with Liquid Crystal Material. *Procedia Computer Science*, 2017, **103**, 556–561. DOI: 10.1016/j.procs.2017.01.060.
24. Tenne R., Margulis L., Genut M., Hodes G. Polyhedral and cylindrical structures of tungsten disulphide. *Nature*, 1992, **360**, 444–446.
25. Rapoport L., Bilik Yu., Feldman Y., Homyonfer M., Cohen S.R., Tenne R. Hollow nanoparticles of WS₂ as potential solid-state lubricants. *Nature*, 1997, **387**, 791–793.
26. Buchman A., Dodiuk-Kenig H., Dotan A., Tenne R., Kenig S. Toughening of epoxy adhesives by nanoparticles. *J. Adhesion Sci. Tech.*, 2009, **23**, 753–768.
27. 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.
28. 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** (32), 20812–20820. DOI: 10.1039/c8cp02245c.
29. Высикайло Ф.И., Беляев В.В., Митин В.С. Нарушение нейтральности в технологиях нанокomпозитов: Монография. М.: Изд-во РУДН, 2019. 200 с. [Vysikaylo F.I., Belyaev V.V., Mitin V.S. Narusheniye neytral'nosti v tekhnologiyakh nanokompozitov: Monografiya. M.: Izd-vo RUDN, 2019. 200 s. ISBN 978-5-209-08895-0].
30. Патент России № 2355001 (RU 2 355 001 C2). Оптическое покрытие на основе углеродных нанотрубок для оптического приборостроения и наноэлектроники / Н. В. Каманина, П. Я. Васильев; приоритет от 09.01.2007; зарегистрирован в Гос. реестре изобретений РФ 10.05.2009. [Russian patent № 2355001 (RU 2 355 001 C2). Optical coatings based on the carbon nanotubes for the optical instrument making and nanoelectronics / N.V. Kamanina, P.Ya. Vasilyev; priority on 09.01.2007; registered in State register of inventions on 10.05.2009].
31. 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 / Н. В. Каманина, П. Я. Васильев, В. И. Студёнов; приоритет от 23 декабря 2008; зарегистрирован в Гос. реестре изобретений РФ 27 ноября 2010 г. [RU Patent № 2405177 (RU 2 405 177 C2). Optical coatings based on the oriented in the electric field carbon nanotubes for the optical industry and nanoelectronics under the conditions when the interface: solid substrate-coatings can be eliminated / N.V. Kamanina, P.Ya. Vasilyev, V.I. Studeonov; priority on 23.12.2008; registered in State register of inventions on 27.11.2010].
32. Патент на изобретение № 2013118962 (RU (11) 2013 118 962(13) А). Защитное покрытие для гигроскопичных оптических материалов на основе лазерно-осаждаемых углеродных нанотрубок для целей оптоэлектроники и медицинской техники / Н. В. Каманина, П. В. Кужаков, П. Я. Васильев; приоритет от 23.04.2013, зарегистрирован в Гос. реестре изобретений РФ 27.10.2014; Бюл. № 30. Заявитель: Открытое акционерное общество «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова». [RU Patent № 2013118962 (RU (11) 2013 118 962(13) А). Protective coatings for the hygroscopic optical materials based on the laser-deposited carbon nanotubes for the aims of optoelectronics and biomedical technique / N.V. Kamanina, P.V. Kuzhakov, P.Ya. Vasilyev; priority on 23.04.2013; registered in State register of inventions on 27.10.2014; Bul. № 30. Applicant is Vavilov State Optical Institute].
33. Кужаков П. В., Васильев П. Я., Каманина Н. В. Применение нанопокровтий для улучшения характеристик элементов эмиссионных и Фурье-спектрометров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 8. С. 39–42. [Kuzhakov P.V., Vasilyev P.Ya., Kamanina N.V. Application of the nano-coatings in order to improve the characteristics of the elements for emission and Fourier spectrometers. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostics of the Materials*, 2017, **83** (8), 39–42 (in Russ.)].

- <http://i.uran.ru/webcab/journals/journal/zavodskaya-laboratoriya-diagnostika-materialov/zavodskaya-laboratoriya-49>].
34. Каманина Н. В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации // *Успехи физ. наук*. 2005. Т. 175, № 4. С. 445–454. [Kamanina N.V. Fullerene-dispersed liquid crystal structure: dynamic characteristics and self-organization processes. *Physics-Uspeski*, 2005, **48** (4), 419–427. DOI: 10.1070/PU2005v048n04ABEH002101].
 35. 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. DOI: 10.1134/1.1969770].
 36. Kamanina N.V., Emami 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.
 37. Васильев П. Я., Каманина Н. В. Фуллеренсодержащий жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света с обработанным поверхностной электромагнитной волной проводящим покрытием // *Письма в ЖТФ*. 2007. Т. 33, вып.1. С. 17–22. [Vasilyev P.Ya., Kamanina N.V. Fullerene-Containing Liquid Crystal Spatiotemporal Light Modulators with Surface-Electromagnetic-Wave-Treated Conducting Layers. *Tech. Phys. Lett.*, 2007, **33** (1), 8–10].
 38. Кухарчик А. А., Кушаков П. В., Каманина Н. В. Наноструктурированный рельеф для гомеотропной ориентации жидкокристаллических молекул и возможности его изучения разными методами // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2013. Вып. 3. С. 45–52. [Kukharchik A.A., Kuzhakov P.V., Kamanina N.V. Nanostructured homeotropic relief to orient liquid crystal molecules and its possible studying by different methods. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2013, 3, 45–52 (in Russ.)].
 39. Кухарчик А. А., Каманина Н. В. Изучение рельефа поверхности тонкоплёночных проводящих покрытий с сопутствующим эффектом изменения сопротивления при введении нанообъектов // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 2014. № 2. С. 40–43. [Kukharchik A.A., Kamanina N.V. Study of the surface relief of the thin film conducting coatings with the connected effect of resistivity change under the introduction of the nanoobjects. *Proceedings of higher educational institutions: Radioelectronica*, 2014, 2, 40–43 (in Russ.)].

Поступила 6.12.2019 г.

Received 6.12.2019

Принята 15.01.2020 г.

Accepted 15.01.2020