

**ФГУП «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. С. И. ВАВИЛОВА»**

На правах рукописи

УДК 535.4;535.5;535.016.

СЕРОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫХ ОТКЛИКОВ
ОРГАНИЧЕСКИХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР
С НАНООБЪЕКТАМИ**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2012 г.

Работа выполнена в ФГУП «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ
КОРПОРАЦИЯ «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. С. И. ВАВИЛОВА

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Наталия Владимировна Каманина

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор **Николай Михайлович Кожевников**

доктор физико-математических наук
профессор **Сергей Васильевич Бронников**

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

Защита состоится 17 октября 2012 в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д407.001.01 при ФГУП «НПК «ГОИ
им. С. И. Вавилова», Биржевая линия, д.12, Санкт-Петербург, 199034, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПК «ГОИ
им. С. И. Вавилова»

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических
наук, доцент

Андрей Германович Журенков

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Большой пробел в отечественной элементной базе в последние 15-20 лет, связанный с отсутствием широкого синтеза новых материалов и малыми темпами модернизации технологического оборудования, привели к необходимости скрупулёзного поиска ниши, где научный задел учёных-разработчиков всё же может быть востребован инженерами и, возможно, сможет быть использован для внедрения в промышленность.

В настоящее время, благодаря широкому использованию лазерных технологий, как зарубежных, так и отечественных в оптоэлектронике, проблема нелинейного взаимодействия оптического излучения с новыми средами является *актуальной*, как с точки зрения фундаментального исследования физических процессов, происходящих при взаимодействии света с веществом, так и в силу большой практической значимости систем, регистрирующих и преобразующих световые потоки, а также обеспечивающих реверсивную запись оптической информации. Открытие таких наноструктур, как фуллерены, одно- и многостенные углеродные нанотрубки, графены, квантовые точки, др. стимулировало процесс поиска новых сред, эффективно поглощающих лазерное излучение в широком диапазоне спектра и интенсивностей засветки, преобразующих по частоте лазерное излучение, модулирующих излучение с использованием наведенной решетки показателя преломления, значение которого отличается от термически индуцированного параметра на порядок и более.

Органические нелинейные оптические (НЛО) материалы, в виде тонкоплёночных структур на основе полиимидов, пиридинов, пролинолов, карбазолов, др., сенсibilизированные нанообъектами, в отличие от объёмных неорганических кристаллов, обладают рядом достоинств, связанных с простотой их технологического синтеза, малостью прикладываемых напряжений питания, малыми геометрическими размерами, др., что важно при использовании данных материалов в сложных лазерных и корреляционных схемах. Посему, данные органические материалы, среди которых *приоритет*

отдаётся полиимидным матрицам, в связи с их высокими температурами деструкции, достигающими 800-1000°C, привлекают все большее внимание исследователей благодаря многоплановости их применения в оптических системах хранения и обработки информации, лазерных переключателях излучения, атомной, солнечной энергетике и т.д.

К моменту начала настоящей работы (2009 г.) были изучены основные особенности чистых и фуллеренсодержащих полиимидных материалов, связанных с проявлением в них эффективных фоторефрактивных процессов и уникальных фотопроводниковых эффектов. Были определены коэффициенты нелинейной рефракции и значения величин кубичной нелинейной восприимчивости, а также оценены вольтамперные характеристики и изменение подвижности носителей заряда. Однако, не был существенно расширен класс сенсibilизаторов, например, с применением углеродных нанотрубок, шунгитов, графенов; не была найдена корреляция между изменением фоторефрактивных параметров и изменением вольтамперных характеристик при нивелировании типа нанобъекта; не были изучены светоиндуцированные отклики на разных пространственных частотах и при варьировании разными нанобъектами.

Цели диссертационной работы.

Целью работы является изучение *нелинейных светоиндуцированных откликов новых фоторефрактивных полиимидных нанокомпозигов, сенсibilизированных нанотрубками, шунгитами и графенами* при использовании метода четырех-волнового смешения. При этом, стоит сказать, что в материаловедении известны и существуют 3 информативных метода изучения оптических и нелинейных оптических свойств материалов, в том числе, - наноструктурных. Это: генерация гармоник, Z-сканирование и четырёх-волновое смешение лазерных пучков. Именно последний метод, в силу возможности оценки параметров нанокомпозигов на разных пространственных частотах записи, и применён в данной диссертационной работе.

В данном направлении проведена работа по синхронизации световой засветки и электрического питания органических материалов, облучаемых лазерными источниками в схеме четырех-волнового смешения; проведено изучение дифракционных откликов наноструктурированных полиимидов на различных пространственных частотах и при варьировании плотности энергии записи, рассчитаны нелинейные параметры: нелинейная рефракция и нелинейная кубичная восприимчивость для полиимидных матриц с разными типами нанобъектов, выявлена и показана корреляция между наведёнными значениями показателя преломления, нелинейной рефракцией n_2 , кубичной нелинейной восприимчивостью $\chi^{(3)}$ и фотопроводниковыми характеристиками. Впервые проведен расчет n_2 и $\chi^{(3)}$ для полиимидных органических материалов с нанотрубками, шунгитами и графенами, сделан анализ по вкладу свойств указанных сенсibilизаторов в фоторефрактивные параметры матрицы.

Научная новизна

В настоящей работе впервые реализована амплитудно-фазовая запись информации в модельной полиимидной органической матрице с большим числом варьируемых наносенсibilизаторов.

Кроме этого, в настоящей работе впервые исследованы светоиндуцированные отклики модельной органической матрицы с разным типом нанобъектов при варьировании пространственной частоты записи и плотности энергии записывающих пучков.

В данной работе впервые для модельной полиимидной матрицы при варьировании широким набором наносенсibilизаторов установлена и изучена корреляция между фоторефрактивными и фотопроводниковыми параметрами.

В настоящей работе впервые экспериментально подтверждена возможность повышения плотности записи за счёт процесса наноструктурирования.

Кроме вышперечисленного, в данной работе существенно расширена, за счет обработки результатов и построения сравнительных таблиц, база данных по светоиндуцированному изменению показателя преломления органических материалов с наносенсibilизаторами.

Практическая ценность

Результаты настоящей работы имеют практическую ценность в следующих направлениях:

1. Применение методов амплитудно-фазовой записи в наноструктурированных материалах для повышения плотности записываемой информации в системах телекоммуникаций, лазерных дисках.
2. Применение методов амплитудно-фазовой записи в системах ограничения оптического излучения за счёт дополнительных потерь энергии на дифракцию.
3. Применение методов наноструктурирования для повышения вольтамперных параметров в системах тестирования газов и примесей.

Личное участие автора

Работа выполнена автором лично. Все представленные в диссертации экспериментальные результаты получены и выполнены лично автором или при его непосредственном участии. Научному руководителю – д.физ.-мат.н. Н. В. Каманиной принадлежит постановка работы, определение целей и задач исследования, помощь в проведении расчётов нелинейных оптических параметров и в формулировании защищаемых положений.

Защищаемые положения.

1. Введение наносенсибилизаторов на основе углеродных нанотрубок, шунгитов, графенов в количестве 0.1 вес.% и менее, в полиимидные органические матрицы, изменяет светоиндуцированную добавку к показателю преломления, на порядок, в сравнение с чистыми полиимидными композитами.
2. Реализованы 3 пути увеличения светоиндуцированных откликов в наноструктурированных полиимидных системах: варьирование пространственной частотой записи, варьирование плотностью энергии записи, а также увеличение процентного содержания наносенсибилизаторов на основе углеродных нанотрубок, шунгитов, графенов с 0.05 до 0.1 вес.%.

3. Теоретически рассчитаны значения нелинейной рефракции и нелинейной кубичной восприимчивости для полиимидных систем с углеродными нанотрубками, шунгитами, графенами, находящиеся в диапазоне: $n_2 \sim 10^{-8} - 10^{-7} \text{ см}^2 \times \text{kВТ}^{-1}$ и $\chi^{(3)} \sim 10^{-10} - 10^{-9} \text{ см}^3 \times \text{эрг}^{-1}$, что существенно выше для таких величин у неорганических электрооптических материалов, например, таких как ниобат лития и превышают таковые значения для чистых матричных полиимидов.
4. Установлена корреляция между изменением фоторефрактивных и фотопроводниковых характеристик полиимидных матриц с углеродными нанотрубками; показано, что подвижность носителей заряда в данных нанокompозитах изменяется на порядок.

Апробация

Основные положения диссертации докладывались на различных международных и отечественных конференциях, таких как: международном молодежном форуме «Будущее авиации за молодой Россией» (2011, 2012, Рыбинск, Жуковский, Москва), международной конференции SPIE-серии “Optical Materials in Defense Systems Technology”, Секция "Optics and Photonics" (Toulouse, 2010); международной конференции “Mathematical Modeling and Computer Simulation of Material Technologies” (Ariel University Center of Samaria, 2010), российско-израильском совещании “The Optimization of the Composition, Structure and Properties of Metals, Oxides, Composites, Nano- and Amorphous Materials” (Israel Academy of Science and Humanities and the Russian Academy of Science, Jerusalem, 2011), на международной материаловедческой конференции серии YUCOMAT (Herceg-Novi, 2009, 2010, 2011).

Публикации

По теме диссертационной работы опубликованы 15 печатных работ. 3 из них – из списка ВАК, 6 – в реферируемых международных журналах, 6 – в сборниках конференций.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 5 приложений. Список использованной литературы содержит 65 наименований. Текст

диссертации содержит 92 страницы машинописного текста, включая 27 рисунков, 11 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели, научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения, которые выносятся на защиту, описана структура работы. Также описывается значимость органических НЛО материалов и их потенциальные применения. Основными достоинствами НЛО материалов в виде тонкоплёночных структур на основе полиимидов, пиридинов, пролинолов, карбазолов, др., сенсублизированные нанобъектами, в отличие от объёмных неорганических кристаллов, являются:

- простота их технологического синтеза,
- небольшое управляющее напряжение,
- малые геометрические размеры,

что важно при использовании данных материалов в сложных лазерных и корреляционных схемах. Органические нелинейные оптические материалы представляют интерес как с точки зрения фундаментального исследования физических процессов, происходящих при взаимодействии света с веществом, так и в силу большой практической значимости систем, регистрирующих и преобразующих световые потоки, а также обеспечивающих реверсивную запись оптической информации.

В Главе I даётся литературный обзор по изучению фоторефрактивных параметров полиимидных и близких к ним органических сопряжённых материалов, как чистых, так и сенсублизированных нанобъектами; рассматриваются свойства используемых нанобъектов, как-то: углеродных нанотрубок, шунгитов, графенов; сделан анализ по областям применения нанокompозитов для целей нелинейной оптики, систем телекоммуникаций, солнечной энергетики, др. Кроме того, даются размерные параметры вводимых наносенсублизаторов, что важно для понимания соответствия локальных областей, на которых происходит взаимодействие света с веществом, в сравнении с длиной волны лазерного источника. Например, диаметр фуллерена

C_{60} примерно равен 1 нм, в то время как диаметр углеродной нанотрубки составляет в среднем 5 нм а длина порядка 100 нм. У углеродных нановолокон длина может достигать нескольких микрон. Углеродные нанобъекты довольно хорошо растворяются в сильно полярных растворителях, таких как, например, тетрахлорэтан и хлороформ.

Также в главе I формулируются основные преимущества структурированных нанообъектами органических сопряжённых композиций, с точки зрения, эффективности изучения фоторефрактивных свойств; они следующие:

1. Наличие большого числа сопряжённых связей и высокое сродство к электрону вводимого межмолекулярного акцептора, что позволяет реализовать межмолекулярный перенос носителей заряда, который эффективно конкурирует с внутримолекулярным.

2. Высокая способность к самоорганизации за счёт большой поверхностной энергии вводимых наноструктур, способствующая повышению однородности структурированных композиций, что немаловажно при рассмотрении локальных малых линейных размеров среды, существенно меньших, чем длина волны воздействующего излучения.

3. Высокая механическая и лазерная прочность за счёт большого количества вводимых трудноразрушимых С-С связей у наноструктур, что приводит к увеличению лучевой стойкости наноструктурированных материалов.

4. Регистрируется проявление повышенной подвижности носителей заряда, что коррелирует с фоторефрактивными параметрами и расширяет области применения.

В Главе II приводятся и анализируются особенности экспериментальных схем, созданных и применяемых в работе регистрирующих датчиков, рассмотрены вопросы оптимизации амплитудно-фазовой записи излучения в исследуемых нанокompозитах, др.

Исследуемые образцы представляли собой тонкую пленку из полиимида с углеродными нанообъектами (фуллерены, нанотрубки, шунгиты, графены.),

политую на основу из оптического стекла К8 с помощью центрифуги. На рис. 1 приведена фотография структуры пленки полиимида с нанообъектами. На рис. 2 показан общий вид такой структуры на подложке из силикатного стекла – крона К8.

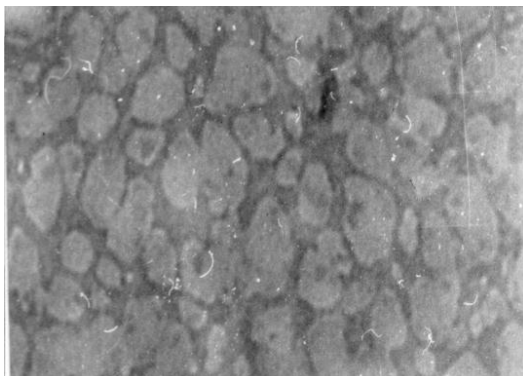


Рис. 1. АСМ-фотография пленки полиимида с нанообъектами.
Масштаб: 200 нм в 1 см

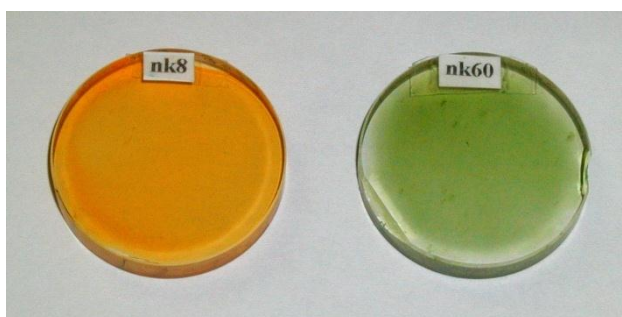


Рис. 2. Общий вид пленки полиимида с различными нанообъектами

Экспериментальная установка представляет собой голографическую схему. Схема установки представлена на рис. 3. Запись тонкой голограммы осуществлялась с помощью Nd-YAG лазера с ламповой накачкой, пассивным модулятором добротности и преобразователем во вторую гармонику, длина волны была $\lambda=532$ нм, длительность импульса составляла $\tau\sim 10-20$ нс. Для измерения дифракционной эффективности использовался второй лазер, либо неодимовый с диодной накачкой с длиной волны 532 нм, либо He-Ne лазер с длиной волны 633 нм. Измерение дифракционной эффективности проводилось путем одновременного замера интенсивности прошедшего через образец излучения и излучения прошедшего в первый порядок дифракции с помощью фотодиодных фотодетекторов.

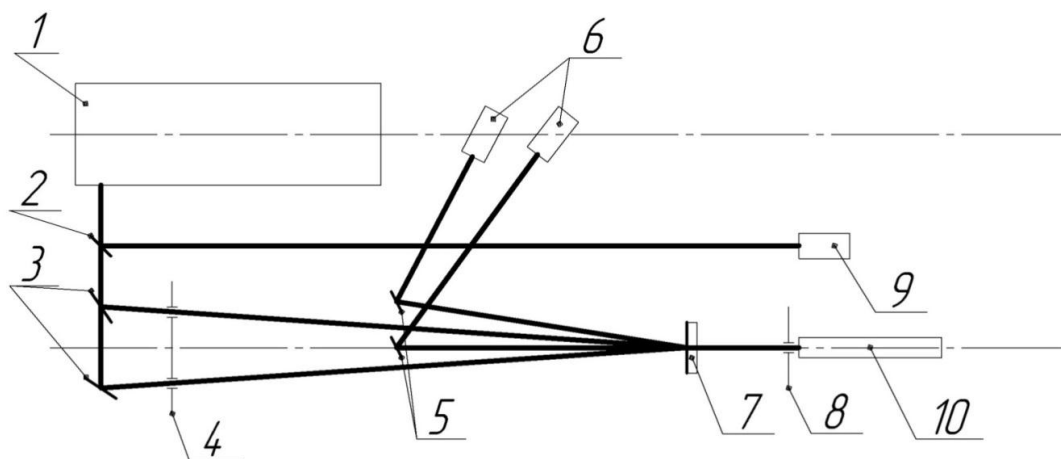


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

1 – Nd:YAG лазер, длина волны 532 нм; 2 – плоскопараллельная стеклянная пластинка; 3 – дихроичные зеркала формирующие голограмму; 4 – диафрагма; 5 – направляющие зеркала; 6 - фотоприемники.; 7 – исследуемый образец; 8 – защитная диафрагма; 9 – блок синхронизации ; 10 – неодимовый с диодной накачкой с длиной волны 532 нм, либо He-Ne лазер

Также в главе II обосновывается выбор топологии схемы фотодиодного усилителя. Приводятся основные источники погрешности измерения, а также методы борьбы с ними. Кроме того описывается работа блока синхронизации и схемы измерения фотопроводниковых параметров для дальнейшего последующего анализа корреляционных зависимостей между фоторефракцией и фотопроводимостью.

В Главе III показаны основные результаты и проведено обсуждение полученных данных. Обсуждаются фоторефрактивные свойства, вольтамперных характеристики полиимидных материалов с углеродными нанотрубками, шунгитами, графенами; анализируется корреляция между указанными выше параметрами.

На рис. 4 приведено АСМ-изображение дифракционной решетки, записанной на полиимиде с нанообъектами; на рис. 5 приведён общий вид дифракционной картины, получаемой в режиме дифракции Рамана-Ната, для полиимидной структуры с нанообъектами. Снимок сделан для случая перехода обратимого механизма записи в необратимый для более чёткого показа получаемого эффекта.

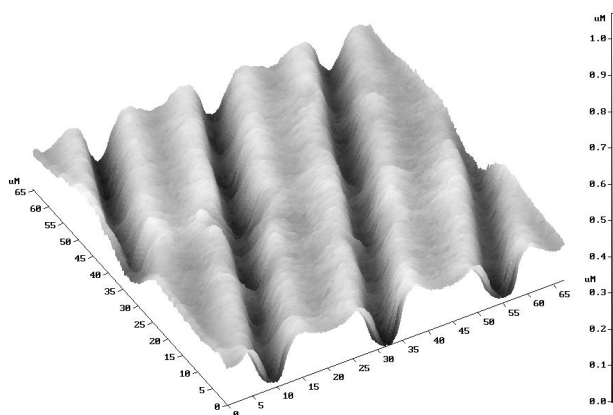


Рис. 4. Изображение, полученное на атомно-силовом микроскопе, рельефа полиимидной пленки после записи дифракционной картины

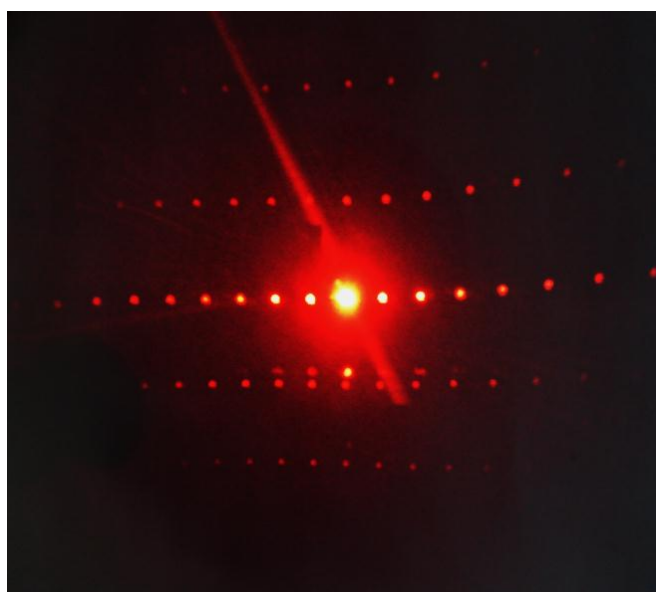


Рис. 5. Дифракция лазерного излучения на наноструктурированной среде

Для расчёта светоиндуцированного изменения показателя преломления, получаемого в режиме дифракции Рамана-Ната, при условии $\Lambda^{-1} > d$ (величина, обратная пространственной частоте записи Λ , то есть период записанной решётки, больше, чем толщина среды d), был применён математический аппарат, предложенный в работе [1] и развитый для органических наноструктурных материалов в публикациях [2-7], с учётом того обстоятельства, показанного в [8], что основным параметром среды, когда длина волны воздействующего излучения (~ 0.5 мкм) существенно больше наноструктурной области ($\sim 100-200$ нм), является дипольная поляризация

среды. Так же приводится расчет случайной погрешности на примере одного из проведенных экспериментов.

В заключение даётся сводная таблица светоиндуцированных откликов изученных нанокомпозитов; приводится сравнительная таблица значений нелинейной рефракции и кубичной нелинейной восприимчивости для исследованных полиимидных материалов в ряду классических фоторефрактивных и электрооптических систем; даётся анализ возможного практического использования.

Основные результаты работы

Основные результаты диссертационной работы следующие:

1. Проведено экспериментальное исследование светоиндуцированных откликов органической полиимидной матрицы, структурированной углеродными нанотрубками, углеродными нановолокнами, шунгитами, графенами.
2. Реализована схема амплитудно-фазовой записи тонких дифракционных решёток в новых наноструктурированных средах в обратимом режиме записи.
3. Теоретически рассчитаны значения нелинейной рефракции и кубичной нелинейной восприимчивости в органических полиимидных матрицах с широким набором нанообъектов, в качестве которых выступали: углеродные нанотрубки, углеродные нановолокна, окислы графенов и шунгиты.
4. Экспериментально установлена корреляция между изменением фоторефрактивных и фотопроводниковых параметров в исследованных органических материалах с нанообъектами.
5. Теоретически рассчитан диапазон изменения подвижности носителей заряда в исследованных органических матрицах с нанообъектами.
6. За счёт составления сравнительных таблиц по светоиндуцированному отклику модельных полиимидных материалов существенно расширена база данных по наведённому значению показателя преломления.

Таблица 1. Лазерно-индуцированное изменение показателя преломления Δn_i в полиимидной матрице с разными типами нанобъектов

Изучаемая структура	Концентрация нанобъектов, вес. %	Длина волны, нм	Плотность энергии, Дж×см ⁻²	Пространственная частота, мм ⁻¹	Длительность лазерного импульса, нс	Δn_i
Чистый полиимид	0	532	0.6	90	20	10^{-4} - 10^{-5}
Полиимид+краситель малахитовый зелёный	0.2	532	0.5-0.6	90-100	10-20	2.87×10^{-4}
Полиимид+шунгит	0.2	532	0.063-0.1	150	10	3.8 - 5.3×10^{-3}
Полиимид+графен	0.2	532	0.28-0.3	100	10	3.65×10^{-3}
Полиимид+C ₆₀	0.2	532	0.5-0.6	90	10-20	4.2×10^{-3}
Полиимид+C ₇₀	0.2	532	0.6	90	10-20	4.68×10^{-3}
Полиимид+нанотрубки	0.1	532	0.5-0.8	90	10-20	5.7×10^{-3}
Полиимид+нанотрубки	0.05	532	0.3	150	10	4.5×10^{-3}
Полиимид+нанотрубки	0.07	532	0.3	150	10	5.0×10^{-3}
Полиимид+нанотрубки	0.1	532	0.3	150	10	5.5×10^{-3}
Полиимид+двустенные нанотрубки	0.1	532	0.063-0.1	100	10	9.4×10^{-3}
Полиимид+двустенные нанотрубки	0.1	532	0.063-0.1	150	10	7.0×10^{-3}
Полиимид+углеродные нановолокна (тип MIG)	0.1	532	0.6	90-100	10	11.7×10^{-3}
Полиимид+углеродные нановолокна (тип MIG)	0.1	532	0.3-0.6	150	10	11.2×10^{-3}
Полиимид+углеродные нановолокна (тип 65BR)	0.1	532	0.1-0.3	90-100	10	12.0×10^{-3}
Полиимид+углеродные нановолокна (тип 65BR)	0.1	532	0.1	90	10	15.2×10^{-3}

Работы автора по теме диссертации

1. **S.V. Serov**, N.V. Shurpo, A.V. Shmidt, H.L. Margaryan, N.V. Kamanina, “Futures of fullerenes and carbon nanotubes for nonlinear optics and display application”, *Diamond and Related Materials*, Vol.18, p. 931-934, **2009**.
2. Н.А. Шурпо, С.В. **Серов**, А.В. Шмидт, «Влияние нанобъектов на свойства жидкокристаллической среды», каталог 12 Конкурса бизнес-идей, научно-технических разработок и научно-исследовательских проектов "Молодые. Дерзкие. Перспективные", с.233-234, **2009**.
3. Н.В. Каманина, **С.В. Серов**, В.П. Савинов, «Исследование фоторефрактивных свойств наноструктурированных органических материалов, сенсibilизированных фуллеренами и нанотрубками», *Письма в ЖТФ*, том 36, вып. 1, с. 89-96, 2010 – **из списка ВАК**
4. N.V. Kamanina, A. I. Plekhanov, **S. V. Serov**, V.P. Savinov, P.A. Shalin, F. Kajzar, “Correlation Between Photoconductive and Nonlinear Optical Characteristics of Fullerene- and Nanotubes-Doped Organic Composites”, *Nonlinear Optics and Quantum Optics*, Vol. 40, pp. 307–317, **2010**.
5. N.V.Kamanina, **S.V.Serov**, N.A.Shurpo, Yu.A.Zubtsova, A.V.Shmidt, A.V. Prokhorenkov, E.A.Tsareva, “Nanostructure influence on the photorefractivity and photoconductivity of the organic systems”, *Proceed of the Sixth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Material Technologies MMT-2010*, Ariel University Center of Samaria, Ariel, Israel, August 23-27, p.2-45– 2-49, **2010**.
6. N.V. Kamanina, **S.V. Serov**, V.P. Savinov, D.P. Uskoković, “Photorefractive and photoconductive features of the nanostructured materials”, *International Journal of Modern Physics B (IJMPB)*, Vol.24, issues: 6-7, p. 695-702, **2010**.

7. N.V. Kamanina, P.Ya. Vasilyev, **S.V. Serov**, V.P. Savinov, K.Yu. Bogdanov, D.P. Uskokovic, “Nanostructured Materials for Optoelectronic Applications”, Acta Physica Polonica A, Vol. 117 No. 5, с.786-790, **2010**.
8. Kamanina N.V., Shurpo N.A., Zubtsova Yu.A., **Serov S.V.**, Vasilyev P.Ya., Studeonov V.I., Prokhorenkov A.V., Kajzar F. “Photorefractive And Photoconductive Properties Of The Organic Materials Doped With Fullerenes, Quantum Dots And Nanotubes”, В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Optics and Photonics for Counterterrorism and Crime Fighting VI and Optical Materials in Defence Systems Technology VII. Сер. "Optics and Photonics for Counterterrorism and Crime Fighting VI and Optical Materials in Defence Systems Technology VII" sponsors: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). Toulouse, **2010**. С. 78381G.
9. Н.В.Каманина, **С.В.Серов**, Н.А.Шурпо, Н.Н.Рожкова. “Светоиндуцированное изменение показателя преломления в наноструктурированных полиимидных системах с шунгитами”, Письма в ЖТФт.37, Вып.20, с.16-22, **2011** – из списка ВАК.
10. Н.А.Шурпо, С.В.Лихоманова, **С.В.Серов**, Д.Н.Тимонин, П.В.Кужаков, Н.В.Каманина, “Наноструктурированные покрытия и рельеф для ЖК-элементов на основе углеродных нанотрубок”, Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. **2011**. № 2. С. 47-50 – из списка ВАК.
11. Н.А. Шурпо, С.В. Лихоманова, **С.В. Серов**, Д.Н. Тимонин, П.В. Кужаков, материалы Международного Молодежного форума «*Будущее авиации за молодой Россией*», «Наноструктурированные покрытия и рельеф для ЖК-элементов на основе углеродных нанотрубок», с. 82- 86, **2011**.

12. N.V. Kamanina, N.A. Shurpo, S.V. Likhomanova, **S.V. Serov**, P.Ya. Vasilyev, V.G. Pogareva, V.I. Studenov, D.P. Uskokovic, “Influence of the Nanostructures on the Surface and Bulk Physical Properties of Materials” *ActaPhysicaPolonica A*, 119 (2), с. 256-259, **2011**.
13. N.V. Kamanina, N.A. Shurpo, S.V. Likhomanova, D.N. Timonin, **S.V. Serov**, O.V. Barinov, P.Ya. Vasilyev, V.I. Studeonov, N.N. Rozhkova, V.E. Vaganov, I.V. Mishakov, A.A. Artukh, L.A. Chernozatonskii, “Features of the nanostructured composites”, Proceedings of the tenth Israeli-Russian Bi-National Workshop 2011 “The Optimization of the Composition, Structure and Properties of Metals, Oxides, Composites, Nano- and Amorphous Materials”, Israel Academy of Science and Humanities and the Russian Academy of Science; 20 June - 23 June, **2011**, p.77-85.
14. N. V. Kamanina, **S. V. Serov**, N. A. Shurpo, S. V. Likhomanova, D. N. Timonin, P. V. Kuzhakov, N. N. Rozhkova, I. V. Kityk, K. J. Plucinski, D. P. Uskokovic, “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 January **2012**.
15. Н.А. Шурпо, С.В. Лихоманова, **С.В. Серов**, О.В. Баринов, М.Ф. Борковский, П.В. Кужаков, Д.Н. Тимонин, материалы Международного Молодежного форума «Будущее авиации за молодой Россией», «Наноструктурированные материалы: перспективы практического использования», с. 29- 35, **2012**.

Список цитируемой литературы

- [1] Akhmanov, S. A., Nikitin, S. Yu. *Physical Optics*, Moscow University Press, Moscow, 1998 [in Russia]; Akhmanov S. A., Nikitin S. Yu. *PhysicalOptics*. Oxford, 1997.

- [2] Н.В. Каманина, «Новые оптические материалы – фуллерены. Свойства и области применения (Учебное пособие)», Санкт-Петербург, Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002, 60с.
- [3] Н.В. Каманина, «Жидкие кристаллы – перспективные материалы оптоэлектроники. Свойства и области применения», Учебное пособие, СПб, Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004, 84 с.
- [4] Н.В. Каманина, «Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации», Успехи физических наук, т. 175, № 4, с. 445-454, 2005.
- [5] Н.В. Каманина, «Электрооптические системы на основе жидких кристаллов и фуллеренов – перспективные материалы наноэлектроники. Свойства и области применения», Учебное пособие, СПб: СПбГУ ИТМО, 137 с., 2008.
- [6] N.V. Kamanina, D. P. Uskokovic, “Refractive Index of Organic Systems Doped with Nano-Objects”, *Materials and Manufacturing Processes*, 23: 552–556, 2008.
- [7] N.V. Kamanina, A. Emandi, F. Kajzar, Andre’-Jean Attias, “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, pp. 1=[1043]–11=[1053], 2008.
- [8] Chemla D S, Zyss J (Eds) *Nonlinear Optical Properties of Organic Molecules and Crystals Vol. 2* (Orlando: Academic Press, 1987) [Translated into Russian (Moscow: Mir, 1989)]