

Научная статья

УДК: 532.783:53.04:535.016

**ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА
НЕМАТИЧЕСКИЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ – НАНОЧАСТИЦЫ MoS₂
ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСПЛЕЕВ И МОДУЛЯТОРОВ**

Н. В. Каманина^{1,2,3*}, А. С. Тойкка^{1,2,3}, Я. В. Барнаш^{2,3}, Л. О. Федорова^{2,3}, Р. М. Таркан²,
Ю. А. Зубцова^{1,3}, П. В. Кужаков^{1,3}, С. В. Лихоманова^{1,3,4}, А. Zak⁵

¹АО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»,
отдел «Фотофизика сред с нанобъектами», Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский электротехнический университет (“ЛЭТИ”), Санкт-Петербург, Россия

³Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского
центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

⁵Holon Institute of Technology, Holon 58102, Israel

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 15.05.2023

Одобрена 31.05.2023

Принята 9.06.2023

Ключевые слова:

жидкие кристаллы,
процесс сенсibilизации
мезофазы,
наночастицы MoS₂,
быстродействие,
спектры видимого
и ИК-диапазона,
контактный угол,
угол вращения плоскости
поляризации

АННОТАЦИЯ

Выполнен анализ экспериментальных результатов по временным, спектральным параметрам, влиянию границы раздела на смачивание, эффекту вращения плоскости поляризации света системы нематический жидкий кристалл – наночастицы MoS₂ в плане дальнейшего возможного использования этих систем для дисплейных элементов, модуляторов света и вращателей плоскости поляризации световых лучей. Установлены углы смачивания поверхности проводящих контактов созданной инновационной структурой, что обуславливает возможность отказа от прямого ориентирующего слоя в случае косоого ориентирования жидкокристаллических составов. Определен угол вращения плоскости поляризации света. Впервые выполнены квантово-механические расчеты для подобных систем.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.2.52

Для цитирования:

Каманина Н. В., Тойкка А. С., Барнаш Я. В., Федорова Л. О., Таркан Р. М., Зубцова Ю. А., Кужаков П. В., Лихоманова С. В., Zak А. Инновационная система нематический жидкий кристалл – наночастицы MoS₂ для оптоэлектронных дисплеев и модуляторов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 2. С. 52–62.

*Адрес для переписки: nvkamanina@mail.ru

© Каманина Н. В., Тойкка А. С., Барнаш Я. В., Федорова Л. О., Таркан Р. М., Зубцова Ю. А., Кужаков П. В., Лихоманова С. В., Zak А., 2023

Original Article

NEMATIC LIQUID CRYSTAL – MoS₂ NANOPARTICLES INNOVATIVE SYSTEM
FOR OPTOELECTRONIC DISPLAYS AND MODULATORS

N. V. Kamanina^{1,2,3*}, A. S. Toikka^{1,2,3}, Ya. V. Barnash^{2,3}, L. O. Fedorova^{2,3}, R. M. Tarkan²,
Yu. A. Zybtsova^{1,3}, P. V. Kuzhakov^{1,3}, S. V. Likhomanova^{1,3,4}, A. Zak⁵

¹Lab for Photophysics of Media with Nanoobjects at Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg Electrotechnical University (“LETI”), Saint-Petersburg, Russia

³Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, Russia

⁴Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

⁵Holon Institute of Technology, Holon 58102, Israel

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 15 May 2023

Approved 31 May 2023

Accepted 9 June 2023

Key words:

liquid crystals,
sensitization LC mesophase,
MoS₂ nanoparticles,
speed,
VIS and IR spectra,
contact angle,
rotation of polarization plane
of light

The analysis of experimental results on time and spectral parameters, effect of interface on wetting, effect of rotation of light polarization plane of the nematic liquid crystal – MoS₂ nanoparticle system was carried out. Investigations were performed in terms of further possible use of these systems for display elements, light modulators and rotators of light polarization plane. The wetting angles of the conductive contacts surfaces created by the innovative structure were established, which makes it possible to obtain the oblique orientation of liquid crystal compositions without application of direct orienting layer. The rotation angle of the light polarization plane was determined. Quantum mechanical calculations of such systems have been performed for the first time.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.2.52

For citation:

Kamanina N. V., Toikka A. S., Barnash Ya. V., Fedorova L. O., Tarkan R. M., Zybtsova Yu. A., Kuzhakov P. V., Likhomanova S. V., Zak A. Nematic liquid crystal – MoS₂ nanoparticles innovative system for optoelectronic displays and modulators. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (2), 52–62 (in Russ.).

*Corresponding author: nvkamanina@mail.ru

© Kamanina N. V., Toikka A. S., Barnash Ya. V., Fedorova L. O., Tarkan R. M., Zybtsova Yu. A., Kuzhakov P. V., Likhomanova S. V., Zak A., 2023

Введение

В связи с уникальными свойствами жидкокристаллической мезофазы, проявляемыми при внешнем воздействии, а также широким использованием жидких кристаллов (ЖК) в дисплейной, модуляторной и биомедицинской технике, в настоящее время довольно много научно-технических коллективов занимается оптимизацией и совершенствованием характеристик этого функционального материала. Среди многочисленных способов модификации параметров сенсбилизация (допирование) мезофазы наночастицами занимает особое место, так как позволяет менять параметр порядка, выявлять возможность записи амплитудно-фазовых голограмм, создавать устройства для рассеивания и ограничения световых пучков, наблюдать батохромный сдвиг, устанавливать улучшение временных, рефрактивных и фотопроводниковых характеристик, др. [1–10]. Важным механизмом, ответственным за изменение свойств сенсбилизированной матрицы, является межмолекулярное комплексообразование. Этот процесс дискутируется на основе аналитических, квантово-химических моделей, а также при установлении существенного изменения рефрактивных параметров за счет допирования органических материалов, включая ЖК [11–15].

Естественно, такие факторы, как изначальное создание рельефа поверхности на границе раздела фаз «твердая подложка – ЖК», фотоориентирование, создание рельефа лазерным лучом за счет абляции или ковалентной привязки углеродных нанотрубок (УНТ) и др. также существенно влияют на основные физико-химические характеристики ЖК, используемые в разных оптоэлектронных приборах [7, 16–20].

В настоящей работе при многократных наблюдениях впервые установлены временные параметры ЖК-ячейки с частицами MoS_2 , измерены спектральные зависимости в видимом и ближнем ИК-диапазоне, зафиксированы углы наклона капель сенсбилизированного ЖК на разных поверхностях раздела, проведено квантово-механическое моделирование, а также выявлен эффект вращения плоскости поляризации света видимого диапазона оптического спектра.

Экспериментальные условия

В исследовании использовали жидкий кристалл 5CB (4-pentyl-4-biphenylcarbonitrile), 98 %, приобретенный в фирме *Aldrich Co.* Вручную собирались ЖК-ячейки толщиной 4 и 10 микрометров в *twist*-конфигурации. Ориентирующий рельеф был выполнен с использованием тефлоновых спейсеров и углеродных нанотрубок (УНТ), осажденных лазерным ориентированным способом в электрическом поле с напряженностью 100 В/см и обработанных поверхностной электромагнитной волной, по аналогии с работой [21]. Наночастицы MoS_2 были предоставлены специалистами группы профессора *Reshef Tenne* и профессора *Alla Zak*, скрупулезно изучающими свойства данных систем [22–24]. В указанных работах исследовались композиции MoS_2 двух типов: тип I с искаженными слоями, стенки которых состоят из множества беспорядочно ориентированных нанопластинок или со множеством дефектов на поверхности, но этот тип MoS_2 сохраняет четкую трубчатую морфологию; и тип II с идеально параллельными слоями, но из-за неоднородного диаметра зачастую присутствуют дефекты.

На рисунке 1 показан снимок синтезированных наночастиц MoS_2 (тип I), именно с этим типом наночастиц проведены эксперименты с композитом ЖК MoS_2 для выявления динамических и оптических особенностей этого композита.

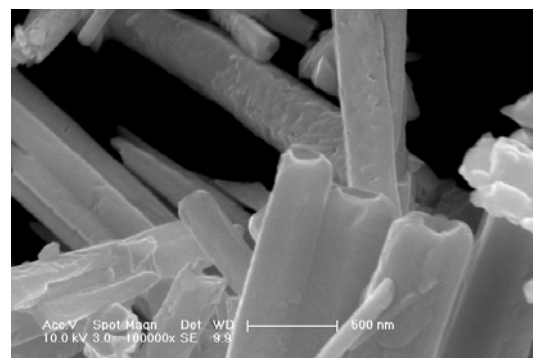


Рис. 1. SEM изображение, полученное при синтезе нанотрубок на основе MoS_2

Fig. 1. SEM-image obtained during the synthesis of the nanotubes based on MoS_2

Видно, что частицы имеют форму нанотрубок, которые в экспериментах используют для структурирования нематических ЖК. Перспектива применения нанотрубок MoS_2 в качестве сенсibilизаторов ЖК также обусловлена набором физических свойств указанных наноструктур.

Диаметр нанотрубок варьируется в диапазоне 20–180 нм, математическое ожидание диаметра на уровне 60 нм [23]. MoS_2 нанотрубки имеют кристаллографическую ориентацию (002) с параметром решетки 6,25 Å. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, нанотрубки данного типа имеют также характерные неосновные пики для ориентаций (100), (101), (103), (006) и (105) [24]. При рассмотрении оптических свойств необходимо упомянуть наличие экситонных пиков поглощения в MoS_2 , которые при диаметре нанотрубок 60 нм располагаются на уровне $\lambda = 667$ нм ($E = 1,86$ эВ) и $\lambda = 614$ нм ($E = 2,02$ эВ). При длинах волн свыше 800 нм данный материал является оптически прозрачным [24].

Сенсibilизация ЖК проводилась в течение трех суток, чтобы обеспечить переход из нематического в квази-смектическое состояние.

Тестировались ЖК-ячейки с концентрацией вводимых наночастиц $\text{MoS}_2 \sim 0,1$ вес. % в сравнении с чистой ЖК-матрицей.

Спектральные характеристики изучали помощью спектрофотометра СФ-26, функционирующего в диапазоне длин волн 200–1200 нм. Для контроля спектральных измерений использовали калиброванные фильтры. Ошибка в измерениях спектров составляла около 0,2 %. Спектры в ИК-диапазоне снимали на приборе ФСМ 1211 (ООО Инфраспек). Для измерения угла наклона распределения капли сенсibilизированного ЖК-состава с данной концентрацией наночастиц на разных рельефах поверхности использовали прибор *OCA 15EC*. Проведено достаточно большое количество (более 10) измерений наклона капли сенсibilизированного ЖК, в сравнении с чистой матрицей, при использовании созданных рельефов на проводящем контакте ИТО, ИТО с УНТ, ИТО с шунгитами. Стоит обратить внимание, что ранее нами были проведены исследования по влиянию рельефа поверхности на ориентацию ламелей композита ЖК+ WS_2 нанотрубки [25].

Временные параметры исследовались в «режиме на просвет» с использованием схемы Фреде-

рикса. Эффект вращения плоскости поляризации света проверялся на установке OR22A (ООО «Фотопизикс», Санкт-Петербург, Россия), в сравнении с ранее тестируемыми ЖК-матрицами с другими сенсibilизаторами. Квантово-химическое моделирование было выполнено с помощью программ *GaussView5.0* и *Gaussian 09W* [26–28]; применен метод расчета и атомный базисный набор Хартри-Фока HF/STO-3G SP.

Результаты и обсуждение

Основные результаты проведенного исследования показаны на рис. 2–4 и в табл. 1 и 2. Проанализируем данные, показанные на рис. 2. Оценивалось время реакции среды (время включения) по нарастанию электрооптического отклика от уровня 0,1 до уровня 0,9; время релаксации (время выключения) определялось по спаду отклика от максимального значения до уровня 0,1. Видно, что для структурированного ЖК-композита наблюдаются существенно меньшие времена переключения (более высокое быстродействие) ЖК-ячейки (временная шкала на осциллограмме 10 мс для чистой ЖК-ячейки и шкала 5 мс для ЖК-ячейки с MoS_2). При изменении амплитуды управляющего импульса питания амплитуда отклика структурированной ЖК-ячейки практически не изменяется; при этом время реакции устанавливается $\sim 2,0$ – $2,5$ мс; время релаксации ~ 4 – 5 мс. Естественно, при приложении двухполярного импульса питания естественно ожидать еще меньшие времена переключения данного композита.

На рисунке 3 приведены спектральные характеристики ячейки на основе системы ЖК- MoS_2 , измеренные в видимой и ближней ИК-области спектра. Анализируя спектр видимого диапазона (рис. 3, а), можно сказать, что для сенсibilизированной ячейки толщиной 10 мкм проявляется увеличение пропускания в области 620–690 нм, в сравнении с тонкой ячейкой (с толщиной 4 микрометра), как чистой, так и сенсibilизированной. С одной стороны, вполне возможно подтверждение наличия экситонных пиков поглощения, установленных в [23, 24], однако спектральная полоса несколько смещена в более длинноволновую область, что характерно для проявления механизма межмолекулярного комплексобразования между ЖК-матрицей и введенным сенсibilизатором.

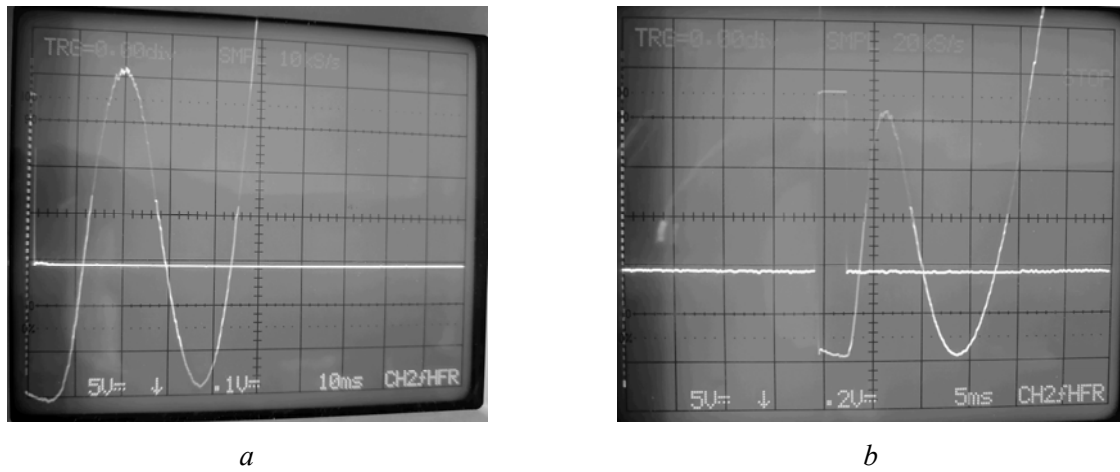


Рис. 2. Временные параметры чистой ЖК-ячейки толщиной 4 мкм (а) и ЖК-ячейки с введенными наночастицами MoS₂ (б), полученные при управляющем импульсе питания: амплитуда импульса 15 В, длительность 3 мс, частота следования 5 Гц

Fig. 2. Time parameters of the LC cell with the thickness of 4 μm (a) and the LC cell doped with MoS₂ nanoparticles (b) obtained with a control bias voltage pulse: pulse amplitude 15 V, duration 3 ms, repetition frequency 5 Hz

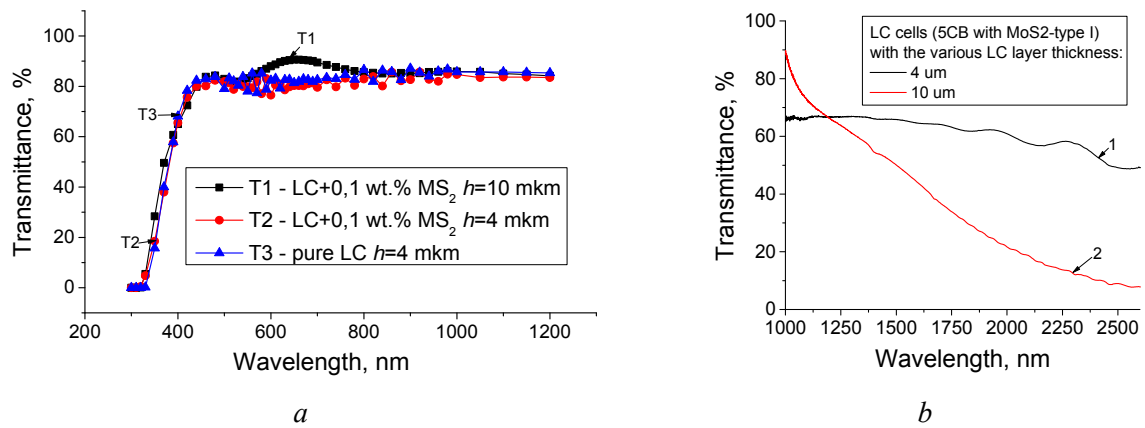


Рис. 3. Спектры пропускания системы ЖК–MoS₂, полученные для ЖК-ячеек разной толщины в видимом (а) и ближнем ИК-диапазоне (б).

Fig. 3. Transmission spectra of the LC-MoS₂ system obtained for LC cells of different thicknesses in visible (a) and near-IR range (b).

Интересная особенность спектра для ячейки толщиной 4 микронметра (рис. 3, *b*, кривая 1) установлена в области 1–2,6 микронметров. Стационарность пропускания в довольно широком диапазоне длин волн предполагает дальнейшую проверку функционирования такой структуры в качестве ограничителя лазерного излучения, поскольку для слабого оптического сигнала регистрируется пропускание излучения выше 60 %, а за счет структурирования наночастицами MoS₂ вероятно наличие процесса дифракции лазерных лучей (потери энергии на дифракцию как один из механизмов ограничения) и рассеяния на дефектах. Заметим, что ячейка толщиной 10 микронметров имеет пропускание на уровне 50 % на длине волны 1,5 микронметра; также вполне возможно выявление эффекта ограничения на данной телекоммуникационной длине волны. В таблице 1 приведены результаты установленной зависимости угла наклона капли сенсibilизированного ЖК от типа рельефов поверхности в сравнении с углом смачивания капли чистой ЖК-мезофазы.

ги на дифракцию как один из механизмов ограничения) и рассеяния на дефектах. Заметим, что ячейка толщиной 10 микронметров имеет пропускание на уровне 50 % на длине волны 1,5 микронметра; также вполне возможно выявление эффекта ограничения на данной телекоммуникационной длине волны. В таблице 1 приведены результаты установленной зависимости угла наклона капли сенсibilизированного ЖК от типа рельефов поверхности в сравнении с углом смачивания капли чистой ЖК-мезофазы.

Таблица 1. Сравнение углов смачивания капель чистого ЖК и ЖК+MoS₂ (0.1 вес. % наночастиц в ЖК-матрице) на разных рельефах поверхности

Table 1. Wetting angles of pure LC and LC+MoS₂ (0.1 wt.%) droplets on different surface reliefs

Рельеф поверхности	Значение угла смачивания (минимальное / среднее / максимальное), °	
	Чистый 5СВ	5СВ + MoS ₂ (0,1 вес. %)
Чистый ИТО	36,6 / 38,4 / 40,1	29,3 / 29,6 / 29,9
ИТО+УНТ (100 В/см)	52,7 / 52,8 / 52,9	34,5 / 34,7 / 34,8
ИТО+УНТ (600 В/см)	58,3 / 58,4 / 58,5	45,1 / 47,5 / 49,8
ИТО+шунгит (100 В/см)	42,5 / 42,6 / 42,6	46,5 / 46,5 / 46,5
ИТО+шунгит (600 В/см)	23,0 / 24,9 / 26,7	25,8 / 25,8 / 25,8

Заметим, что в табл. 1 приведены данные по рельефам поверхности, в условиях, когда УНТ и шунгит осаждались на ИТО проводящее покрытие лазерным способом при учете ориентирующего влияния электрического поля разной напряженности, аналогично [21].

Интересная чередующаяся зависимость угла наклона капель композита ЖК+MoS₂ наблюдается при смене рельефа ИТО+УНТ на рельеф ИТО+шунгит, когда для осаждения использовалась одинаковая напряженность электрического поля на уровне ~100 В/см и 600 В/см. И в первом, и во втором случаях для рельефа и с УНТ, и с шунгитом наблюдается «косое» расположение капель сенсibilизированного ЖК. Однако при меньшем значении электрического поля угол наклона на рельефе с УНТ меньше, чем на рельефе с шунгитом. При большем значении электрического поля, используемого при осаждении частиц на ИТО, наблюдается

обратная тенденция. Тем не менее и в первом, и во втором случаях для ориентации системы ЖК+MoS₂ нет необходимости использовать специально политый ориентирующий слой, т.к. сам проводящий контакт ИТО выполняет в этом случае 2 функции: и проводника электричества, и ориентанта для выстраивания ламелей ЖК-композита.

На рисунке 4 приведены данные квантово-механического моделирования системы ЖК–MoS₂. Заметим, что при проведении данных расчетов учитывалось следующее соотношение компонентов: 6 атомов серы (S), 3 атома молибдена (Mo), 12 атомов азота (N), 80 атомов углерода (C), 90 атомов водорода (H).

В таблице 2 представлены данные по сравнительным величинам угла вращения плоскости поляризации световых лучей, в том числе, при применении композита ЖК–MoS₂.

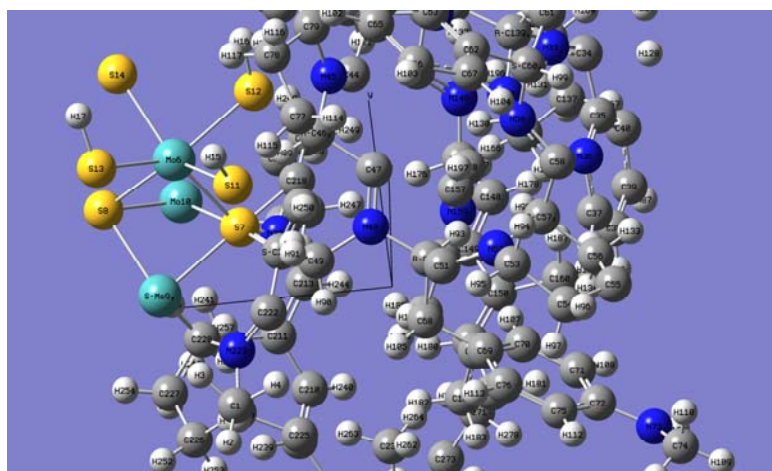


Рис. 4. Картина распределения связей в системе ЖК с наночастицами MoS₂. Качественная модель возможного взаимодействия между молекулой ЖК и наночастицей MoS₂, полученная с помощью программ GaussView5.0, Gaussian 09W

Fig. 4. Distribution of bonds in the LC system with MoS₂ nanoparticles. Qualitative model of the possible interaction between LC-molecules and MoS₂ nanoparticles established by GaussView5.0, Gaussian 09W

Таблица 2. Вращение плоскости поляризации в структурах на основе 5CB ($\lambda = 532$ нм) для сенсibilизированных композитов толщиной $h = 10$ микрометров

Table 2. Rotation of polarization plane in the structures based on 5CB ($\lambda = 532$ nm) for the sensitized composites with a thickness of 10 micrometers

Композит	Процентное содержание сенсibilизатора, вес. %	Угол вращения плоскости поляризации света, °	Ссылка
5CB	0,0	2,1	Настоящая работа
5CB–MoS ₂	0,1	3,0	Настоящая работа
5CB–WS ₂	0,3	3,4	[29]
5CB–WS ₂	0,5	11,6	[29]
Водный раствор ДНК	0,3	3–3,8	[30]

На основании данных табл. 2 можно сделать вывод, что композит ЖК–MoS₂ позволяет вращать плоскость поляризации света примерно в таком же диапазоне углов, как композит ЖК+WS₂ и водный раствор ДНК, однако при существенно меньших концентрациях вводимого сенсibilизатора. Проведенный комплекс работ вполне логично дополняет базы данных, создаваемых Московкой, Казанской, Ивановской, Саратовской и другими научными школами по исследованию жидкокристаллического состояния вещества, что визуализировано в таких научно-исследовательских публикациях, как [31–37].

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1) Наночастицы MoS₂ вполне могут дополнить ряд сенсibilизаторов, применяемых для изменения свойств нематических жидких кристаллов с целью варьирования временных, спектральных и других оптических параметров.

2) Временные параметры композита ЖК–MoS₂ предполагают возможное использование такой системы для создания аналогов

дисплейных элементов, поскольку времена реакции и релаксации среды сравнимы с таковыми, представляемыми рядом дисплейных компаний. Наличие же практически симметричного отклика вполне пригодно для использования этой электрооптической мезофазы при конструировании электро- и свето-управляемых пространственно-временных модуляторов света.

3) Экспериментально установленные значения углов вращения плоскости поляризации света в системе ЖК–MoS₂, причем полученные при меньших (см., к примеру, табличные данные для системы 5CB–WS₂) значениях процентного содержания вводимого сенсibilизатора, сравнимы с таковыми, определенными ранее для композита ЖК+WS₂ и водного раствора ДНК красных рыб.

4) Сравнение углов смачивания чистого ЖК и ЖК–MoS₂ на различных модификациях ИТО покрытий с фиксированными параметрами шероховатости и свободной поверхностной энергии позволяет сделать вывод, что численные значения полярной и дисперсионной составляющих поверхностного натяжения нового ЖК-композита ЖК–MoS₂ в значительной степени перестраиваются относительно исходной ЖК-матрицы. Полученный результат может быть связан с перераспределением ориентации ЖК-диполей на границе раздела с твердым телом (например, за счет изменения параметра порядка), с непосредственным вкладом MoS₂ нанотрубок, а также с взаимодействием ЖК–MoS₂.

5) На основе полученных экспериментальных данных можно предположить наличие процесса комплексообразования между CN-группой ЖК и наночастицей MoS₂. Данный процесс требует дополнительных исследований, например, проведения рефрактивных измерений на эллипсометре. Однако вполне вероятно, что такое межмолекулярное взаимодействие в данной конкретной структуре может быть объяснено тенденциями роста дипольного момента, параметра порядка и поляризации в сенсibilизированных ЖК-матрицах, в сравнении с чистыми ЖК-системами, которые были рассмотрены нами ранее [7, 13–15].

6) Расширение числа нано-сенсibilизаторов для нематических ЖК-матриц может быть полезно как для накопления фундаментальных знаний в материаловедческой области создания новых функциональных органических композитов, так и для дальнейшего практического развития дисплейных технологий, а также для совершен-

ствования базовых оптико-электронных приборов, используемых в телекоммуникационных, лазерных схемах, системах поглощения газов и примесей, в биомедицине.

Благодарности: Работа выполнена как инициативная для дальнейшего продвижения сотрудничества между израильской и российской научно-техническими лабораториями. Авторы благодарят д-ра техн. наук В. В. Беляева (МГОУ, Москва) за полезное обсуждение полученных результатов, а также выражают признательность своим коллегам по лаборатории «Фотофизика сред с нанообъектами» (АО НПО «ГОИ им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург), по кафедре «Фотоника» ЛЭТИ (Санкт-Петербург) и ПИЯФ (Гатчина, Россия) за помощь в работе и конструктивные вопросы на лабораторных семинарах.

Acknowledgments: The work was done as an initiative to further promote cooperation between Israeli and Russian scientific and technical laboratories. The authors are grateful to Dr. V. V. Belyaev (MGOU, Moscow) for the useful discussion of the results obtained, and also express their gratitude to their colleagues in the laboratory "Photophysics of media with nanoobjects" (JSC NPO "GOI named after S. I. Vavilov", St. Petersburg), in the Department of Photonics of LETI (St. Petersburg) and PNPI (Gatchina, Russia) for their help in the work and constructive questions at laboratory seminars.

Список источников / References

1. Even M., Heinrich B., Guillon D., Guldi D.M., Prato M., Deschenaux R. A mixed fullerene – ferrocene thermotropic liquid crystal: synthesis, liquid-crystalline properties, supramolecular organization and photoinduced electron transfer. *Chem. Eur. J.*, 2001, 7 (12), 2595–2604.
2. 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.
3. 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. *Optics Express*, 2017, 25 (2), 1114–1122. DOI: 10.1364/OE.25.001114.
4. Khoo I.C. Holographic grating formation in dye- and fullerene C₆₀-doped nematic liquid-crystal film. *Optics Lett.*, 1995, 20 (20), 2137–2139.

5. Ono H., Kawatsuki N. Orientational photorefractive gratings observed in polymer dispersed liquid crystals doped with fullerene. *Jap. J. Appl. Phys., Part 1*, 1997, **36**, 6444–6448.
6. Zhou L., Saeed M.H., Zhang L. Optical diffusers based on uniform nano-sized polymer balls/nematic liquid crystals composite films. *Liq. Cryst.*, 2019, 1–14. DOI: 10.1080/02678292.2019.1679901.
7. 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. *Optics Express*, 2016, **24** (2), A270 (6 p.). DOI:10.1364/OE.24.00A270.
8. Shuan-Yu Huang, He-Yi Zheng, Kai-Yu Yu, Bing-Yau Huang, Hong-Ren Lin, Chia-Rong Lee and Chie-Tong Kuo. Electrically tunable prism grating based on a liquid crystal film with a photoconductive layer. *Opt. Mater. Exp.*, 2012, **2** (12), 1791–1796.
9. Budagovsky I.A., Ochkin V.N., Smayev M.P., Zolot'ko A.S., Bobrovsky A.Yu., Boiko N.I., Lysachkov A.I., Shibaev V.P., Barnik M.I. Interaction of light with a NLC-dendrimer system. *Liq. Cryst.*, 2009, **36** (1), 101–107. DOI: 10.1080/02678290802684575.
10. Jingxin Sang, Yujian Lai, Jiatong Sun, Jianhua Shang and Shuguang Zhao. A mesoporous silica nanoparticle-doped photo-alignment layer and liquid crystal layer for optimizing the rewriting speed and the response time of optically driving liquid crystal displays. *Crystals*, 2022, **12** (8), 1088 (10 p.). DOI: 10.3390/cryst12081088.
11. Bruening J., Friedman B. Photoinduced charge transfer in conducting polymer C₆₀ composites. *Chem. Phys.*, 1997, **106**, 9634–9638.
12. Friedman B., Su W.P. Quantum lattice fluctuations and optical properties of nondegenerate conjugated polymers. *Phys. Rev. B*, 1989, **39** (8), 5152–5155.
13. Каманина Н. В., Тойкка А. С., Квашнин Д. Г. Жидкокристаллические системы с WS₂ наночастицами в эффекте ограничения оптического излучения // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2021. Т. 21, № 2. С. 73–81. [Kamanina N.V., Toikka A.S., Kvashnin D.G. Liquid crystal systems with WS₂ nanoparticles in the optical limiting effect. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2021, **21** (2), 73–81. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.2.73 (in Russ.)]
14. Каманина Н. В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации // *Успехи физических наук*. 2005. Т. 175, № 4. С.445–454. DOI: 10.3367/UFNr.0175.200504f.0445. [Kamanina N.V. Fullerene-dispersed liquid crystal structure: dynamic characteristics and self-organization processes. *Physics-Uspkhi*, 2005, **48** (4), 419–427.
15. Kamanina N.V. Advances in material nanosensitization: refractive property changes as the main parameter to indicate organic material physical–chemical feature improvements. *Materials*, 2022, **15** (6), 2153 (12 p.). DOI: 10.3390/ma15062153.
16. 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 periodicity of optical parameters of matter and surface relief. *Opt. J.*, 2003. **70** (7), 18–23. (in Russ.)].
17. Belyaev V.V., Mazaeva V.G. Green technologies of LC alignment on the base of organosilicon compounds. *SID'11 Digest.*, 2011, 1412–1415.
18. 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. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003, 201–244.
19. 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.
20. Кухарчик А. А., Кужаков 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 relief for homeotropic orientation of liquid crystal molecules and its possible studying by different methods. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2013, (3), 45–52 (in Russ.)].
21. Патент России № 2405177 (RU 2 405 177 C2). Оптическое покрытие на основе ориентированных в электрическом поле углеродных нанотрубок для оптического приборостроения, микро- и нанoeлектроники при нивелировании границы раздела сред: твёрдая подложка – покрытие / Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И.; приоритет от 23.12.2008 г.; зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ 27.11.2010 г. [Russian Patent No. 2405177 (RU 2 405 177 C2). Optical coating based on carbon nanotubes oriented in an electric field for optical instrumentation, micro- and nanoelectronics when leveling the interface of media: solid substrate – coating / Kamanina N.V., Vasiliev P.Ya., Studenov V.I.; priority from 23.12.2008; registered in

- the State Register of Inventions of the Russian Federation on 27.11.2010 (in Russ.)).
22. Polyakov A.Yu., Zak A., Tenne R., Goodilin E.A., Solntsev K.A. Nanocomposites based on tubular and onion nanostructures of molybdenum and tungsten disulfides: inorganic design, functional properties and applications. *Russ. Chem. Rev.*, 2018, **87** (3), 251–271. DOI: 10.1070/RCR4798.
 23. Chithaiah P., Ghosh S., Idelevich A., Rovinsky L., Livneh T., Zak A. Solving the “MoS₂ nanotubes” synthetic enigma and elucidating the route for their catalyst-free and scalable production. *ACS Nano*, 2020, **14**, 3004–3016. DOI: 10.1021/acsnano.9b07866.
 24. Sinha S.S., Yadgarov L., Aliev S.B., Feldman Y., Pinkas I., Chithaiah P., Ghosh S., Idelevich A., Zak A., Reshef Tenne. MoS₂ and WS₂ nanotubes: synthesis, structural elucidation, and optical characterization. *Phys. Chem. C*, 2021, **125**, 6324–6340. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c10784.
 25. Kamanina N., Toikka A., Barnash Ya., Zak A., Tenne R. Influence of surface relief on orientation of nematic liquid crystals: polyimide doped with WS₂ nanotubes. *Crystals*, 2022, **12** (3), 391 (9 p.). DOI: 10.3390/cryst12030391.
 26. 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.)].
 27. Ochterski J.W. Thermochemistry in Gaussian. Gaussian, Inc., 2000, 19 p.
 28. The official Gaussian website: <http://www.gaussian.com/index.htm>
 29. Тойкка А. С., Каманина Н. В. Вращение плоскости поляризации света в жидких кристаллах с сенситизаторами на основе WS₂-нанотрубок // *ПЖТФ*. 2022. Т. 48, вып. 22. С. 11–15. [Toikka A.S., Kamanina N.V. Rotation of the plane of polarization of light in liquid crystals with sensitizers based on WS₂ nanotubes. *Phys. Tech. Lett.*, 2022, **48** (22), 11–15. DOI: 10.21883/PJTF.2022.22.53799.1928 (in Russ.)].
 30. Каманина Н. В., Каманин А. А., Лихоманова С. В. Оптический эффект вращения плоскости поляризации света в ДНК-содержащих материалах // *Письма в ЖТФ*. 2019. Т. 45, вып. 3. С. 10–12. DOI: 10.21883/PJTF.2019.03.47263.17333. [Kamanina N.V., Kamanin A.A., Likhomanova S.V. The optical effect of light polarization plane rotation in DNA-containing materials. *Tech. Phys. Lett.*, 2019, **45** (2), 69–71. DOI: 10.1134/S106378501902007X].
 31. Беляев В. В., Чилая Г. С. Жидкие кристаллы в начале XXI века: монография. М.: ИИУ МГОУ, 2015. 134 с. [Belyaev V.V., Chilaya G.S. Liquid crystals at the beginning of the XXI century: monograph. M.: IIU MGOU, 2015, 134 p. ISBN 978-5-7017-2415-8].
 32. Sobolevsky M.V., Mazaeva V.G., Kovalenko V.I., Belyaev V.V., Kalashnikov A.Y. Fabrication of silicon-organic films for LC alignment and their physical properties. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1999, **329**, 293–304.
 33. Mazaeva V., Belyaev V., Sobolevskii M. Properties of thin films of organosilicone compounds for LC alignment. *Soc. Inf. Display*, 2005, **13**, 373–379.
 34. 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. [Belyaev V.V., Solomatin A.S., Tsareva Ye.V., Belyaev A. A., Chaousov 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.). DOI: 10.18083/LCAppl.2022.2.71].
 35. Безруков А. Н., Потапов О. А., Осипова В. В., Галяметдинов Ю. Г. Ориентационное поведение нематического жидкого кристалла в двухфазных микрофлюидных системах // *Жидк. крист. и их практич. использ.*. 2023. Т. 23, № 1. С. 28–38. [Bezrukov A.N., Potapov O.A., Osipova V.V., Galyametdinov Yu.G. Orientational behavior of nematic liquid crystals in two-phase microfluidic systems. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (1), 28–38 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2023.1.28].
 36. Смирнова А. И., Гиричева Н. И., Солдатова К. М., Ежов А. В., Глуховской Е. Г., Усольцева Н. В. Производные фталоцианина и порфирина АЗВ-типа: квантово-химическое моделирование димеров // *Жидк. крист. и их практич. использ.*, 2021. Т. 21, № 1. С. 50–60. [Smirnova A.I., Giricheva N.I., Soldatova K.M., Ezhov A.V., Glykhovskoi E.G., Usol'tseva N.V. Phthalocyanine and porphyrin derivatives of A₃B-type: quantum-chemical modeling of dimers. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2021, **21** (1), 50–60. DOI: 10.18083/LCAppl.2021.1.50 (in Russ.)].
 37. Симоненко Г. В. Параметризация зависимости полного времени срабатывания жидкокристаллического модулятора от управляющего напряжения // *Жидк. крист. и их практич. использ.*. 2022. Т. 22, № 1. С. 47–55. [Simonenko G. V. Parametrization of total operation time dependence of liquid crystal modulator on control voltage. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (1), 47–55 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2022.1.47].

Вклад авторов:

¹**Каманина Н. В.** – планирование работы, переговоры с израильскими коллегами по свойствам наночастиц MoS_2 , выбор ЖК-матрицы и проведение сенсibilизации ЖК-мезофазы наночастицами MoS_2 , проверка экспериментов, анализ данных, написание статьи.

²**Тойкка А. С.** – измерение ИК-спектров, проведение экспериментов по смачиванию, по определению угла вращения плоскости поляризации.

³**Барнаш Я. В.** – участие в обсуждении.

⁴**Федорова Л. О.** – проведение экспериментов по смачиванию.

⁵**Таркан Р. М.** – участие в обсуждении.

⁶**Зубцова Ю. А.** – участие в обсуждении.

⁷**Кузиков П. В.** – проведение квантово-химических расчетов.

⁸**Лихоманова С. В.** – измерение спектров в видимой области.

⁹**Zak A.** – синтез наночастиц MoS_2 в Израиле, обсуждение.

Contribution of the authors:

¹**Kamanina N.V.** – work planning, negotiations with Israeli colleagues on the properties of MoS_2 nanoparticles, selection of an LC matrix and sensitization of the LC mesophase with MoS_2 nanoparticles, verification of experiments, data analysis, writing an article.

²**Toikka A. S.** – measurement of IR spectra, carrying out experiments on wetting, to determine the angle of rotation of the polarization plane.

³**Barnash Ya. V.** – participation in the discussion.

⁴**Fedorova L. O.** – carrying out experiments on wetting.

⁵**Tarkan R. M.** – participation in the discussion.

⁶**Zubtsova Yu. A.** – participation in the discussion

⁷**Kuzhakov P. V.** – quantum-chemical calculations.

⁸**Likhomanova S. V.** – measurement of spectra in the visible region.

⁹**Zak A.** – synthesis of MoS_2 nanoparticles in Israel, discussion.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

¹Orcid – 0000-0002-2903-2685

²Orcid – 0000-0002-8694-8497

³Orcid – 0000-0002-3449-9044

⁴Orcid – 0009-0001-6753-4328

⁵Orcid – 0009-0004-5521-779X

⁶Orcid – 0000-0002-1738-0199

⁷Orcid – 0000-0002-9302-3265

⁸Orcid – 0000-0002-1554-8410

⁹Orcid – 0000-0002-3807-3454

Поступила 15.05.2023, одобрена 31.05.2023, принята 9.06.2023
Received 15.05.2023, approved 31.05.2023, accepted 9.06.2023