

Научная статья

УДК: 535; 538.9; 53.09; 537

**ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК
С ВВЕДЕННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ CoFe_2O_4**

Н. В. Каманина^{1,2,3*}, А. С. Тойкка^{2,3}, Я. В. Барнаш^{2,3}, Д. Н. Редька^{2,4}, С. В. Лихоманова^{1,3,5},
Ю. А. Зубцова^{1,3}, П. В. Кужаков^{1,3}, Z. Jovanovic⁶, S. Jovanovic⁶

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

²Санкт-Петербургский электротехнический университет («ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, Россия

³НИЦ Курчатовский институт – Институт ядерной физики (ПНЯФ), г. Гатчина, Россия

⁴Рижский технический университет, Рига, Латвия

⁵Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

⁶Laboratory of Physics, VINČA Institute of Nuclear Sciences – National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 21.09.2022

Одобрена 24.10.2022

Принята 31.10.2022

Ключевые слова:

жидкокристаллические материалы,
наночастицы CoFe_2O_4 ,
сенсбилизация,
рельеф поверхности,
смачивание поверхности,
динамические параметры

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты первых экспериментов по функционированию жидкокристаллических ячеек с введенными в мезофазу наночастицами CoFe_2O_4 . Измерены спектры пропускания в видимом и ближнем ИК-диапазоне, динамические параметры по эффекту Фредерикса, рефрактивные характеристики, а также углы смачивания сенсбилизированной мезофазой поверхностей на основе стекла: Крон К8, проводящего покрытия ИТО и ИТО, обработанного поверхностной электромагнитной волной, – для перспективы использования такого рельефа в качестве ориентанта новой жидкокристаллической среды. Установлено изменение цвета жидкокристаллической матрицы, ее рефрактивных коэффициентов и угла наклона капель сенсбилизированного жидкого кристалла на рассмотренных рельефах; измерены временные параметры реакции и релаксации среды. Предложено, что жидкокристаллическая композиция является своего рода иммерсионной средой, сохраняющей свойства введенных наночастиц, что расширяет области их применения в оптоэлектронике и биомедицине.

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.4.83

Для цитирования:

Каманина Н. В., Тойкка А. С., Барнаш Я. В., Редька Д. Н., Лихоманова С. В., Зубцова Ю. А., Кужаков П. В., Jovanovic Z., Jovanovic S. Особенности функционирования жидкокристаллических ячеек с введенными наночастицами CoFe_2O_4 // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2022. Т. 22, № 4. С. 83–91.

*Адрес для переписки: nvkamanina@mail.ru

© Каманина Н. В., Тойкка А. С., Барнаш Я. В., Редька Д. Н., Лихоманова С. В., Зубцова Ю. А., Кужаков П. В., Jovanovic Z., Jovanovic S., 2022

Original Article**FUNCTIONING FEATURES OF LIQUID CRYSTALLINE CELLS
DOPED WITH CoFe₂O₄ NANOPARTICLES**

N. V. Kamanina^{1,2,3}, A. S. Toikka^{2,3}, Ya. V. Barnash^{2,3}, D. N. Redka^{2,4}, S. V. Lihkomanova^{1,3,5},
Yu. A. Zybtsova^{1,3}, P. V. Kyzhakov^{1,3}, Z. Jovanovic⁶, S. Jovanovic⁶

¹Laboratory for Photophysics of media with nanoobjects at Vavilov State Optical Institute, St.-Petersburg, Russia

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

³SRC “Kurchatov Institute – Petersburg Institute of Nuclear Physics, Leningrad Region, Gatchina, Russia

⁴Riga Technical University, Riga, Latvia

⁵Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

⁶Laboratory of Physics, VINČA Institute of Nuclear Sciences – National Institute of the Republic of Serbia,
University of Belgrade, Belgrade, Serbia

ARTICLE INFO:**ABSTRACT****Article history:**

Received 21 September 2022

Approved 24 October 2022

Accepted 31 October 2022

Key words:

liquid crystal materials,
CoFe₂O₄ nanoparticles,
sensitization,
surface relief,
wetting phenomena,
dynamic characteristics

The first experimental results on the functioning of liquid crystal cells doped with CoFe₂O₄ nanoparticles are presented. Transmission spectra in the visible and near-infrared range, dynamic parameters of the Fredericks effect, refractive characteristics, as well as wetting angles of the mesophase sensitized surfaces have been obtained. The measured surfaces were the K8 Crown glass, the conductive ITO and the ITO treated with a surface electromagnetic wave. The experiment was performed in order to establish the prospect of using such reliefs as a novel liquid crystal composite orientator sensitized with CoFe₂O₄ nanoparticles. A color change of the liquid crystal matrix, its refractive coefficients alterations, and the variation of inclination angle of the sensitized liquid crystal droplets on the considered reliefs were established. The time reaction parameters and the medium relaxation parameters were measured. It was proposed that the liquid crystal composition is a kind of an immersion medium that preserves properties of the introduced nanoparticles, which expands their application scope in optoelectronics and biomedicine.

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.4.83

For citation:

Kamanina N. V., Toikka A. S., Barnash Ya. V., Redka D. N., Lihkomanova S. V., Zybtsova Yu. A., Kyzhakov P. V., Jovanovic Z., Jovanovic S. Functioning features of liquid crystalline cells doped with CoFe₂O₄ nanoparticles. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (4), 83–91 (in Russ.).

*Corresponding author: nvkamanina@mail.ru

© Kamanina N. V., Toikka A. S., Barnash Ya. V., Redka D. N., Lihkomanova S. V., Zybtsova Yu. A., Kyzhakov P. V., Jovanovic Z., Jovanovic S., 2022

Введение

Жидкокристаллические (ЖК) материалы – мезофаза вещества, что эффективно сочетает в себе ряд уникальных особенностей, заметно активированных при внешнем электрическом, световом, механическом и тепловом воздействиях [1–3]. Кроме того, ЖК-композиция обладает способностью ориентировать введенные сенсibiliзирующие частицы, а также изменять свои собственные структурные, динамические и оптико-электронные характеристики в силу проявления характерных свойств, введенных нано- и микроструктур [4–18]. В научной литературе дискутировалось введение в ЖК-композит азокрасителей [7], CdS наностержней [8], WS₂ нанотрубок [13], фуллеренов [15], лантаноидных наночастиц [16, 17], других сенсibiliзирующих субстанций, в том числе полимерных фрагментов. Учитывались как методы сенсibiliзации и способы сборки ЖК-ячеек [9], так и параметры рельефа поверхности на границе раздела: твердая подложка–ЖК–мезофаза [13, 14, 18]. Установлено изменение морфологических свойств, спектральных параметров, рефрактивных и динамических характеристик, угла смачивания поверхности подложки, используемой для ориентирования ЖК-молекул. Применялись аналитические, квантово-химические и качественные модели для объяснения новых свойств композитных материалов на основе полимеров и ЖК, в том числе с учетом возможных процессов межмолекулярного комплексообразования. Для примера, аналитическая теория фотоиндуцированного переноса заряда с матричного материала (полимера) на наноструктуру, в качестве которой может быть выбран фуллерен C₆₀, разработана в работах [19–21]. Авторы публикаций представили гамильтониан сложной фуллерен-содержащей системы в виде суммы трех членов:

$$H = H_{\text{pol}} + H_{\text{C}_{60}} + H_t,$$

где H_{pol} описывает проводящий полимер, $H_{\text{C}_{60}}$ – гамильтониан для молекулы C₆₀ и H_t учитывает перескоки электронов между полимером и молекулой фуллерена. Разработанная аналитическая теория позволяет рассчитать сложную динамику комплексной системы с межмолекулярным комплексом с переносом заряда (КПЗ), учитывающую распределение по времени

числа электронов, находящихся вблизи молекулы C₆₀. Качественное рассмотрение модели межмолекулярного КПЗ, что проявляет создание дополнительного дипольного момента и увеличенной поляризуемости нового ЖК-композита, влияющей на увеличение быстродействия, было предложено в работе [15], а расширенный вариант модели, включая ее применимость и для сенсibiliзированных полимерных матриц, был показан в работах [22–24].

Естественно, разными научно-техническими группами прогнозируется расширенная область использования ЖК-материалов при их сенсibiliзации наночастицами. В настоящей работе продолжено изучение свойств ЖК-мезофазы при использовании в качестве сенсibiliзирующих материалов магнитных наночастиц CoFe₂O₄ и кратко приведены первые полученные результаты.

Экспериментальные условия

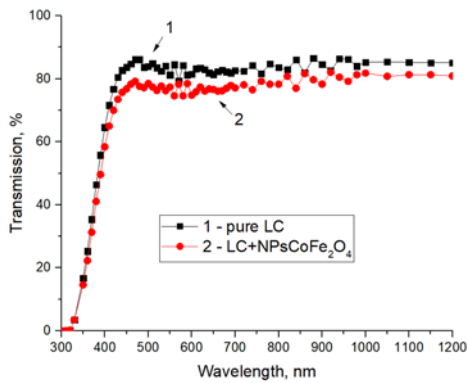
В качестве матричной классической ЖК-смеси использовалась композиция ЖК *4'-Pentyl-4-biphenyl-carbonitrile* (*Sigma-Aldrich*). В качестве сенсibiliзирующей добавки применялись наночастицы CoFe₂O₄, представленные Институтом Винча (Белград, Сербия). Концентрация вводимых наночастиц в ЖК-состав была на уровне 0,1–0,5 вес. %. ЖК-ячейки толщиной 4 и 10 микрон изготавливались в S-конфигурации вручную с последующим втягиванием сенсibiliзируемого композита в созданный зазор.

Для спектральных измерений использовались спектрофотометр видимого диапазона SF-26, функционирующий в диапазоне длин волн 250–1200 нм, а также Фурье-спектрометр ФСМ-1202, работающий в спектральной области 100–2400 нм. Для тестирования смачивания поверхности с последующим измерением угла смачивания применялся прибор OCA 15 EC (разработка фирмы *Data Physics Instruments GmbH*, Фильдерштадт, Германия). Использовался аналитический метод – метод висющей капли с аппроксимацией Лапласа-Янга. Прибор позволяет работать в режиме нанесения капель жидкости объемом от 1 мкл со скоростью от 1 мкл×с⁻¹. Динамические параметры тестировались по схеме Фредерикаса. Для изучения рефрактивных свойств использовался анализ спектров отражения.

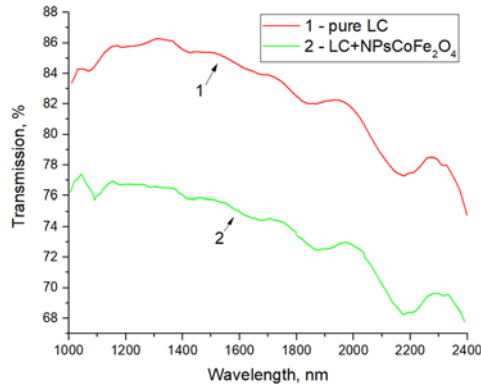
Результаты и обсуждение

Результаты спектральных экспериментов по измерению пропускания системы ЖК+CoFe₂O₄ приведены на рис. 1. Представлены данные по

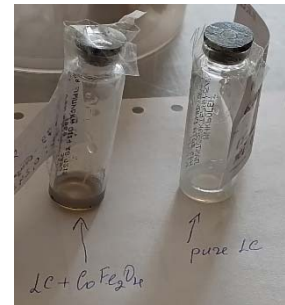
изменению пропускания в видимом диапазоне от 300 до 1200 нм (рис.1, *a*) и в ближнем ИК-диапазоне от 1000 нм до 2400 нм (рис. 1, *b*) для сенсibilизированных ячеек толщиной 4 микрометра.



a



b



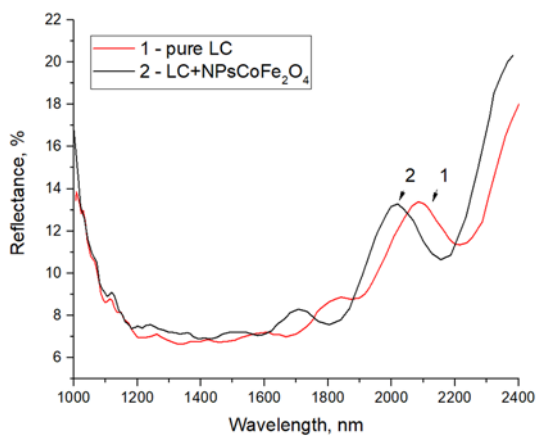
c

Рис. 1. Спектры пропускания в видимом (*a*) и ближнем ИК-диапазоне (*b*) чистого ЖК и системы ЖК + CoFe₂O₄.
 Общий вид чистой (справа) и сенсibilизированной (слева) ЖК-композиции (*c*)

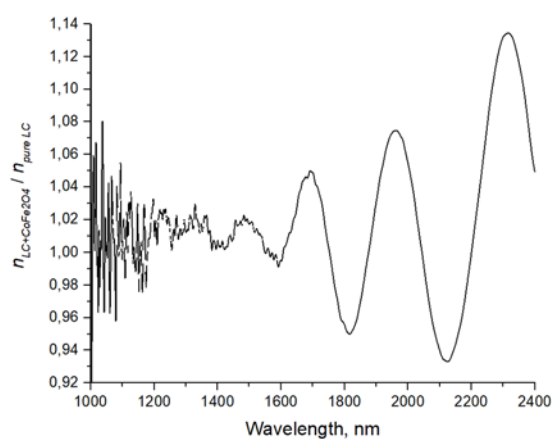
Fig. 1. Transmission spectra of pure LC and LC + CoFe₂O₄ system in the visible (*a*) and in the near IR (*b*) ranges.
 General view of the pure (right) and sensitized (left) LC compositions (*c*)

Заметных сдвигов в спектральных параметрах как в видимой, так и в ближней ИК-области не обнаружено, по крайней мере, при используемом концентрационном диапазоне применяемых наночастиц и при указанных длинах волн; хотя изначально регистрировалось изменение цветовой гаммы от мутно-белого цвета

(матричная чистая ЖК-мезофаза, справа на рис. 1, *c*) до мутно-серого цвета (сенсibilизированный ЖК-композит, слева на рис. 1, *c*). Дополнительно были измерены спектры отражения для двух тестируемых ЖК-ячеек: чистой и сенсibilизированной наночастицами CoFe₂O₄. Данные приведены на рис. 2, *a*.



a



b

Рис. 2. ИК-спектры отражения (*a*) и спектральные зависимости отношения показателей преломления матричного ЖК и системы ЖК + CoFe₂O₄ (*b*)

Fig. 2. Reflectance IR-spectra (*a*) and spectral dependences of refractive indices ratios (*b*) of pure LC and LC + CoFe₂O₄ system

Спектры отражения коррелируют с показанными на рис. 1, *b* спектрами пропускания. Однако стоит уточнить, что при анализе спектров отражения, скорее всего, происходит перестройка энергетической системы уровней, обусловленных переходами между энергетическими уровнями валентных электронов в молекулах в новом композите, что визуализируется по смещению пиков, причем не в батохромную область, а в гипсохромную, то есть в УФ-область. Данное обстоятельство позволяет сказать, что показатель преломления композита априори будет отличаться от показателя преломления чистой ЖК-матрицы. Был сделан пересчет изменения показателей преломления в диапазоне длин волн от 1000 до 2400 нм, согласно полученным ИК-спектрам. Данные приведены на рис. 2, *b*. При пересчете показателя преломления чистых и сенсibilизированных жидкокристаллических композиций из спектров отражения и пропускания использовались формулы Френеля для случая нормального падения [25]. Для сравнения показателей преломления исследуемых сред целесообразно рассматривать их частное

соотношение. Исходя из данных, представленных на рис. 2, *b*, можно обнаружить тенденцию к росту показателя преломления ЖК-среды при введении наночастиц CoFe_2O_4 . Это вызывает дополнительный практический интерес, поскольку возможность варьирования показателя преломления – это дополнительный инструмент при оптическом согласовании ЖК-сред с ориентирующими покрытиями. Заметим, что, естественно, при влиянии света на композит изменяется как электронная, так колебательная и вращательная энергии молекул, однако в данном случае в композите с наночастицами CoFe_2O_4 , скорее всего, преобладает электронная составляющая.

Результаты по измерению угла смачивания поверхности чистой подложки на основе стекла Крон К8, проводящего покрытия ИТО, а также проводящего покрытия ИТО, обработанного поверхностной электромагнитной волной, представлены в таблице. Для сравнения показаны данные по смачиванию выбранных рельефов каплями воды. Через косую черту в таблице представлены данные по тестированию правой и левой сторон капли.

Таблица. Данные по углу смачивания выбранных поверхностей капель чистого и ЖК, сенсibilизированного наночастицами CoFe_2O_4

Table. Wetting angles of the chosen surfaces during their covering with pure LC and LC doped with CoFe_2O_4 nanoparticles

Используемый рельеф поверхности для ориентирования ЖК-системы	Вода	Чистый ЖК	ЖК+ CoFe_2O_4
Стекло Крон К8	56,1/55,7	33,2/33,4	25,4/25,4
	53,1/52,7	33,5/32,8	26,4/26,4
	55,7/52,5	32,9/29,4	25,1/22,8
Подложка с нанесенным проводящим покрытием ИТО	109,8/109,7	48,4/48,6	46,7/46,7
	110,8/110,7	47,9/47,7	49,6/49,1
	110,6/110,6	49,8/50,0	48,5/49,1
Подложка с нанесенным проводящим покрытием ИТО, обработанным поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ)	107,9/107,8	49,2/49,0	49,1/49,4
	106,6/107,0	48,9/48,1	48,3/47,9
	107,8/107,7	49,6/48,2	46,1/45,7

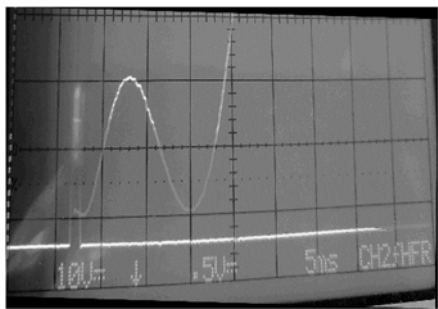
Из представленных значений данных таблицы следует, что нет существенных изменений по углу смачивания каплями чистого и сенсibilизированного ЖК как проводящего покрытия ИТО, так и ИТО с созданным ориентирующим рельефом поверхности. Однако в случае тестирования смачивания поверхности чистого стекла каплями ЖК

и ЖК с наночастицами CoFe_2O_4 установлено почти 25 %-ное уменьшение углов смачивания для сенсibilизированного композита. Как видно, само необработанное стекло не проявляет ориентирующих свойств, характерных как для проводящей гетероструктуры на основе окислов индия и олова (ИТО), так и для рельефа ИТО + ПЭВ.

На рисунке 3 приведены вид осциллограммы ЖК-ячейки с наночастицами CoFe_2O_4 и параметры управляющего напряжения питания в форме прямоугольных импульсов от генератора Г5-82.

Анализируя полученные динамические характеристики, можно сказать, что сенсibilизированный ЖК выбранной толщины (4 микронметра) проявлял устойчивый, практически симметричный отклик среды на управляющее напряжение с амплитудой от 15 В и до 25 В. Время реакции (технический параметр время включения),

определялось по первой осцилляции пропускания $t_{\text{on}} \sim 2\text{--}3$ мс, что соответствовало изменению электрооптического отклика от уровня 0,1 отклика до уровня 0,9 его максимального значения. Время релаксации (технический параметр время выключения) $t_{\text{off}} \sim 5$ мс измерялось по изменению отклика от его максимального значения до уровня 0,1. Не было зарегистрировано существенного изменения времени включения и выключения отклика при увеличении амплитуды управляющего напряжения в диапазоне от 15 до 25 В.



a



b

Рис. 3. Осциллограмма динамического отклика системы ЖК + CoFe_2O_4 толщиной 4 микронметра (а) и параметры напряжения питания (б) с амплитудой импульса 15 В, длительностью 1 мс и частотой следования 5 Гц (0,2 с)

Fig. 3. Oscillogram of dynamic response of the LC + CoFe_2O_4 system with a thickness of 4 micrometers (a) and power supply voltage parameters (b) with a pulse amplitude of 15 V, a pulse duration of 1 ms and a repetition frequency of 5 Hz (0,2 s)

Для чистого же состава аналогичной толщины ячейки наблюдалась характерная динамика уменьшения времени включения и выключения отклика, то есть увеличение быстродействия переключения ячейки при увеличении амплитуды прикладываемого напряжения питания. Варьирование длительностью и частотой следования импульса питания также не приводило к существенным изменениям сенсibilизированной среды по регистрации ее динамического отклика. ЖК-матрица выступала как стабилизирующая иммерсионная композиция, сохраняющая свойства наночастиц CoFe_2O_4 в своем объеме.

Такое поведение вызвало необходимость проанализировать свойства самих магнитных наночастиц на основе CoFe_2O_4 . Из анализа данных [26–31] стало видно, что одной из особенностей данного рода магнитных наночастиц является их высокая чувствительность к деформации. При этом деформационные взаимодействия могут

приводить к существенной магнитоэлектрической связи с изменением коэффициента магнитоэлектрического напряжения. Если рассматривать ЖК как вязкоупругую среду, которая и реально является такой, то естественно, с проявлением деформации при заполнении кювет данной мезофазой, наночастицы CoFe_2O_4 , скорее всего, взаимодействуют с ЖК-молекулами (рис. 1, с – изменение цвета явно регистрируется) и формируют новый композит, свойства которого нужно тестировать, в том числе не только указанными в данном исследовании подходами, но и магнито-оптическими методами. В дальнейшем планируется провести эксперименты с использованием магнетометра и измерить коэрцитивные параметры сенсibilизированной ЖК-среды. Также планируется выявить зависимость коэрцитивной силы от нагревания сенсibilизированной ЖК-среды с введенными магнитными наночастицами.

В настоящей же работе уже показано, что в ЖК-среде достаточно однородно могут быть упорядочены наночастицы CoFe_2O_4 , что, возможно, открывает путь к использованию такого композита для биомедицины.

Заключение

Анализируя результаты настоящего исследования, можно выделить следующие моменты:

1. Система ЖК-наночастицы CoFe_2O_4 интересна и с точки зрения дополнения группы нанообъектов, вызывающих переход нематика в квази-сметтик, что обсуждалось нами в рамках модели межмолекулярного образования с созданием дополнительного дипольного момента и роста поляризуемости системы за счет переноса заряда не на внутримолекулярный фрагмент донорно-акцепторной композиции, а на межмолекулярный акцептор, коим может выступать вводимая наночастица. Ранее мы рассматривали применимость таковой модели для сред с фуллеренами, квантовыми точками, шунгитами, другими наночастицами, вводимыми как в ЖК-матрицу, так и в полимерную композицию. В случае с наночастицами CoFe_2O_4 наблюдаются некие особенности, связанные с сохранением динамических параметров при росте амплитуды напряжения питания, а также регистрации сдвига не в ИК-область, а в УФ.

2. Итак, для системы ЖК-наночастицы CoFe_2O_4 установлено изменение цвета и сохранение динамических параметров в довольно широком диапазоне амплитуд управляющего импульса напряжения питания. Некоторое рассогласование данных по изменению цвета композита с наличием не батохромного, а гипсохромного спектрального сдвига позволяет сказать, что возможна перестройка энергетических уровней нового композита, вызванного не комплексобразованием, а электронным механизмом, что должно влиять на изменение и рефрактивных параметров. На основе анализов спектра пропускания и отражения расчет показал увеличение показателя преломления в сенсibilизированной ЖК-среде с наночастицами CoFe_2O_4 .

3. Установлено и подтверждено экспериментами 25 %-ное уменьшение углов смачивания для сенсibilизированного композита ЖК-

наночастицы CoFe_2O_4 в случае использования рельефа поверхности на основе чистого стекла Крон К8. Возможно, что проявляется дефектная структура аморфного стекла, по-разному влияющего на чистый матричный материал и сенсibilизированный композит.

4. Стоит обратить внимание, что такие эксперименты вполне подходят для проведения лабораторных работ при обучении бакалавров и магистров вузов РФ, поскольку эксперименты довольно наглядны, оборудование легко осваиваемо, к тому же связано с компьютерной программной обработкой данных; анализ результатов дает возможность проявить молодые кадры в формулировании целей и задач материаловедческой ветви оптоэлектроники и фотоники, где используются ЖК-материалы и приборы на их основе.

Благодарности: Авторы благодарят за обсуждение результатов своих коллег по работе в ГОИ, ЛЭТИ, ПИЯФ. Авторы признательны профессору В. В. Беляеву (МГОУ, Москва) за полезные советы. Частично результаты данных исследований были получены при поддержке Фонда поддержки инноваций, проект № 72598.

Acknowledgement: The authors would like to thank their colleagues at Vavilov State Optical Institute, LETI University, and Nuclear Physics Institute for the discussions. Authors would like to acknowledge to Prof. V. V. Belyaev for the useful advices. Some experimental measurements have been partially supported by the Fund of innovation assistance No. 72598.

Список источников / References

1. 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**, 73–104.
2. Zharkova G.M., Sonin A.S. Liquid Crystal Compositions. Novosibirsk, 1994, 213 p. (in Russ.).
3. Kamanina N.V. Photoinduced phenomena in fullerene-doped PDL: potentials for optoelectronic applications. *Opto-Electronic Review*, 2004, **12**, 285–289.
4. Ono H., Kawatsuki N. Orientational photorefractive gratings observed in polymer dispersed liquid crystals doped with fullerene. *Jap. J. Appl. Phys., Part 1*, 1997, **36** (10), 6444–6448.
5. Cipparrone G., Mazzulla A., Nicoletta F.P., Lucchetti L., Simoni F. Holographic grating formation in dye doped polymer dispersed liquid crystals. *Opt. Commun.*, 1998, 150, 297–304.

6. Qingbing Wang, Ruipeng Sun, Yanqing Tian, Ximin Huang. Effect of polymer network on liquid crystal molecules orientation. *Proc. of SPIE*, 1998, 3319, 260–262.
<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/on08/31/2012>.
7. Ouskova Elena, Vapaavuori Jaana, Kaivola Matti. Self-orienting liquid crystal doped with polymer-azo-dye complex. *Opt. Mater. Express*, 2011, **1** (8), 1463–1470.
8. Kuan-Ju Wu, Kung-Ching Chu, Chih-Yu Chao, Yang-Fang Chen. CdS Nanorods imbedded in liquid crystal cells for smart optoelectronic devices. *Nano Letter*, 2007, **7** (7), 1908–1913.
9. Nimmy J.V., Shiju E., Arun R., Varma M.K.R., Chandrasekharan K., Sandhyarani N., Varghese S. Effect of ferroelectric nanoparticles in the alignment layer of twisted nematic liquid crystal display. *Opt. Mater.*, 2017, **67**, 7–13.
10. Bukowczan A., Hebda E., Pielichowski K. *Review: The influence of nanoparticles on phase formation and stability of liquid crystals and liquid crystalline polymers. J. Mol. Liq.*, 2021, **321**, 114849 (32 p.).
DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114849.
11. Wang Q., Chen H., Xing H., Deng Y., Luo Z.-W., Xie H.-L. Long rod-like liquid crystal containing azobenzene and the applications in phase-transition regulation and orientation of nematic liquid crystal. *Crystals*, 2021, **11** (4), 418 (13 p.).
DOI: 10.3390/cryst11040418.
12. Blanc C., 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.
13. Kamanina N., Toikka A., Barnash Y., Zak A., Tenne R. Influence of surface relief on orientation of nematic liquid crystals: polyimide doped with WS₂ nanotubes. *Crystals*, 2022, **12** (3), 391 (9 p.).
DOI: 10.3390/cryst12030391.
14. Chigrinov V., Kudreyko A., Sun J. Photosensitive alignment: advanced electronic paper-based devices. *Crystals*, 2022, **12** (3), 364.
DOI: 10.3390/cryst12030364.
15. 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.
16. Романова К. А., Галяметдинов Ю. Г. Теоретическое моделирование структуры и фотофизических свойств некоторых лантаноид-содержащих металломезогенов // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2016. Т. 16, № 2. С. 80–89. [Romanova K.A., Galyametdinov Yu.G. Theoretical simulation of structure and photophysical properties of some lanthanide-containing metallomesogens. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2016, **16** (2), 80–89. (in Russ.)].
17. Ju Hwan Lee, Jonghoon Won, Hae-Chang Jeong, Dong Hyun Kim, Dong Wook Lee, Byeong-Yun Oh, Jeong-Min Han, Tae Wan Kim & Dae-Shik Seo. Liquid crystal alignment properties on surface-reformed solution-derived lanthanum-doped zinc oxide films. *Soft Materials*, 2019, **17** (1), 32–40.
DOI: 10.1080/1539445X.2018.1545669
18. Kamanina N., Jovanovic Z., Belyaev V. Liquid crystal aligning using different approaches. *J. Phys.: Conf. Series*, 2020, **1560**, 012040, 5 p.
DOI: 10.1088/1742-6596/1560/1/012040.
19. Bruening J., Friedman B. Photoinduced charge transfer in conducting polymer C₆₀ composites. *Chem. Phys.*, 1997, **106**, 9634–9638.
20. Friedman B., Su W.P. Quantum lattice fluctuations and optical properties of nondegenerate conjugated polymers. *Phys. Rev. B*, 1989, **39** (8), 5152–5155.
21. Friedman B., Harigaya K. Quantum lattice fluctuations and luminescence in C₆₀. *Phys. Rev. B*, 1993, **47** (7), 3975–3978.
22. Kamanina N.V., Uskokovic D.P. Refractive index of organic systems doped with nano-objects. *Materials and Manufacturing Processes*, 2008, **23**, 552–556.
23. 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**, 1043–1053.
24. Kamanina N.V., Serov S.V., Shurpo N.A., Likhomanova S.V., Timonin D.N., Kuzhakov P.V., Rozhkova N.N., Kityk I.V., Plucinski K.J., Uskokovic D.P. Polyimide-fullerene nanostructured materials for nonlinear optics and solar energy applications. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2012, **23** (8), 1538–1542. **DOI:** 10.1007/s10854-012-0625-9.
25. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. 2-е изд. М. : Наука, 1973. 720 с. [Born M., Wolf E. Basics of optics. 2nd ed. M. : Nauka, 1973, 720 p. (in Russ.)].
26. Chinnasamy C.N., Jeyadevan B., Shinoda K., Tohji K., Djayaprawira D.J., Takahashi M., Joseyphus R.J., Narayanasamy A. Unusually high coercivity and critical single-domain size of nearly monodispersed CoFe₂O₄ nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83** (14), 2862–2864. **DOI:** 10.1063/1.1616655.
27. Анисимова Н. Ю., Сенатов Ф. С., Миляева С. И., Киселевский М. В. Исследование сорбционных свойств ферромагнитных наночастиц // *Фундаментальные исследования*. 2011. Т. 11, № 2. С. 263–265. [Anisimova N.Yu., Senatov F.C., Milyaeva S.I., Kiselevsky M.V. Investigation of sorption properties of ferrimagnetic nanoparticles. *Fundamental Research*, 2011, **11** (2), 263–265 (in Russ.)].
28. Mirgorod Yu.A., Borshch N.A., Fedosyuk V.M., Yurkov G.Yu. The structure and magnetic properties of cobalt ferrite nanoparticles synthesized in a system of direct micelles of amphiphiles by means of ion floeextraction. *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2012, **86** (3), 418–423.

29. Hara S., Aisu J., Kato M., Aono T., Sugawa K., Takase K., Otsuki J., Shimizu S., Ikake H. One-pot synthesis of monodisperse $\text{CoFe}_2\text{O}_4@Ag$ core-shell nanoparticles and their characterization. *Nanoscale Research Lett.*, 2018, **13** (1), 176. DOI: 10.1186/s11671-018-2544-z.
30. Ahlawat A., Khan A.A., Deshmukh P., Shirolkar M.M., Sinha A.K., Satapathy S., Sathe V.G., Choudhary R.J. Correlation between spin-phonon coupling and magneto-electric effects in $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{PMN-PT}$ nanocomposite: Raman spectroscopy and XMCD study. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*, 2022, **33** (25), 19766–19778. DOI: 10.1007/s10854-022-08780-y.
31. Li W., Ao H., Liu X., Heng Wu, Zhong S., Zhang Yu., Gao R., Deng X., Chen G., Cai W., Fu Ch., Wang Zh. & Lei X. Effect of sintering temperature on magnetoelectric properties of $\text{Co}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4@(\text{Pb}_{0.95}\text{La}_{0.05})(\text{Zr}_{0.86}\text{Ti}_{0.14})\text{O}_3$ ceramics. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*, 2022, **33** (25), 20413–20423. DOI: 10.1007/s10854-022-08857-8.

Вклад авторов:

- ¹**Каманина Н. В.** – создание образцов, проведение сенсibilизации и планирование экспериментов, распределение ролей участников работы, анализ данных и написание статьи.
- ²**Тойкка А. С.** – проведение экспериментов на приборе ОСА (углы смачивания) и пересчет изменения показателя преломления по спектрам отражения.
- ³**Кужаков П. В.** – проведение ИК-спектральных экспериментов.
- ⁴**Редька Д. Н.** – обсуждение результатов
- ⁵**Лихоманова С. В.** – проведение измерений спектров в видимой области.
- ⁶**Зубцова Ю. А.** – заклеивание торцов ЖК-ячеек.
- ⁷**Барнаш Я. В.** – участие в обсуждении.
- ⁸**Jovanovic Z.** – изготовление и предоставление для наших исследований наночастиц CoFe_2O_4 .
- ⁹**Jovanovic S.** – изготовление и предоставление для наших исследований наночастиц CoFe_2O_4 .

Contribution of the authors:

- ¹**Kamanina N.V.** – Development of the samples; sensitization process; plan of the experiments and distribution of roles of the work participants; analyzing the data; writing and editing the paper.
- ²**Toikka A.S.** – Contact angle measurements and calculation of the refractive index based on the reflectance spectra.
- ³**Kuzhakov P.V.** – IR-spectra measurements.
- ⁴**Redka D. N.** – The discussion of the results
- ⁵**Likhomanova S.V.** – VIS spectra measurements.
- ⁶**Zubtcova Yu.A.** – Sealing the ends of LC cells
- ⁷**Barnash Ya.V.** – Participation in discussion.
- ⁸**Jovanovic Z.** – Synthesis and provision with the CoFe_2O_4 nanoparticles for this study.
- ⁹**Jovanovic S.** – Synthesis and provision with the CoFe_2O_4 nanoparticles for this study

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

- ¹orcid: 0000-0002-2903-2685
²orcid: 0000-0002-8694-8497
³orcid: 0000-0002-9302-3265
⁴orcid: 0000-0003-3636-0019
⁵orcid: 0000-0002-1554-8410
⁶orcid: 0000-0002-1738-0199
⁷orcid: 0000-0002-3449-9044
⁸orcid: 0000-0003-1727-4852
⁹orcid: 0000-0003-3577-5060

Поступила 21.09.2022, одобрена 24.10.2022, принята 30.10.2022
Received 21.09.2022, approved 24.10.2022, accepted 30.10.2022