

УТВЕРЖДАЮ
проректор по научной работе
Университета ИТМО
В.О. Никифоров



" " _____ 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

**Залыгина Антона Владленовича на тему: «СИСТЕМА ЗОНДОВО-ОПТИЧЕСКОЙ 3D КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.04.01
«Приборы и методы экспериментальной физики»**

Диссертационная работа А.В. Залыгина посвящена изучению новых материалов на основе жидких кристаллов со свойствами, управляемыми оптическим излучением, для чего была разработана уникальная экспериментальная процедура структурной характеристики и научная установка, позволяющая данную процедуру реализовать. Актуальность и практическая значимость работы определяется необходимостью исследования наноматериалов, важными факторами чего являются доступность необходимого для исследований оборудования и его многофункциональность. Одними из приоритетных направлений исследований являются исследования новых материалов на основе жидких кристаллов со свойствами, управляемыми оптическим (лазерным) излучением. Данные материалы представляются чрезвычайно важными в создании новых устройств для фотоники и медицины. Процессы, происходящие в подобных материалах, существенно отличаются в разных точках исследуемого образца. Это обуславливает необходимость развития новых инструментальных методов, позволяющих получать информацию о пространственном распределении физико-химических параметров исследуемого материала с пространственным разрешением на уровне нанометрового диапазона. Именно на решение данных задач направлена работа А.В. Залыгина.

Диссертация А.В. Залыгина построена по классической схеме. Она состоит из введения, обзора литературы, материалов и методов, экспериментальной части, включающая результаты работы и их обсуждения, заключения и списка

литературы. Во введении сформулированы цели и задачи работы, обоснована её актуальность, научная новизна и практическая значимость.

Литературный обзор посвящен описанию методов сканирующей зондовой микроскопии, оптической микроскопии и ультрамикротомии, современных подходов корреляционной микроскопии. Подробно описаны входящие в состав изучаемых в работе наноматериалов жидкие кристаллы и квантовые точки, а также оптически кодированные микросферы.

Во второй главе описаны методики создания исследованных наноматериалов: плёнок различной толщины азобензолсодержащего нематического полиакрилата PAzo4M и его холестерической смеси с хиральной фотохромной легирующей добавкой Sorb, а также гибридного материала, состоящего из SilBlue (96.3 % по массе), Sorb (3.2 % по массе) и двух типов КТ (одни с $\lambda_{ФЛ}=530$ нм (0.05 % по массе); другие с $\lambda_{ФЛ}=604$ нм (0.5 % по массе)), представляющего из себя холестерические ЖК с инкорпорированными в них КТ. Подробно описаны созданные специально для исследования данных материалов инструменты и методики, совмещающие в себе атомно-силовую микроскопию, поляризационную оптическую микроскопию, сканирующую зондовую нанотомографию и флуоресцентную спектроскопию.

Отдельно в третью главу вынесено описание системы зондово-оптической 3D корреляционной микроскопии, объединяющей в одном приборе конфокальную микроспектроскопию с 3D сканирующей зондовой нанотомографией, разработка методики исследования материалов с её помощью и исследование флуоресцентных магнитных микрометровых микросфер, используемых в иммунодиагностике.

Основные научные результаты, полученные автором, приведены в заключении:

1. В ходе данной работы была создана экспериментальная установка, представляющая собой комбинацию СЗМ и ПОМ, а также методика, позволяющая оценивать влияние сфокусированного лазерного пучка на тонкие плёнки жидких кристаллов. Посредством данной методики было установлено, что сфокусированное облучение лазером приводит к образованию кратеров только в плёнках толщиной 5-10 мкм, в тонких плёнках (100-200 нм) кратеры не образуются. Хиральная структура плёнки не оказывает никакого воздействия на кинетику образования кратеров и их глубину.

3. Была разработана уникальная трёхэтапная экспериментальная процедура структурной характеристики, позволяющей на одном и том же участке образца проводить измерения методами АСМ, ПОМ и флуоресцентной

микроспектроскопии, а также восстанавливать 3D-структуру образца посредством СЗНТ. Был разработан метод оценки гомогенной растворимости единичных КТ в холестерической ЖК-матрице, основанный на анализе их 3D распределения и вычислении объемного процента единичных КТ в анализируемом объеме.

4. Было посчитано, что максимальная массовая доля однородно растворённых CdSe/ZnS КТ в гибридной матрице холестерических ЖК составляет $5 \cdot 10^{-4}$ – $7,5 \cdot 10^{-4}$ %, среднее расстояние между отдельными КТ составляет около 150 нм, и они не оказывают особого влияния на структуру матрицы. Только одна из 40 инкорпорированных в матрицу КТ действительно была в ней однородно растворена, а более 97% КТ агрегировали в кластеры со средним диаметром около 1,5 мкм, расположенные только в дефектных областях гибридной ЖК-матрицы и занимающие меньшую часть общей поверхности образца. Это объясняется низкой аффинностью поверхности КТ к поверхности ЖК-матрицы. Отдельные КТ особого влияния на матрицу не оказывают, что позволяет увеличить объёмную концентрацию КТ как минимум на порядок.

5. Был разработан и протестирован аппарат для проведения исследований методом СЗНТ-ОМ, объединенный единый комплекс. Также была разработана общая методика исследования таким аппаратом флуоресцентных магнитных композитных микросфер, сочетающая в себе технологии СЗМ, ОМ и УМ. Данные были объединены в единый массив, позволяющий получать 3D-характеристику морфологии, химического состава, межкомпонентного взаимодействия, механических, электрических, магнитных, а также других свойств объёмных композитных материалов. Проведённые в данном исследовании испытания продемонстрировали, что при комбинации методов СЗМ, ОМ и УМ в едином аппаратном комплексе не возникает каких бы то ни было компромиссных ситуаций, ограничивающих работоспособность техники.

Новизна полученных результатов и их практическая значимость не вызывает сомнения. Библиографический список включает 116 ссылок. Работа изложена на 101 странице, содержит 41 рисунок. По результатам работы были опубликованы 13 статей в ведущих международных (индексируемых в Web of Science) и 2 в российских (1 из них рекомендован ВАК) журналах, а также были представлены в виде постеров и устных докладов на 11 международных и всероссийских конференциях. Уникальность созданной в ходе работы установки подтверждается полученным патентом на изобретение.

Работа выполнена на высоком научном уровне. Диссертация написана хорошим языком и практически не содержит опечаток, рисунки хорошо иллюстрируют текст. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Несмотря на отмеченные выше достоинства, стоит выделить и несколько недочётов:

1. На части рисунков используются обозначения и единицы измерения на английском языке.

2. Вызывает немалый интерес процесс восстановления 3D структуры образцов и решения вопросов, связанных со смещением и деформацией образца в ходе секционирования, однако в работе этим вопросам уделено недостаточное количество внимания.

3. Во второй главе вычисляются значения объемной концентрации и массовая доля однородно растворённых КТ в матрице холестерических ЖК, и приводятся результаты, составляющие $(6,28 \pm 1,33) \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и $(6,25 \pm 1,32) \cdot 10^{-4} \%$ соответственно (стр. 77 диссертации). Учитывая размер погрешности этих данных, двух значащих цифр в приводимых результатах было бы достаточно.

4. В работе присутствуют опечатки, например, «*позволяет исследовать образцы, характеризующиеся короткоживущими фотоциклами*» (стр. 7) и пунктуационные ошибки: «*для изготовления срезов твёрдых материалов, например срезов меди, алюминия, стали, керамики*».


Однако, перечисленные недостатки не снижают общей высокой оценки работы.

Работа отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор А.В. Залыгин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики».

Отзыв заслушан и одобрен на семинаре Центра «Информационные и оптические технологии, ЦИОТ» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики», 27 сентября 2019 г.

Директор ЦИОТ

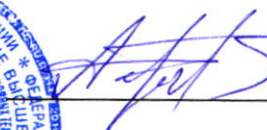
Д.ф.-м.н., профессор



Федоров А.В.

Главный научный сотрудник ЦИОТ

Д.ф.-м.н., профессор



Баранов А.В.

Федорова А.В., Баранов А.В.
Сергеев С.А.