

УДК 535.8; 535.015; 535.016; 544.032

Каманина Н.В.¹, Кухарчик А.А.^{1,2}, Кужаков П.В.¹,
Зубцова Ю.А.¹, Лихоманова С.В.^{1,3}, Шурпо Н.А.¹,
Серов С.В.¹, Студенов В.И.¹, Васильев П.Я.¹

¹АО «ГОИ им.С.И.Вавилова», отдел «Фотофизика сред с нанобъектами»

²Санкт-Петербургский электротехнический университет («ЛЭТИ»)

³Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА СТРУКТУРИРОВАНИЯ ОБЪЁМА И ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ВКЛЮЧАЯ ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ, НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ, СТРУКТУРНЫЕ И ФОТОРЕФРАКТИВНЫЕ СВОЙСТВА

Аннотация. В настоящей работе рассмотрено влияние нано- и биоструктурирования объема тонких пленок полимерных и жидкокристаллических композитов, а также модификации рельефа поверхности на границе раздела твердая подложка – наноструктура, на спектр пропускания, самоорганизацию, совершенствование фотопроводниковых и фоторефрактивных параметров ряда систем, применяемых в оптоэлектронике, дисплейной технике и биомедицине.

Ключевые слова: наноструктурирование, нанобъекты, биообъекты, мезофаза, органические материалы, жидкие кристаллы, фоторефрактивные свойства, поверхность, граница раздела, взаимодействие лазерного излучения с веществом.

N. Kamanina^{1,2}, A. Kukharchik^{1,2},
P. Kuzhakov¹, Yu. Zubtcova¹, S. Likhomanova^{1,3}, N. Shurpo¹,
S. Serov¹, V. Studeonov¹, P. Vasilyev¹

¹Vavilov State Optical Institute (Saint-Petersburg, Russia)

²Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Saint-Petersburg, Russia)

³ITMO University (Saint-Petersburg, Russia)

INFLUENCE OF THE STRUCTURING PROCESS OF THE BULK AND SURFACE OF MATERIALS, INCLUDING LIQUID CRYSTALS, ON THEIR SPECTRAL, STRUCTURAL AND PHOTOREFRACTIVE PROPERTIES

Abstract. We consider the influence of nano- and biostructuring of the bulk of thin polymer films and liquid crystals as well as the modification of the solid substrate-nanostructure interface on the transmission spectrum, self-assembly, improvement of photoconductive and photorefractive properties of a number of systems that can be applied in the optoelectronics, display equipment and biomedicine.

Keywords: nanostructuring, nano-objects, bio-objects, mesophase, organic materials, liquid crystals, photorefractive properties, surface, interface, laser– matter interaction.

Введение

Известно, что после открытия эффективных современных нанообъектов – фуллеренов (1985 г.) и углеродных нанотрубок (1991 г.), с началом использования последующего ряда других наноструктур, как-то: квантовые точки, графены, шунгиты, нановолокна, нанопроволоки, J-агрегаты, а также с применением ДНК и др. био объектов многие научные и научно-технические группы стали детально, теоретически и экспериментально изучать свойства органических и неорганических материалов, объём которых и граница раздела сред эффективно модифицируются данными типами нано- и биообъектов [1–12]. Этому способствует и тот факт, что современные инновационные разработки широко используются в наукоёмких технологических процессах, что стимулирует указанные выше скрупулёзные исследования в области изучения физико-химических свойств новых материалов, включая жидкие кристаллы, и поверхностей раздела. Однако, несмотря на большое количество работ в указанной области исследования, проблема нахождения новых подходов к структурированию объёма мезофазы и границы раздела сред, расширения перспектив их использования, является актуальной, решение задач с нею связанных, – своевременным. Наши собственные исследования в данном направлении занимают определённую нишу [13–25].

Стоит сказать, что основная причина использования фуллеренов, квантовых точек, шунгитов связана с их развитой поверхностью, уникальной системой энергетических уровней, а также высоким значением сродства к электрону [3–5; 15–17]. Так, сродство к электрону фуллеренов C_{60} и C_{70} ~ 2.65 – 2.7 эВ, сродство к электрону шунгита ~ 2 эВ, таковая величина для квантовых точек находится в диапазоне значений 3.8 – 4.2 эВ. Заметим, что шунгиты имеют довольно большой собственный дипольный момент [26], существенно превышающий таковой у фуллеренов. Основные преимущества использования углеродных нанотрубок обусловлены высокой прочностью их C—C связей [11; 27], а также комплексными механизмами переноса носителей

заряда [24]. Такие особенности наночастиц делают их необычайно интересным объектом формирования новых областей изучения материалов и поиска инновационных практических приложений оптоэлектроники и дисплейной техники. Что касается биочастиц, то актуальность их исследования вызвана возобновляемостью из Мирового океана, а также близостью ряда величин, скажем, по фоторефрактивным параметрам, к таковым, установленным для материалов с наноструктурами [28–33].

Экспериментальные условия

Поскольку основной акцент в данной работе делается на изменение фоторефрактивных особенностей, а также коррелирующие с ними спектральные, структурные, фотопроводниковые изменения мезофазы вещества, то базовые эксперименты были связаны с измерением дифракционной эффективности в первом порядке дифракции тонкоплёночных систем, тестируемых в режиме дифракции Рамана-Ната на пространственных частотах $90\text{--}150\text{ мм}^{-1}$. Таким образом, выполнялось условие превалирования периода решётки, созданной при записи амплитудно-фазовой голограммы над толщиной тонкоплёночной системы, которая состояла от 2–5 (тонкие полимерные наноструктурированные материалы) до 10 микрон (жидкокристаллические наноструктурированные ячейки). Схема была аналогична представленной ранее в работе [34], одна из её модификаций показана на рис. 1.

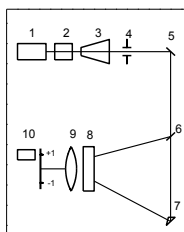


Рис. 1. Экспериментальная установка для записи тонких дифракционных решеток:

1 – Nd:YAG-лазер; 2 – преобразователь во вторую гармонику (532 нм); 3 – телескоп; 4 – диафрагма; 5 – поворотное зеркало ($R\sim 99.9\%$ на $\lambda=532\text{ нм}$); 6 – делительное зеркало ($R\sim 49.9\%$ на $\lambda=532\text{ нм}$); 7 – призма; 8 – образец; 9 – линза; 10 – детектор.

Чтобы не разрушать исследуемые органические материалы и работать при обратимых процессах записи-считывания, плотность энергии записи тонких дифракционных решёток варьировалась в диапазоне 0.03–0.6 Дж·см⁻². В Таблице 1 представлены расчётные значения светоиндуцированного изменения показателя преломления, определяемого из соотношения:

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

где η – дифракционная эффективность; I_1 – интенсивность в первом порядке дифракции; I_0 – интенсивность падающего излучения; Δn_i – наведенное изменение показателя преломления; d – толщина пленки; λ – длина волны излучения лазера. Для последующего пересчёта коэффициентов нелинейной рефракции n_2 и кубичной нелинейной восприимчивости $\chi^{(3)}$ использовалась процедура, аналогичная [35], распространённая для наноструктурированных материалов в [17; 19; 20].

В качестве матричных органических модельных структур использовались полиимидные, полианилиновые, пиридиновые композиции (2-циклооктиламин-5-нитропиридин –COANP) и нематические ЖК из класса цианобифенилов. Для сенсibilизации органических материалов были применены фуллерены C60 и C70, квантовые точки, шунгиты, а также углеродные нанотрубки. Часть сенсibilизаторов была куплена по каталогам Sigma и Alfa Aesar (например, SWCNTs 704121 и fullerene powder #39720, 97 % C70); использовались нанотрубки и 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), а шунгиты – из Института геологии Карельского НЦ РАН (группа Н.Н. Рожковой). Биочастицы – ДНК красных рыб – были предоставлены в рамках работы по гранту “BIOMOLEC” (FP7 Program, Marie Curie Action, 2011–2015) зарубежными коллегами.

Тонкие плёнки получали из растворов методом центрифугирования. ЖК-ячейки собирались вручную в S- и T- конфигурациях при использовании

разработанного рельефа поверхности на основе лазерно-осаждаемых УНТ на проводящие контакты ИТО- и последующей обработки поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ). Процесс получения подобного рельефа, при котором структурированное ИТО покрытие выполняет как роль проводника, так и роль ориентанта ЖК-диполей, позволяет существенно снизить напряжение питания, прикладываемое к ЖК-ячейке, а также установить гомеотропное ориентирование ЖК-молекул [22]. Также нанесение УНТ было выполнено на поверхность некоторых кристаллических материалов УФ-ИК-диапазона с целью расширения спектрального диапазона функционирования ЖК-устройства в целом. Использовалось излучение CO_2 -лазера на длине волны 10.6 микрометров при варьировании мощности излучения максимум в 30 Вт.

При изучении спектральных характеристик чистых матричных и структурированных материалов использовались спектрометры видимого и ИК-диапазонов, а именно: СФ-26 и Фурье-спектрометр Инфралюм ФТ-08. При изучении смачиваемости модифицируемого рельефа поверхности для подтверждения возможности увеличения угла наклона при вертикальной ориентации использовалась камера Genius FaceCam3000, с объективом CCTV с фокусным расстоянием 6.0 – 60 мм; формат изображения 1/3"; диафрагма F1.6).

Результаты и обсуждение

Основные результаты изучения фоторефрактивных параметров представлены в таблице 1. Здесь c – концентрация вводимой сенсibilизирующей добавки, W – плотность энергии записи, Λ – пространственная частота, Δn_i – изменение показателя преломления.

Заметим, что оценённые значения нелинейной рефракции n_2 и кубичной нелинейной восприимчивости $\chi^{(3)}$, на основе выражений: $n_2 = \frac{\Delta n_i}{I}$, $\chi^{(3)} = \frac{n_2 n_0 c}{16\pi^2}$ дают основание сказать, что данные параметры находятся для нано- и био-сенсibilизированных изучаемых структур в диапазоне:

$n_2 = 10^{-10} - 10^{-9} \text{ см}^2 \times \text{Вт}^{-1}$ и $\chi^{(3)} = 10^{-10} - 10^{-9} \text{ см}^3 \times \text{эрг}^{-1}$. С одной стороны, 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 $\sim 10^{-14} \text{ см}^3 \text{ эрг}^{-1}$, соответственно, что показывает перспективу использования органических нано- и биоструктурированных тонкоплёночных материалов и элементов на их основе, включая ЖК, для целей оптоэлектроники и биомедицины. С другой стороны, близкие величины фоторефрактивных параметров при нано- и биоструктурировании аналогичных модельных систем дают основание утверждать, что процесс наноструктурирования вполне логично может быть заменён на биоструктурирование и даже его преобладание в силу возобновляемости нетоксичных биочастиц из Мирового океана.

Таблица 1

Наведённое значение показателя преломления

Изучаемая структура	s , вес. %	W , $\text{Дж} \cdot \text{см}^{-2}$	Λ , мм^{-1}	Δn_i
Чистый полиимид	0	0.6	90	$10^{-4} - 10^{-5}$
ПИ+квант. точки CdSe(ZnS)	0.003	0.2–0.3	90–100	2.0×10^{-3}
ПИ+окислы графена	0.1	0.2	100	3.4×10^{-3}
ПИ+шунгит	0.2	0.063–0.1	150	3.8– 5.3×10^{-3}
ПИ+C60	0.2	0.5–0.6	90	4.2×10^{-3}
ПИ+C70	0.2	0.6	90	4.68×10^{-3}
ПИ+CNTs	0.1	0.5–0.8	90	5.7×10^{-3}
ПИ+ CNTs	0.05	0.3	150	4.5×10^{-3}
ПИ+ CNTs	0.07	0.3	150	5.0×10^{-3}
ПИ+ CNTs	0.1	0.3	150	5.5×10^{-3}
ПИ+двустенные УНТ	0.1	0.063–0.1	100	9.4×10^{-3}
ПИ+двустенные УНТ	0.1	0.063–0.1	150	7.0×10^{-3}
ПДЖК на основе комплекса COANP-C70	1	0.017–0.02	100	1.4×10^{-3}
ПДЖК на основе комплекса ПИ-C70	0.2	0.1–0.3	90–100	1.2×10^{-3}
ПДЖК на основе ДНК	*	0.1	120	1.39×10^{-3}
ПДЖК на основе комплекса квантовые	**	0.1	120	1.35×10^{-3}

точки CdSe(ZnS)-ДНК				
ЖК	***	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 [36], длина волны 514,5 нм.

Для объяснения получаемых результатов ранее была предложена модель доминирования межмолекулярного комплекса с переносом заряда (КПЗ) над внутримолекулярным для фуллеренсодержащих органических систем с изначально существующим донорно-акцепторным взаимодействием [17], расширенная для других наносенсибилизаторов с высоким сродством к электрону, доминирующим над сродством к электрону внутримолекулярного акцепторного фрагмента органической молекулы, в работах [19; 20]. Указывалось на создание увеличенного безбарьерного пути переноса электронов при межмолекулярном взаимодействии и на повышенную плотность заряда, как следствие – формирование повышенного дипольного момента. Для примера, сродство внутримолекулярного акцептора модельных полиимидной и пиридиновой матриц находится в диапазоне 1.1–1.4 и 0.45–0.5 эВ соответственно. При введении в них наночастиц происходит доминирование межмолекулярных акцепторов со сродством к электрону 2 (шунгит); 2.65–2.7 (фуллерен); 3.8–4.2 eV (квантовые точки) над внутримолекулярным акцептором. Более того, вводимые частицы, к примеру, фуллерен, способны захватывать не один, а несколько электронов. Так, в публикации [37] было показано, что C₆₀ делокализует вблизи своей поверхности до 6 электронов. Соответственно, мы предполагали создание большего дипольного момента в системе с межмолекулярным КПЗ, превалирующим над таковым при внутримолекулярном КПЗ. С одной стороны, квадратичная зависимость между дипольным моментом и сечением поглощения предполагает существенное влияние межмолекулярного КПЗ на оптическое ограничение излучения, по крайней мере, в видимом и ближнем

ИК-диапазоне, что регистрируется для всех изученных нами материалов как на 532 нм, так и в области длин волн 805–1315 нм. С другой стороны, увеличение безбарьерного переноса заряда также способствует увеличению подвижности носителей заряда, что проявляется в росте тока при приложении напряжения смещения. Ныне вполне логично расширить таковую модель, включив биочастицы на примере ДНК. На рис. 2 представлена качественная иллюстрация такого процесса.

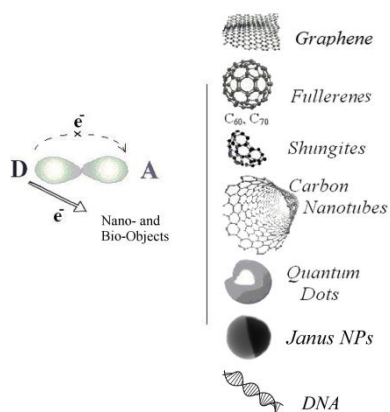


Рис. 2. Модельное представление картины доминирования межмолекулярного КТЗ над внутримолекулярным.

Обращают на себя внимание и такие аргументы в пользу доминирования межмолекулярного КТЗ над внутримолекулярным процессом. Практически во всех изученных материалах наблюдался батохромный сдвиг в спектрах поглощения, а также образование квазисетки – network – в сенсibilизированных системах как результат самоорганизации и изменения параметра порядка. Первичные данные по такому спектральному сдвигу и по наведённой самоорганизации модельных материалов при их структурировании нано- и биочастицами, были представлены, например, в работах [14; 15; 25]. Более того, накоплены данные и по влиянию структурирования углеродными нанотрубками проводящего покрытия ИТО на существенный сдвиг в ИК-область спектральных характеристик ЖК-мезофазы, превышающий таковой, наблюдаемый для ЖК-ячеек

с ориентирующим рельефом в отсутствии УНТ. На рис. 3 показаны спектральные характеристики ЖК-ячеек с одним и тем же фуллеренсодержащим сенсibilизатором объёма мезофазы, но с разным способом обработки границы раздела сред: твёрдая подложка – ЖК. Чётко регистрируется сдвиг спектра в длинноволновую область. Аналогичный эффект был установлен нами и для других сенсibilизаторов, например, наночастиц празеодима и серия, исследуемых для аналогичных смесей, но при разном рельефе ориентирующей поверхности.

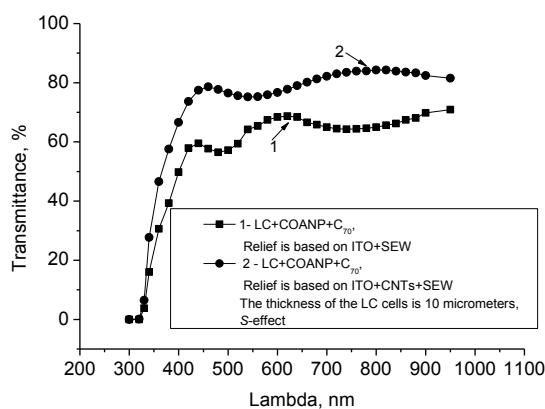


Рис. 3. Спектральные параметры ЖК-ячеек, сенсibilизированных комплексом COANP+C₇₀ при использовании рельефа на границе раздела сред: проводящее покрытие ИТО, обработанное поверхностной электромагнитной волной (1); и та же мезофаза, но с рельефом вида: проводящее покрытие ИТО, лазерно осаждённые УНТ, далее обработанные поверхностной электромагнитной волной.

Предлагается такое модельное рассмотрение установленного эффекта. На рис. 4. приведена возможная картина влияния УНТ на спектральные параметры ЖК-ячеек при создании рельефа с углеродными нанотрубками на поверхности проводящего покрытия. Вполне возможно, что этот процесс можно объяснить, во-первых, существенными проводниковыми свойствами углеродных нанотрубок, связанным большим потоком электронов с остова УНТ, во-вторых, образованием так называемых конусовидных сплетений за счёт частичного слипания УНТ при лазерном воздействии, что способствует

созданию квазиграфеновых поверхностей с повышенной проводимостью. В-третьих, поскольку УНТ обладают как донорными, так и акцепторными свойствами, следовательно, возможна организация переноса заряда между самими нанотрубками; этот иницируемый перенос заряда между углеродными нанотрубками может существенно влиять на энергетическую систему уровней ЖК смесей, которые ориентированы с участием подобного рельефа.

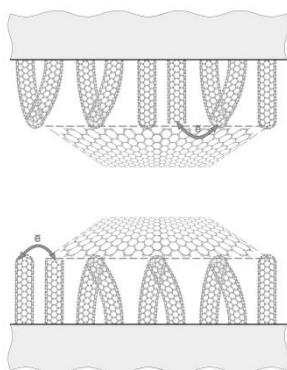


Рис. 4. Модельное рассмотрение ситуации влияния УНТ на спектральные параметры ЖК-ячеек при создании рельефа с углеродными нанотрубками на поверхности проводящего покрытия.

Подтверждением отмеченных обстоятельств может служить экспериментально наблюдаемое снижение сопротивления проводящих контактов с УНТ, в сравнении с меньшим изменением сопротивления при обработке ИТО без УНТ, что показано в таблице 2.

Видно, что сопротивление проводящих контактов без УНТ меняется в пределах 2–2.3 раза после последующей обработки ПЭЭВ, в то время как сопротивление структурированных углеродными нанотрубками проводящих контактов меняется в диапазоне от 2.8 до 3.6. Скорость прохода лазерного луча для приводимых данных была одинакова и составляла $1000 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$.

Таблица 2

**Влияние рельефа поверхности проводящего покрытия ИТО без нанотрубок
и с нанотрубками до и после обработки поверхностной**

электромагнитной волной

№ п/п	Тип обработки (на стекле ИТО или ИТО и CNTs)	Расстояние между лазером и образцом, см	Величины сопротивления образца до обработки ПЭВ, Ом	Величины сопротивления образца после обработки ПЭВ, Ом
1	ИТО	21	100	46
2	ИТО	21	115	52
3	ИТО	23.5	237	100
4	ИТО	23.5	190	95
5	ИТО+CNT	28	195	70
6	ИТО+CNT	28	155	52
7	ИТО+CNT	28	155	43
8	ИТО + CNT	23	250	67

Заметим, что аналогичное снижение сопротивления было обнаружено при лазерном нанесении непосредственно окислов графена на поверхность проводящего покрытия, что также даёт основание полагать, что углеродные наночастицы, а именно УНТ и графен, вполне могут представлять интерес в качестве ориентантов для дисплейных элементов и различных устройств модуляционной техники, использующих в своей конструкции ЖК-мезофазу для электрооптического переключения потоков излучения.

Заключение

Анализируя вышеприведённые результаты, можно сделать следующие выводы:

– Фоторефрактивные, а значит, и фотопроводниковые свойства органических сопряжённых материалов, включая ЖК, могут быть существенно улучшены при нано- и биосенсибилизации объёма вещества.

– Вполне вероятно рассмотреть биочастицы, как конкурирующие сенсibilизаторы органических материалов, в сравнении с наночастицами, в силу схожести величин фоторефрактивных параметров.

– Предлагаемая качественная модель доминирования межмолекулярного взаимодействия над внутримолекулярным может быть распространена на материалы с биообъектами, что показано на примере использования ДНК в качестве сенсibilизатора ЖК-мезофазы.

– Проводниковые слои ИТО, модифицированные углеродными нанотрубками и окислами графена, дополнительно обработанные ПЭВ, способны выполнять как функцию проводника, так и функцию ориентанта жидкокристаллических диполей.

– Рельеф с УНТ, проявляющими донорно-акцепторные свойства, существенно влияет на спектральные параметры ЖК-мезофазы в целом, приводя к ИК-сдвигу спектральных характеристик.

– Установленное существенное снижение сопротивления ИТО-слоев при их модификации УНТ или графенами позволяет существенно снизить напряжение смещения, прикладываемое к ЖК-устройствам в целом.

– Область применения рассмотренных материалов может быть распространена не только на системы нано- и микроэлектроники, но и на устройства, применяемые в биомедицине и микроскопии живых организмов.

Результаты исследований были частично опубликованы в работах [1–3] и представлены на ряде международных и российских конференций (2nd International Workshop on Nano and Bio-Photonics, Биарриц, Франция, 2013; Нанотехнологическая секция в рамках конференции ММТ–2014, Ариэль, Израиль; VIII Международная научная конференция «Кинетика и механизм кристаллизации. Кристаллизация как форма самоорганизации вещества», Иваново, Россия, 2014; Международная конференция «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем, нанoeлектронных приборов и экологических технологий», 21–24 апреля 2015 г., МГОУ, Москва; и др.).

Исследования выполнены при частичной поддержке гранта РФФИ №.13-03-00044 (2013–2015), а также международного гранта по рамочной программе FP7, Marie Curie International researchers exchange proposal “BIOMOLEC” (2011–2015).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Sam-Shajing Sun; Larry R. Dalton. Introduction to Organic Electronic and Optoelectronic Materials and Devices. University of Washington, USA, 2008. 936 p.
2. Третьяков Ю.Д. Богатство наномира. Фоторепортаж из глубин вещества. М., 2009. 176 с.
3. Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C., Curl R.F., Smalley R.E. C60: Buckminsterfullerene. Nature. Vol. 318. P.162–163. 1985.
4. Krätschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Huffman D.R. Solid C60: a new form of carbon. Nature. Vol. 347. P. 354–58. 1990.
5. Couris S., Koudoumas E., Ruth A.A., Leach S. Concentration and wavelength dependence of the effective third-order susceptibility and optical limiting of C60 in toluene solution. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., Vol. 8. P. 4537–4554. 1995.
6. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода. // УФН. 1995. Т. 165. № 9. С. 977–1009.
7. Лозовик Ю.Е., Попов А.М. Образование и рост углеродных наноструктур–фуллеренов, наночастиц, нанотрубок и конусов. // УФН 1997. Т. 167. № 7. С. 751–774.
8. Барабанова Н.Н., Беляев В.В., Богданов Д.Л., Дадиванян А.К., Козенков В.М., Чигринов В.Г. Распределение ориентации молекул красителя в фотоориентирующем слое в зависимости от угла падения поляризованного пучка // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2013. № 2. С. 28–33.
9. Дадиванян А.К., Чаусов Д.Н., Ноа О.В., Беляев В.В., Чигринов В.Г., Пашина Ю.М. Влияние параметра порядка на энергию сцепления жидких кристаллов // ЖЭТФ. 2012. Т.142. Вып. 6(12). С. 1253–1257.
10. Белоусов В.П., Белоусова И.М., Будтов В.П., Данилов В.В., Данилов О.Б., Калинин А.Г., Мак А.А. Структурные, физико-химические и нелинейно-оптические свойства. Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 12. С. 3–37.
11. Robertson J. Realistic applications of CNTs. Materialstoday. October 2004, P. 46–52. 2004.
12. Khoo I.C., Williams Y.Z., Lewis B., Mallouk T. Photorefractive CdSe and Gold Nanowire-Doped Liquid Crystals and Polymer-Dispersed-Liquid-Crystal Photonic Crystals. Mol. Cryst. Liq. Cryst. Vol. 446. P. 233–244. 2006.
13. 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. Vol. 13., No. 1–4. P. 275–280. 2000.

14. Каманина Н.В., Плеханов А.И. Механизмы ограничения оптического излучения в фуллеренсодержащих π -сопряженных органических структурах на примере молекул полиимида и COANP. // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 93. № 3. С. 443–452.
15. 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. Vol. II/100. P. 177–192. 2003.
16. 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.
17. Каманина Н.В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации. // УФН. 2005. Т. 175. № 4. С. 445–454.
18. 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.
19. Kamanina N.V., Uskokovic D.P. Refractive Index of Organic Systems Doped with Nano-Objects. Materials and Manufacturing Processes. Vol. 23. P. 552–556. 2008.
20. 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. Vol. 486. P. 1–11. 2008.
21. Kamanina N.V., Reshak A.H., Vasilyev P.Ya., Vangonen A.I., Studeonov V.I., Usanov Yu.E., Ebothe J., Gondek E., Wojcik W., Danel A. Nonlinear absorption of fullerene- and nanotubes-doped liquid crystal systems. Physica E. Vol. 41. P. 391–394. 2009.
22. Каманина Н.В., Васильев П.Я. О возможности получения гомеотропной ориентации нематических жидкокристаллических элементов при использовании наноструктур. Письма в ЖТФ 2009. Т. 35. Вып. 11. С. 39–43.
23. Каманина Н.В., Богданов К.Ю., Васильев П.Я., Студенов В.И. Повышение поверхностной механической прочности «мягких» материалов УФ и ИК диапазонов спектра и увеличение их спектра пропускания: модельная система MgF₂–нанотрубки. // Оптический журнал. Т. 2010. 76. № 2. С. 84–86.
24. 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.
25. Kamanina N.V. Book “Features of Optical Materials Modified with Effective Nanoobjects: Bulk Properties and Interface”, New York, Physics Research and Technology, “Novinka”, Published by Nova Science Publishers, Inc., New York. 2014. 116 p.
26. Rozhkova N.N., Griбанov A.V., Khodorkovskii M.A. Water mediated modification of structure and physical chemical properties of nanocarbons. Diamond Relat. Mater. No. 16. P. 2104–2108. 2007.

27. Namilae S., Chandra N., Shet C. Mechanical behavior of functionalized nanotubes. *Chemical Physics Letters*. Vol. 387. P. 247–252. 2004.
28. Fritz J., Cooper, E.B., Gaudet S., Sorger P.K., Manalis S.R. Electronic detection of DNA by its intrinsic molecular charge. *PNAS*. Vol. 99. P. 14142–14146. 2002.
29. Firmino A., Grote J.G., Kajzar F., M’Peko J.-C., Pawlicka A. DNA-based ionic conducting membranes. *Journal of Applied Physics*. Vol. 110. No. 3. P. 033704–1– 033704–5. 2011.
30. Hamidreza S., Mahdi E., Houssien M. Double-stranded DNA field effect transistor and logical cells. *Journal of Applied Physics*. Vol. 113. P. 074701–1–074701–4. 2013.
31. Kamanina N.V., Serov S. V., Zubtsova Yu.A., Bretonniere Ya., Andraud Ch., Baldeck P., Kajzar F. Photorefractive Properties of Some Nano- and Bio-Structured Organic Materials. *Journal of Nanotechnology in Diagnosis and Treatment*. Vol. 2. No.1. P. 2–5. 2014
32. Каманина Н.В., Зубцова Ю.А., Шурпо Н.А., Серов С.В., Кухарчик А.А., Кужаков П.В. Структурные, спектральные и фоторефрактивные свойства нано- и биоструктурированных органических материалов, включая жидкие кристаллы. Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2014. Т. 14. № 1. С. 5–12.
33. Kamanina N.V., Serov S.V., Bretonniere Ya, Andraud Ch. Organic Systems and Their Photorefractive Properties under the Nano- and Biostructuration: Scientific View and Sustainable Development. *Journal of Nanomaterials*, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 278902, accepted 19 December 2014.
34. Kamanina N.V. and Vasilenko N.A. Influence of operating conditions and of interface properties on dynamic characteristics of liquid-crystal spatial light modulators. *Opt. Quantum Electron*. Vol. 29. No. 1. P. 1–9. 1997.
35. Ахманов С.А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. М.: Изд-во Московского ун-та. 1998. 656 с.
36. Khoo I.C., Li. H., Liang Y. Observation of orientational photorefractive effects in nematic liquid crystal. *Opt. Lett*. Vol. 19. No. 21. P. 1723–1725. 1994.
37. Brabec C.J., Padinger F., Sariciftci N.S., Hummelen J.C. Photovoltaic properties of conjugated polymer/methanofullerene composites embedded in a polystyrene matrix. *Journal of Applied Physics*. Vol. 85. No. 9. P. 6866–6872. 1999.