

УДК: 532.783; 535; 535.3; 535.5; 539.4; 53.04

Н. В. Каманина^{1,2}, Ю. А. Зубцова¹, Н. А. Шурпо¹, С. В. Серов¹,
А. А. Кухарчик^{1,2}, П. В. Кужаков¹

**СТРУКТУРНЫЕ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ФОТОРЕФРАКТИВНЫЕ СВОЙСТВА
НАНО- И БИОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ,
ВКЛЮЧАЯ ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ**

¹ОАО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»,
Кадетская линия В.О., д. 5, корп. 2, 199053 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: nvkamanina@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
ул. проф. Попова, д. 5, 197376 Санкт-Петербург, Россия

Структурные, спектральные и фоторефрактивные свойства органических материалов рассмотрены в условиях проведения процесса нано- и биоструктурирования. Основной акцент сделан на перспективу применения различных типов нано- и биообъектов для модификации данных свойств. Матричные системы на основе полиимидов и жидких кристаллов из группы цианобифенилов выбраны в качестве модельных систем для показа увеличения локальной поляризуемости единицы объёма среды в результате межмолекулярного комплексообразования. Подчёркивается особая роль такого макропараметра, как дипольный момент; рост последнего связан с корреляцией между фоторефрактивными и фотопроводниковыми характеристиками, также он является своего рода индикатором дальнейшего изменения динамических свойств. Более того, наблюдаются некоторые механические особенности наноструктурных сеток в материалах. Рассмотрено возможное применение нано- и биоструктурированных органических материалов в оптоэлектронике и биомедицине.

Ключевые слова: органические материалы, жидкие кристаллы, структурирование, наночастицы, биочастицы, ДНК, фоторефракция, механические свойства, взаимодействие лазерного излучения с веществом.

N. V. Kamanina^{1,2}, Yu. A. Zubtsova¹, N. A. Shurpo¹, S. V. Serov¹,
A. A. Kukharchik^{1,2}, P. V. Kuzhakov¹

**STRUCTURAL, SPECTRAL AND PHOTOREFRACTIVE PROPERTIES
OF NANO- AND BIOSTRUCTURED ORGANIC MATERIALS
INCLUDING LIQUID CRYSTALS**

¹OAO «Vavilov State Optical Institute»
Cadet Line V.O., 5, Bldg. 2, 199053 St. Petersburg, Russia. E-mail: nvkamanina@mail.ru

²St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI»,
prof. Popova str., 5, 197376 St. Petersburg, Russia

Structural, spectral, optical and photorefractive features of the nanostructured organic materials are studied under the nano- and biostructurization condition. The main accent is given to show the perspective of the different types of the nano- and bioobjects to modify the structural and photorefractive properties. Basic matrix polymer, namely, polyimide and liquid crystal matrixes from cyanobiphenyl groups are chosen as the good model to increase the local volume polarizability via intermolecular charge transfer complex formation. Special role of the dipole moment as a macroscopic parameter of a medium accounts for a relationship between the photorefrac-

tion and the photoconductivity characteristics and it can be considered as an indicator of following dynamic parameters change. Moreover, some mechanical achievement of the nanoobjects-containing network is observed. Possible applications of the organic nano- and bioobjects-doped composites are discussed to apply them in the optoelectronics and biomedicine.

Key words: organic materials, liquid crystals, structuring, nanoparticles, bioparticles, DNA, photorefractation, mechanical features, laser-matter interaction.

Введение

В последние 10–15 лет достаточно большое количество экспертных научно-технических групп работает в области наноструктурирования перспективных оптических органических материалов, включая жидкие кристаллы (ЖК), при использовании фуллеренов, квантовых точек, углеродных нанотрубок, а также при модификации рельефа поверхности на границе двух сред: твердая подложка – ЖК, др. [1–9]. Заметим, что один из механизмов, связанных с проявлением новых структурных, спектральных и нелинейно-оптических свойств в данных наноконпозициях, связан с образованием комплексов с переносом заряда (КПЗ). Наночастицы, структурируя матричный материал, усиливают процесс самоорганизации, увеличения параметра порядка при создании своеобразной квази-сетки – network, что существенно проявляется в изменении физико-химических свойств. Наши собственные эксперименты в данном направлении показывают, что обнаруживаются сдвиги в спектрах поглощения в ИК-область спектра, улучшаются модуляционные характеристики, изменяется параметр порядка, устанавливается эффект ослабления излучения, увеличивается дипольная поляризуемость, изменяется подвижность носителей заряда, др. [10–23].

В данной работе впервые представлены сравнительные результаты и первый анализ экспериментов по изучению оптических свойств органических структурированных материалов, когда наряду с наночастицами используются и биообъекты на примере ДНК. При этом аналогично с термином «наноструктурированные» материалы, определяющим изменение свойств материалов при введении в их объем или при осаждении на поверхность новых эффективных нанобъектов, как-то: фуллеренов, нанотрубок, шунгитов, графенов, квантовых точек, нановолокон, др., дадим трактовку термину *биоструктурированные* материалы, полагая изменение свойств функциональных материалов при введении биообъектов, например: эритроцитов, томатоцитов, пойкилоцитов, ДНК, РНК, др. Заметим, что подобный термин введен, например, на сайте университета Копенгагена, однако

используется для создания и изучения новых лекарств [24], а не физико-химических свойств новых функциональных материалов, включая жидкие кристаллы.

Экспериментальные условия

В качестве матричных органических модельных структур использовались полиимидные композиции и ЖК из класса цианофенилов. Для сенсбилизации органических материалов были применены фуллерены C_{60} и C_{70} , купленные по каталогу фирмы Alfa Aesar, нанотрубки были получены преимущественно от отечественных разработчиков. Так, одностенные углеродные нанотрубки (ОСУНТ) были синтезированы в группе А. В. Крестинина (лаборатория дисперсных углеродных материалов, Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка), многостенные углеродные нанотрубки (МСУНТ) типа XNM-HP-11050 были получены из компании XinNano Materials, Inc. (Taiwan). Смесь УНТ и нановолокон типа МИГ и 65БР были синтезированы во Владимирском государственном университете и Новосибирском Институте катализа им. Г. К. Борескова методом каталитического пиролиза углеродсодержащих газов при температурах 500–700 °С. Биочастицы – ДНК красных рыб – были предоставлены в рамках работы по гранту «BIOMOLEC» зарубежными коллегами. Процесс сенсбилизации полиимида нанобъектами был ранее показан, например, в работе [13], выявление комплекса на основе 2-циклооктиламина-5-нитропиридина (COANP)- C_{70} , – в работе [25], а введение нанобъектсодержащих комплексов в ЖК – в публикации [26].

При изучении спектральных характеристик чистых матричных и наноструктурированных материалов использовались спектрометры видимого и ИК-диапазонов, а именно: СФ-26 и Фурье-спектрометр Инфралюм ФТ-08. При тестировании структуры материалов и изучении их прочностных параметров применялся микроскоп и микротвердомер ПМТ-3М разработки ОАО «ЛМО». Схема, использованная для измерения фоторефрактивных

откликов, основывалась на аналогичной разработке, показанной ранее в публикациях [27, 28]. Использовалась вторая гармоника импульсного наносекундного неодимового лазера (длина волны 532 нм); эксперименты проводились в режиме дифракции Рамана – Ната на пространственных частотах 90–150 мм⁻¹. Плотность излучения варьировалась в диапазоне $0,03 \times 10^{-3}$ –0,6 Дж×см⁻².

Результаты и обсуждение

Основные результаты данного исследования показаны в таблице и частично были опубликованы в предыдущих публикациях [14, 16–23, 29, 30]. Мы применили свой опыт работы с наноструктурированными органическими материалами, проявляющими высокие значения кубичной нелинейности, и распространили процедуру расчета нелинейных параметров, показанную в публикации [31], на наши системы [16, 18–20].

Анализ данных таблицы, что касается полиимидных систем, показывает, что произошло доминирование межмолекулярных акцепторов со сродством к электрону 2 (шунгит); 2,65 (фуллерен); 3,8–4 eV (квантовые точки), над внутримолекулярным фрагментом полиимида со сродством к электрону диимида на уровне 1,1–1,4 eV. При этом очевидно не только влияние величины сродства к электрону, но и концентрации сенсibiliзирующей нанодобавки на создание увеличенного дипольного момента, на увеличение локальной поляризуемости единицы объема среды и, как следствие, – на увеличение фоторефрактивных параметров и динамических процессов в сенсibiliзированной полиимидной системе в целом. Естественно предположить, что угол поворота нанобъекта (на примере УНТ) существенно изменит путь переноса носителя заряда [30], что также приведет, с одной стороны, к дополнительному полевому градиенту и изменению дипольного момента (пропорционального произведению заряда на расстояние), с другой – к изменению подвижности носителей заряда. Кроме того, на безбарьерный путь переноса заряда будет влиять конкуренция между диффузией и дрейфом носителей при создании дифракционной картины с разным периодом, а следовательно, с разной локализацией заряда в пучностях и впадинах решетки. Так, при засветке нанокompозита на малых пространственных частотах (большой период записываемой дифракционной решетки) вероятнее всего будет

доминировать дрейфовый механизм растекания носителей в поле электрического вектора интенсивной световой волны, а на больших пространственных частотах (малый период записываемой дифракционной картины) будет доминировать процесс диффузии носителей. В данное объяснение вполне логично укладывается рассогласование данных по светоиндуцированному изменению показателя преломления, большая величина которого достигнута (для наглядности, см., например, системы с двустенными углеродными нано-трубками и со смесью углеродных нанотрубок и нановолокон МИГ и 65БР, табл.) на меньших пространственных частотах записи, а меньшие величины наведенной фоторефрактивной добавки получены на высоких пространственных частотах.

Кроме того, мы провели запись тонкой дифракционной решетки и оценили светоиндуцированное изменение показателя преломления для полимер-диспергированного (ПДЖК) с квантовыми точками и ДНК. Дополнительно для данной системы в сравнении с другими ЖК-композитами с наноструктурами были измерены спектры пропускания, показавшие для композита ЖК-квантовые точки-ДНК наличие bathochromного сдвига в спектре с появлением полосы поглощения в диапазоне 540–590 нм с пропусканием на уровне 85 %, не характерного для других составов. На рисунке 1 приведен данный спектр (см. кривая 6, рис. 1) в сравнении с другими спектральными кривыми.

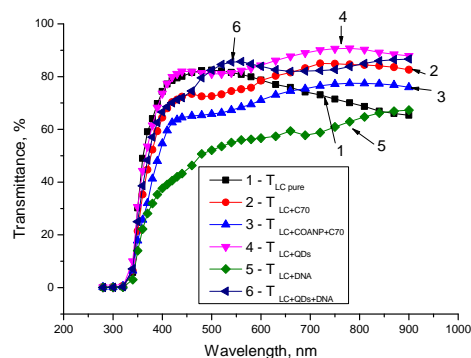


Рис. 1. Спектральные зависимости ЖК-композитов с разными нано- и биодобавками

Установлено также наличие эффекта просветления ЖК-среды при введении нано- и биочастиц. После 600 нм, вплоть до 1100 нм все использованные добавки позволяют работать с ЖК-матрицами на уровне пропускания 60–85 % и

более, в то время как чистый ЖК-композит ограничивает пропускание до уровня 65–70 %.

Возвращаясь к оценке фоторефрактивных параметров, мы использовали известное соотношение между дифракционной эффективностью и наведенным значением показателя преломления при реализации записи амплитудно-фазовых решеток в условиях Рамана – Ната, когда выполняется условие: $\Lambda^{-1} \geq d$, где Λ – пространственная частота записи, d – толщина среды:

$$\eta = \frac{I_1}{I_0} = \left(\frac{\pi \Delta n_i d}{2\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

здесь Δn_i – лазерно-индуцированное изменение показателя преломления, I_1 – интенсивность излучения, прошедшего в первый порядок дифракции, I_0 – падающее излучение.

Заметим, что оцененные значения нелинейной рефракции n_2 и кубичной нелинейной восприимчивости $\chi^{(3)}$ на основе выражений

$$n_2 = \frac{\Delta n_i}{I} \quad (2)$$

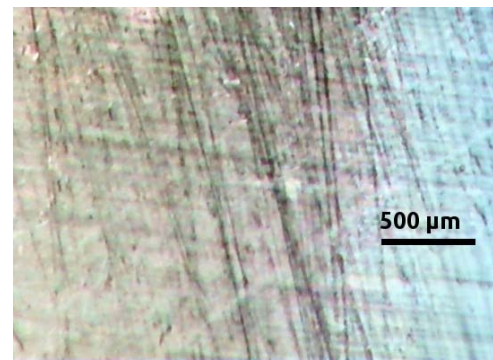
$$\chi^{(3)} = \frac{n_2 n_0 c}{16\pi^2}, \quad (3)$$

дают основание сказать, что данные параметры находятся для нано- и биосенсибилизированных изучаемых структур в диапазоне: $n_2 = 10^{-10} - 10^{-9} \text{ см}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ и $\chi^{(3)} = 10^{-10} - 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{эрг}^{-1}$. Для сравнения, такие классические нелинейно-оптические среды, как кварц, CS_2 , CCl_4 , др. проявляют n_2 и $\chi^{(3)}$ на уровне $\sim 10^{-16} \text{ см}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ и $\sim 10^{-14} \text{ см}^3 \cdot \text{эрг}^{-1}$, соответственно, что показывает перспективу использования органических наноструктурированных материалов и элементов на их основе для целей нанoeлектроники и биомедицины.

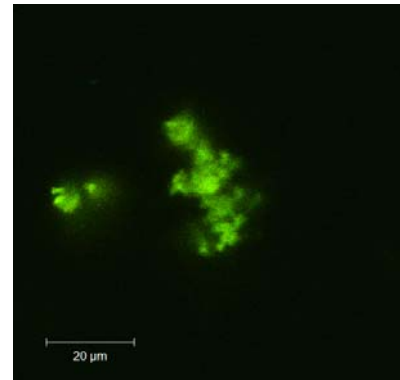
Стоит сказать, что наряду с оптическими характеристиками мы установили некую последовательность в изменении структурных параметров при наноструктурировании полимерных полиимидных композиций. При этом создание своеобразной сетки из наночастиц и комплексов на их основе в наноструктурном композите (с фуллеренами, шунгитами, квантовыми точками, волокнами,

нанотрубками) увеличивает микротвердость тонких пленок, по крайней мере, на 3–7 %. Для полиимидных матриц с фуллеренами такая сетка была показана в работе [14]. Напомним, что изменение параметра порядка ЖК при введении фуллеренов представлено в публикации [17], а обнаруженный эффект структурирования ЖК-мезофазы биообъектами на примере эритроцитов был представлен в работах [33, 34].

В настоящем изучении визуализация изменения структуры ЖК-композита при введении в жидкий кристалл ДНК показана на рис. 2, а; а снимок ДНК в ЖК-среде при использовании люминесценции квантовых точек, снятый на оборудовании EPI-fluorescence and S2000 spectrometer from Ocean Optics (BIOMOLEC), представлен на рис. 2, б.



а



б

Рис. 2. Структурные изменения электрооптической мезофазы (а) и процесс визуализации ДНК (б) в структурированном жидком кристалле

**Лазерно-индуцированное изменение показателя преломления
в полиимидных матрицах и ЖК**

Изучаемая структура	Концентрация добавки, вес. %	Длина волны (нм)	Плотность энергии, Дж×см ⁻²	Пространственная частота, мм ⁻¹	Длительность импульса, нс	Изменение показателя преломления, Δ <i>n</i> _i
Чистый полиимид	0	532	0,6	90	20	10 ⁻⁴ –10 ⁻⁵
ПИ + краситель ма- лахитовый зелёный	0,2	532	0,5–0,6	90–100	10–20	2,87×10 ⁻⁴
ПИ + квант. точки CdSe(ZnS)	0,003	532	0,2–0,3	90–100	10	2,0×10 ⁻³
ПИ + окислы графена	0,1	532	0,2	100	10	3,4×10 ⁻³
ПИ + шунгит	0,2	532	0,063–0,1	150	10	3,8–5,3×10 ⁻³
ПИ + C ₆₀	0,2	532	0,5–0,6	90	10–20	4,2×10 ⁻³
ПИ + C ₇₀	0,2	532	0,6	90	10–20	4,68×10 ⁻³
ПИ + CNTs	0,1	532	0,5–0,8	90	10–20	5,7×10 ⁻³
ПИ + CNTs	0,05	532	0,3	150	10	4,5×10 ⁻³
ПИ + CNTs	0,07	532	0,3	150	10	5,0×10 ⁻³
ПИ + CNTs	0,1	532	0,3	150	10	5,5×10 ⁻³
ПИ + двустенные УНТ	0,1	532	0,063–0,1	100	10	9,4×10 ⁻³
ПИ + двустенные УНТ	0,1	532	0,063–0,1	150	10	7,0×10 ⁻³
ПИ + смесь УНТ и волокон (тип МИГ)	0,1	532	0,6	90–100	10	11,7×10 ⁻³
ПИ + смесь УНТ и волокон (тип МИГ)	0,1	532	0,3–0,6	150	10	11,2×10 ⁻³
ПИ + смесь УНТ и волокон (тип 65БР)	0,1	532	0,1–0,3	90–100	10	12,0×10 ⁻³
ПИ + смесь УНТ и волокон (тип 65БР)	0,1	532	0,1	90	10	15,2×10 ⁻³
ПДЖК на основе комплекса СОАНР-С ₇₀	1	532	0,017–0,02	100	20	1,4×10 ⁻³
ПДЖК на основе комплекса ПИ-С ₇₀	0,2	532	0,1–0,3	90–100	10	1,2×10 ⁻³
ПДЖК на основе ДНК	*	532	0,1	120	30	1,39×10 ⁻³
ПДЖК на основе комплекса квантовые точки CdSe(ZnS)-ДНК	**	532	0,1	120	30	1,35×10 ⁻³
ЖК	***	514,5	0,2 Вт×см ⁻²			0,16×10 ⁻³

* Соотношение ЖК к водному раствору ДНК (с концентрацией ~4,72 г×л⁻¹) составляло 5:1.

** Содержание квантовых точек в ЖК1289 (и, аналогично в LC 5CB) было на уровне 0,003 вес. %

*** Данные работы [32]

В плане проведения дальнейших исследований функциональных органических материалов, в том числе, жидких кристаллов, с учетом их нано- и биоструктурирования, вполне целесообразно и логично применить методы атомно-силового анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии, а также изучить изменение вязкостных свойств ЖК-мезофазы с учетом рекомендаций, данных в публикации [35].

Заключение

- Впервые с ЖК, структурированным ДНК, записана тонкая дифракционная решётка в условиях дифракции Рамана – Ната и вычислено лазерно-индуцированное изменение показателя преломления такого композита, что предполагает дальнейшее возможное использование дешёвых биообъектов, на примере ДНК, для систем записи-считывания, хранения, конверсии, модуляции лазерного излучения, а также в биомедицине.
- Проведено сравнительное исследование, позволяющее показать роль нано- и биообъектов в изменении структурных, спектральных и фоторефрактивных параметров органических материалов на примере полиимидов и ЖК из класса цианобифенилов.
- Подчеркнута важная роль изменения локальной поляризуемости единицы объема среды (кубичной нелинейности) в проявлении рефрактивных и, следовательно, фотопроводниковых и динамических свойств органических структурированных материалов при использовании нано- и биообъектов.
- Подтверждено при введении нанообъектов и установлено при использовании биообъектов, что введение нано- и биочастиц вызывает просветление ЖК-композита, что позволяет функционировать электрооптическим матрицам на его основе вплоть до ближнего ИК-диапазона.
- Подтверждено и расширено при использовании в качестве биообъектов – ДНК, что введение нано- и биообъектов вызывает изменение структуры ЖК-композита, что должно априори влиять на изменение его параметра порядка.
- Расширена база данных по фоторефрактивным характеристикам органических материалов при использовании фуллеренов, шунгитов, графенов, углеродных нанотрубок, волокон, а также биочастиц на примере ДНК.
- Естественно, данные исследования требуют дальнейшего продолжения, а накапливаемые

данные – скрупулезного и внимательного объяснения, что возможно будет сделать как с применением аналитических расчетов, так и на основе квантово-химического моделирования.

Благодарности

Авторы благодарят своих зарубежных коллег Prof. D. P. Uskokovic (Institute of Technical Sciences of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Belgrade, Serbia), Prof. Iwan Kityk (Electrical Engineering Department, Czestochowa University Technology, Czestochowa, Poland), Prof. Francois Kajzar (Université d'Angers, Institute des Sciences et Technologies Moléculaires d'Angers), Dr. Chantal Andraud (Ecole Normale Supérieure de Lyon, France), PhD-student Rodrigo Sabadini (Brazil), а также профессора В. В. Беляева (МГОУ, Москва) и своих коллег по институту П. Я. Васильева, канд. физ.-мат. наук В. И. Студёнова (ОАО «ГОИ им. С. И. Вавилова»), за полезные дискуссии на конференционных, межинститутских и лабораторных семинарах и помощь на разных этапах выполнения работы.

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-03-00044 (2013–2015); проекта «BIOMOLEC» (2011–2014) по программе FP7, Marie Curie Action; проекта «Нанокоатинг-ГОИ».

Список литературы / References

1. Henari F., Callaghan J., Stiel H., Blau W., Cardin D. J. Intensity-dependent absorption and resonant optical nonlinearity of C₆₀ and C₇₀ solutions // Chem. Phys. Lett. 1994. Vol. 199. P. 144–148.
2. Hosoda K., Tada R., Ishikawa M., Yoshino K. Effect of C₆₀ doping on electrical and optical properties of poly[(disilanyl)oligophenylenes] // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. Part 2. Vol. 36, № 3B. P. L372–L375.
3. Charles P. Poole Jr., Owens Frank J. Introduction to Nanotechnology. Wiley Interscience, New York, June 2003. 400 p.
4. Brabec C. J., Padinger F., Sariciftci N. S., Hummelen J. C. Photovoltaic properties of conjugated polymer/methanofullerene composites embedded in a polystyrene matrix // J. Applied Physics. 1999. Vol. 85, № 9. P. 6866–6872.
5. Grishina A. D., Licea-Jimenez L., Pereshivko L. Ya., Krivenko T. V., Savel'ev V. V., Rychwalski R. W. and Vannikov A. V. Infrared photorefractive composites based on polyvinylcarbazole and carbon nanotubes // High Energy Chemistry. 2006. Vol. 40, № 5. P. 341–347.
6. Wei Lee, Hsu-Chih Chen. Diffraction efficiency of a holographic grating in a liquid-crystal cell composed of asymmetrically patterned electrodes // Nanotechnology. 2003. № 14. P. 987–990.
7. Khoo I. C., Yana Zhang Williams, Lewis B., Mallouk T. Photorefractive CdSe and gold nanowire-doped liquid crys-

- tals and polymer-dispersed-liquid-crystal photonic crystals // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2006. Vol. 446. P. 233–244.
8. *Chenli Gan, Yanpeng Zhang, Liu S.W., Yunjun Wang, Min Xiao.* Linear and nonlinear optical refractions of CR39 composite with CdSe nanocrystals // *Optical Materials.* 2008. Vol. 30. P. 1440–1445.
 9. *Tsoi V. I., Tarasishin A. V., Belyaev V. V., Trofimov S. M.* Modelling the diffraction of light by structures with spatial periodicity of the optical parameters of the substance and of the surface relief // *Journal of Optical technology.* 2003. Vol. 70. P. 465–469.
 10. *Данилов В. В., Калинин А. Г., Каманина Н. В., Тульский С. А.* Эффект оптического ограничения в системе холестерический жидкий кристалл–фуллерен // *Письма в ЖТФ.* 1998. Т. 24, № 9. С. 66–69. [*Danilov V. V., Kalintsev A. G., Kamanina N. V., Tul'skii S. A.* Optical limitation effect in a cholesteric liquid crystal – fullerene system // *Tech. Phys. Lett.* 1998. Vol. 24, № 5. P. 359–360].
 11. *Kamanina N., Barrientos A., Leyderman A., Cui Y., Vikhnin V., Vlasse M.* Effect of fullerene doping on the absorption edge shift in COANP // *Molecular Materials.* 2000. Vol. 13, № 1–4. P. 275–280.
 12. *Каманина Н. В., Плеханов А. И.* Механизмы ограничения оптического излучения в фуллерен-содержащих π -сопряженных органических структурах на примере молекул полиимида и COANP // *Оптика и спектроскопия.* 2002. Т. 93, № 3. С. 443–452. [*Kamanina N. V., Plekhanov A. I.* Mechanisms of optical limiting in fullerene-doped π -conjugated organic structures demonstrated with polyimide and COANP molecules // *Optics and Spectroscopy.* 2002. Vol. 93, № 3. P. 408–415].
 13. *Михайлова М. М., Косырева М. М., Каманина Н. В.* К вопросу об увеличении подвижности носителей заряда в органических сопряженных структурах, сенсibilизированных фуллеренами // *Письма в ЖТФ.* 2002. Т. 28, № 11. С. 11–20. [*Mikhailova M. M., Kosyreva M. M., Kamanina N. V.* On the increase in the charge carrier mobility in fullerene-containing conjugated organic systems // *Tech. Phys. Lett.* 2002. Vol. 28, № 6. P. 450–453].
 14. *Kamanina N. V.* Nonlinear optical study of fullerene-doped conjugated systems: new materials for nanophotonics applications // *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Organic Nanophotonics.* 2003. Vol. II/100. P. 177–192.
 15. *Каманина Н. В., Шека Е. Ф.* Ограничители лазерного излучения и дифракционные элементы на основе системы COANP–фуллерен: нелинейно-оптические свойства и квантово-химическое моделирование // *Оптика и спектроскопия.* 2004. Т. 96, № 4. С. 659–673. [*Kamanina N. V., Sheka E. F.* Optical limiters and diffraction elements based on a COANP–fullerene system: Nonlinear optical properties and quantum-chemical simulation // *Optics and Spectroscopy.* 2004. Vol. 96, № 4. P. 599–612].
 16. *Каманина Н. В.* Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации // *Успехи физических наук.* 2005. Т. 175, № 4. С. 445–454. [*Kamanina N. V.* Fullerene-dispersed liquid crystal structure: dynamic characteristics and self-organization processes // *Physics-Usppekhi.* 2005. Vol. 48, № 4. P. 419–427].
 17. *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. Vol. 31, № 6. P. 478–480].
 18. *Kamanina N. V., Vasilyev P. Ya., Vangonen A. I., Studeonov V. I., Usanov Yu E., Kajzar F., Attias A.-J.* Photophysics of organic structures doped with nanoobjects: Optical limiting, switching and laser strength // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2008. Vol. 485. P. 945–954.
 19. *Kamanina N. V., Uskokovic D. P.* Refractive index of organic systems doped with nano-objects // *Materials and Manufacturing Processes.* 2008. Vol. 23. P. 552–556.
 20. *Kamanina N. V., Vasilyev P. Ya., Serov S. V., Savinov V. P., Bogdanov K. Y., Uskokovic D. P.* Nanostructured materials for optoelectronic applications // *Acta Physica Polonica: A.* 2010. Vol. 117, № 5. P. 786–790.
 21. *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.* DOI 10.1007/s10854-012-0625-9. Published on-line 26.01.2012.
 22. *Kamanina Natalia V., Kuzhakov Pavel V., Likhomanova Svetlana V. et al.* Photorefractive, photoconductive, dynamic features and interfaces of the optical materials modified with nano objects // *Nonlinear Optics and Quantum Optics.* 2013, *in print.*
 23. *Kamanina N. V., Rozhkova N. N., Chernozatonskii L. A., Shmidt N. M., Ferritto R., Kajzar F.* Influence of nanostructuring process on the properties of materials // *Nonlinear Optics and Quantum Optics.* 2012. Vol. 45. P. 153–160.
 24. http://drug.ku.dk/research/biostructural_research/
 25. *Kamanina N., Barrientos A., Leyderman A., Cui Y., Vikhnin V., Vlasse M.* Effect of fullerene doping on the absorption edge shift in COANP // *Molecular Materials.* 2000. Vol. 13, № 1–4. P. 275–280.
 26. *Kamanina N. V.* Optical investigations of a C₇₀-doped 2-cyclooctylamino-5-nitro-pyridine – liquid crystal system // *Journal of Optics, A: Pure and Applied Optics.* 2002. Vol. 4, № 4. P. 571–574.
 27. *Kamanina N. V., Vasilenko N. A.* High-speed SLM with a photosensitive polymer layer // *Electron. Lett.* 1995. Vol. 31, № 5. P. 394–395.

28. *Kamanina N. V., Vasilenko N. A.* Influence of operating conditions and of interface properties on dynamic characteristics of liquid-crystal spatial light modulators // *Opt. Quantum Electron.* 1997. Vol. 29, № 1. P. 1–9.
29. *Kamanina N. V., Shurpo N. A., Serov S. V., Vasilyev P. Y., Pogareva V. G., Studenov V. I., Likhomanova S. V., Uskokovic D. P.* Influence of the nanostructures on the surface and bulk physical properties of materials // *Acta Physica Polonica : A.* 2011. Vol. 120, № 2. P. 256–259.
30. *Каманина Н. В.* Влияние пути переноса заряда при межмолекулярном комплексообразовании на нелинейно-оптические и фотопроводниковые характеристики нанокompозитов // *Письма в ЖТФ.* 2012. Т. 38, вып. 3. С. 25–32. [*Kamanina N. V.* The effect of the charge transfer pathway during intermolecular complex formation on nonlinear optical and photoconducting properties of nanocomposites // *Techn. Phys. Lett.* 2012. Vol. 38, № 2. P. 114–117].
31. *Akhmanov S. A., Nikitin S. Yu.* *Physical Optics.* Oxford University Press, USA, 1997. 504 p.
32. *Khoi I. C., Li H., Liang Y.* Observation of orientational photorefractive effects in nematic liquid crystal // *Opt. Lett.* 1994. Vol. 19, № 21. P. 1723–1725.
33. *Каманин А. А., Каманина Н. В.* Структурирование жидкокристаллической мезофазы, вызванное введением эритроцитов // *Письма в ЖТФ.* 2006. Т. 32, вып. 14. С. 25–32. [*Kamanin A. A., Kamanina N. V.* Erythrocyte induced structurization of a liquid crystal mesophase // *Techn. Phys. Lett.* 2006. Vol. 32, № 7. P. 610–613].
34. *Kamanin A. A., Kamanina N. V.* Induced rearrangement of liquid crystal caused by aligning of human erythrocytes // *Materials Science Forum.* 2007. Vol. 555. P. 401–404.
35. *Беляев В. В.* Физические методы измерения коэффициентов вязкости нематических жидких кристаллов // *УФН.* 2001. Т. 171, № 3. С. 267–298. [*Belyaev V. V.* Physical methods for measuring the viscosity coefficients of nematic liquid crystals // *Physics-Uspokhi.* 2001. Vol. 44, № 3. P. 255–284].

Поступила в редакцию 23.12.2013 г.