

**МУЗЫЧЕНКО ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**ЛОКАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ И  
ПОЛЯРИМЕТРИЯ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСТРУКТУР**

**Специальность**

**01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Москва — 2008**

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники Физического факультета Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Панов Владимир Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Яминский Игорь Владимирович

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Бахтизин Рауф Загидович

Ведущая организация: Физический Институт имени П.Н. Лебедева  
(г. Москва)

Защита состоится “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2008г. в \_16\_ ч. \_00\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 501.001.66 в Московском Государственном Университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, Физический факультет, аудитория 5-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” СЕНТЯБРЯ 2008г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 501.001.66  
Доктор физико-математических наук

Ершов А.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Успехи современной микро/наноэлектроники и нанофотоники базируются на фундаментальных исследованиях в области физики поверхности твердого тела. Прежде всего огромные успехи в этой области связаны с бурным развитием методов исследования поверхности (вплоть до атомных масштабов), которые позволяют обнаруживать новые эффекты, детально изучать и в дальнейшем использовать их в прикладных целях. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) [1, 2, 3] за последние 20 лет, стала одним из наиболее широко используемых современных методов исследования морфологии и локальных физических свойств поверхности твердого тела. Ее исключительной особенностью стала неразрушающая природа измерений и сверхвысокое пространственное разрешение. Изобретение в 1982 г. первого туннельного микроскопа [1] и последующая наглядная демонстрация возможности оперировать отдельными атомами [4] и молекулами [5] дали сильный толчок развитию целого направления в физике, получившему в последствии название физика наносистем (ФН).

ФН и физика поверхностных явлений в настоящее время являются одними из наиболее интенсивно развивающимися разделами науки. Именно на фундаментальных исследованиях в области физики поверхности твердого тела основаны успехи современных микро- и наноэлектроники, спинтроники, нанофотоники, наноприборостроения, методов обработки и получения наноматериалов и т.д. В силу этого исследование разнообразных электронных, атомных и молекулярных процессов, происходящих на поверхности твердых тел, является актуальной задачей.

Немаловажное значение сегодня отводится и изучению взаимодействия нанообъектов с электромагнитным излучением оптического диапазона. В последние годы появились устройства, принцип работы которых основан на взаимодействии электромагнитного излучения с объектами, сравнимыми или даже меньшими чем длина волны этого излучения. Понимание и визуализация процессов, происходящих при взаимодействии световой волны с объектами, размеры которых значительно меньше чем длина волны света, очень важно как с фундаментальной точки зрения, так и с прикладной. Перечень задач, связанных с изучением взаимодействия излучения оптического диапазона с наноструктурами, весьма широк и включает в себя такие задачи как: создание оптических накопителей информации со сверхвысокой плотностью записи информации (вплоть до  $10^{12}$  бит/см<sup>2</sup>), управление молекулярными машинами с помощью оптического излучения, создание оптических компьютеров, фотонных кристаллов и различных фотонных устройств в наноэлектронике. Все эти задачи требуют детального понимания процессов, происходящих при взаимодействии света с наноструктурами. Однако традиционная оптическая микроскопия, основанная на использовании линз, имеет существенное ограничение на разрешающую способность, ограниченную дифракционным пределом  $D \geq 1.22 \cdot \lambda/2n$ , где  $\lambda$  – длина волны света,  $n$  – показатель преломления среды. Для длин

волн оптического диапазона предельное разрешение составляет порядка  $300 \div 500$  нм. Идея преодоления дифракционного предела была предложена Сингхом (E.H. Synge) еще в 1928 году [6], однако реализация этой идеи стала возможна лишь спустя многие десятилетия. В 1972 году в экспериментах с электромагнитным излучением микроволнового диапазона [7] была зафиксирована разрешающая способность  $\lambda/60$ . А в середине 80-х годов было продемонстрировано сверхразрешение и в оптическом диапазоне частот. Достигнутая разрешающая способность составила  $\lambda/20$ , и это направление исследований получило название - сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (СОМБП) [3, 8, 9]. На сегодняшний день микроскопия ближнего оптического поля является одним из наиболее перспективных направлений исследования локальных оптических свойств поверхности, возникший в результате развития сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии (СТМ, АСМ) [1, 2].

СОМБП позволяет получать информацию о различных (в том числе спектральных и поляризационных) оптических свойствах нанообъектов с разрешением, значительно превышающим дифракционный предел. Возможность улучшения на порядок и более локальности оптических методов исследования поверхности весьма существенна при решении широкого круга фундаментальных и прикладных задач. Анализируя взаимодействие света с неоднородной поверхностью методами классической оптики, приходится усреднять влияние многих факторов (дефектов, примесей и т.д.), находящихся в пределах облучаемого участка. Применение СОМБП позволяет преодолеть это ограничение и исследовать оптические свойства отдельных объектов нанометрового размера. Кроме этого, СОМБП предоставляет уникальные возможности по изучению локальной структуры электромагнитного поля (ЭМП), включая его пространственную структуру, поляризационные и спектральные свойства в окрестностях наноструктур с разрешением, более чем на порядок превышающим дифракционный предел.

Несмотря на то, что в последнее десятилетие метод интенсивно развивается, многие возможности остаются до сих пор не раскрытыми и требуют более детального изучения. Так, прежде всего, требуют понимания фундаментальные основы процессов формирования СОМБП изображения и выявления взаимосвязи структуры поверхности с ее локальными оптическими свойствами. Для фундаментального понимания и корректной интерпретаций получаемых результатов необходимо также учитывать насколько само зондирующее острие влияет на распределение ЭМП вблизи исследуемых объектов. В настоящее время в мире широко изучаются возможности СОМБП в области сверхплотной записи информации, в том числе с использованием фотохромных люминофоров и магнитных пленок в качестве носителей. В связи с вышеизложенным работы, направленные на углубление понимания фундаментальных процессов, лежащих в основе СОМБП, и работы, направленные на создание новых экспериментальных установок для комплексного исследования оптических свойств поверхностных наноструктур методом СОМБП, являются весьма актуальными.

## Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является: разработка и создание диагностической аппаратуры СОМБП с субдлинноволновым оптическим пространственным разрешением для комплексного исследования оптических (включая спектральные и поляризационные) свойств субмикро и наноструктур в различных режимах работы СОМБП; разработка методики изучения локальной трехмерной пространственной структуры ЭМП в окрестностях наноструктур с помощью СОМБП; разработка методов изучения локальных поляризационных и люминесцентных свойств микро- и нанообъектов с помощью ближнепольной сканирующей микроскопии; развитие методов анализа люминесцентных, нелинейно-оптических и магнитооптических параметров элементов оптической обработки информации с разрешением, много меньшим оптической длины волны (разрешение вплоть до 30 нм при длине волны  $\sim 530$  нм).

В соответствии с целями исследования были поставлены следующие основные задачи.

1. Разработка и создание диагностической аппаратуры СОМБП модульной конструкции для исследования спектральных, люминесцентных и поляризационных оптических свойств наноструктур, позволяющей проводить комплексное исследование оптических свойств объектов с характерными размерами много меньшими длины световой волны. Важным свойством диагностического комплекса СОМБП должна была стать возможность реализации в одном приборе 11-ти различных по своим физическим принципам режимов работы СОМБП, включая апертурный и безапертурный вариант СОМБП;
2. Разработка и создание датчика контроля силы взаимодействия зондирующего острия с поверхностью, обеспечивающего в режиме сканирования разрешающую способность по высоте не хуже 0.3 нм с силой взаимодействия зондирующего острия с образцом не более 0.5 нН, что позволяет исследовать биологические объекты без их разрушения;
3. Разработка методики изучения локальной трехмерной пространственной структуры ЭМП в непосредственной близости от исследуемых объектов (на расстояниях  $z \ll \lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения) с помощью СОМБП, выявление особенностей этих распределений ЭМП и учет особенностей формирования трехмерных оптических СОМБП изображений;
4. Исследование методом СОМБП кластеризации люминесцентного красителя в полимерной пленке с оптическим разрешением, много меньшим длины волны излучения накачки и длины волны излучения люминесценции, а также изучение люминесцентных свойств сферических стеклянных наночастиц (размером 20-100 нм), окрашенных люминесцентным красителем;

5. Изучение трехмерного распределения ЭМП вблизи искусственно созданных субмикронных диэлектрических и металлических структур, представляющих собой периодически расположенные полимерные и металлизированные наноцилиндры, для выявления физических механизмов взаимодействия оптического излучения с микро- и наноструктурами;
6. Разработка методики получения с помощью СОМБП информации о локальном распределении магнитного кругового двойного лучепреломления в эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов как в статическом режиме, так и в динамическом режиме с модуляцией плоскости поляризации зондирующего луча;
7. Исследование поведения ортогонально поляризованных компонент ЭМП вблизи субмикронных ( $d \simeq 50 \div 150$  нм) отверстий, сформированных в металлической пленке алюминия.

### Научная новизна

- Впервые создан комплекс диагностического оборудования модульной конструкции (разделенный по принципу сканирования) для комплексного исследования абсорбционных, спектральных, люминесцентных и поляризационных оптических свойств систем пониженной размерности с оптическим разрешением  $\sim 30$  нм, реализующий все известные режимы работы СОМБП.
- Впервые с использованием поляризационного СОМБП проведено изучение пространственного распределения ортогонально поляризованных компонент электромагнитного поля вблизи одиночной апертуры диаметром  $d = 100$  нм (сформированной в пленке  $Al$  толщиной 75 нм) и показано качественное различие в локализации ближнепольных составляющих этих компонент.
- Методом СОМБП проведено экспериментальное исследование люминесцентного красителя в полимерной пленке с оптическим разрешением  $D \sim 30$  нм. Впервые показано, что краситель располагается в пленке-носителе не равномерно, а обладает свойством кластеризации с характерным масштабом 150 нм.
- Предложена методика изучения трехмерного распределения электромагнитного поля вблизи объектов нанометровых размеров. Для демонстрации больших потенциальных возможностей предложенного метода исследования проведено изучение трехмерного распределения ЭМП вблизи одиночных наноструктур, представлявших собой периодически расположенные наноцилиндры с коническим основанием.
- Впервые методом СОМБП обнаружен эффект формирования ЭМП со спиральной структурой, возникающих при прохождении через полимерные наноцилиндры, покрытые тонкой металлической пленкой.

- Рассмотрена теоретическая модель, описывающая возникновение вихревых оптических структур, причиной которых является возбуждение циркулярных поверхностных плазмонов.

### **Научная и практическая ценность**

В настоящей работе разработан и создан диагностический комплекс СОМБП, который послужил прототипом для создания коммерческого прибора для исследования оптических свойств поверхности и поверхностных наноструктур методом СОМБП. Коммерческий вариант прибора поставлен по межгосударственному соглашению в Международный Лазерный Центр (МЛЦ) г. Братиславы, Словацкая Республика (Контракт №1/99-В от 18.06.1999 между МЛЦ МГУ и МЛЦ г. Братиславы).

Разработанная методика изучения трехмерного распределения ЭМП может использоваться для исследования как фундаментальных процессов взаимодействия оптического излучения с наноструктурами, так и для контроля и анализа оптических свойств элементов наноэлектроники таких как лазерные диоды, элементы оптической памяти, фотонные кристаллы и др.

Обнаруженный эффект формирования оптических вихревых распределений ЭМП вблизи металлизированных объектов субмикронного масштаба и разработанная теоретическая модель дают новые фундаментальные знания об особенностях взаимодействия оптического излучения с объектами, масштабы которых сравнимы или меньше длины волны оптического излучения.

Впервые показана возможность анализа поляризации оптического излучения, провзаимодействовавшего с исследуемым объектом в режиме собирающего СОМБП на примере визуализации магнитной доменной структуры в пленках ферритов-гранатов, что позволяет применять эту методику для исследования магнитооптических эффектов в тонких пленках.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Создание комплекса диагностического оборудования СОМБП для исследования абсорбционных, спектральных, люминесцентных и поляризационных оптических свойств наноструктур с пространственным оптическим разрешением  $D \leq 30$  нм, значительно превышающим дифракционный предел, и возможность реализации всех известных на сегодняшний день режимов работы СОМБП (11 режимов работы, включая апертурные и безапертурные режимы СОМБП).
2. Развитие метода поляризационного СОМБП и изучение пространственного распределения ортогонально поляризованных компонент электромагнитного поля вблизи апертур субдлинноволнового размера ( $d = 100$  нм), сформированных в металлической пленке.
3. Разработка методики трехмерного картирования ЭМП вблизи одиночных или упорядоченных субмикро и наноструктур. Изучение трехмерного распределения ЭМП вблизи одиночных наноструктур, представлявших собой периодически расположенные полимерные и металлизированные нанопилы.

4. Обнаружение методом СОМБП эффекта оптического вихря вблизи металлизированных объектов субмикронного масштаба.
5. Изучение методом СОМБП магнитного кругового двулучепреломления (эффекта Фарадея) в тонких пленках Vi-содержащих ферритов-гранатов с помощью анализа поляризации, прошедшего через образец излучения и локально собранного апертурным зондом.

### Обоснованность и достоверность результатов

Результаты, представленные в диссертации, получены на основе многократно повторенных экспериментов, проведенных на современном научном оборудовании с использованием современных методов обработки экспериментальных данных. Экспериментальные данные сравнивались с теоретическими расчетами, основанными на адекватно выбранных физических моделях анализируемых процессов, а так же с результатами других групп исследователей. Результаты этих экспериментов неоднократно обсуждались на семинарах и докладывались на специализированных конференциях по проблемам, связанных с тематикой диссертационной работы. Большая часть результатов опубликована в международных и российских научных журналах. Это позволяет считать все полученные результаты обоснованными и достоверными, а так же полностью отвечающими современному мировому уровню исследований. Большинство представленных результатов являются новыми и получены впервые.

### Апробация работы

Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на Российских и международных конференциях, основные из которых: всероссийское совещание "Зондовая микроскопия - 1999, 2000, 2001", Нижний Новгород, Россия, 1999, 2000, 2001; 8-й, 11-й, 13-й и 14-й международные симпозиумы "Nanostructures: Physics and Technology", Санкт-Петербург, Россия, 2000, 2003, 2005, 2006; российско-французский семинар "Les Directions Modernes en physique laser: spectroscopie, les effets quantiques et l'optique atomique, les representations optiques et l'information", Владимир-Суздаль, Россия, 2001; 11-й международный семинар "Laser Physics Workshop (LPHYS'02)", Братислава, Словакия, 2002; 1-й международный научный семинар "Optical Micro- and Nanotechnologies"(OMaN-1), Санкт-Петербург, Россия, 2002; международный симпозиум "Intensive Laser Action and Technological Applications"(ILATA-III) / "X Int. Conf. Laser-assisted Micro- and Nanotechnologies"(LAM-X), Санкт-Петербург, Россия, 2003; международная конференция "Micro- and Nanoelectronics"(ICMNE-2003, ICMNE-2005), Звенигород, Россия, 2003, 2005.

### Публикации

По теме диссертации опубликовано **33** научные работы из которых **18** - тезисы докладов на конференциях и **15** - статей в ведущих российских и зарубежных реферируемых журналах: "Письма в ЖЭТФ"; "Наукоемкие технологии"; "International Journal of Nanoscience"; "Applied Physics B";



"Physics of Low-Dimensional Structures"; и др. (список основных публикаций приведен в конце автореферата).

### Личный вклад автора

Определение цели работы и выбор методов исследования осуществлены автором совместно с д.ф.-м.н. профессором В.И. Пановым.

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

### Структура и объем диссертационной работы

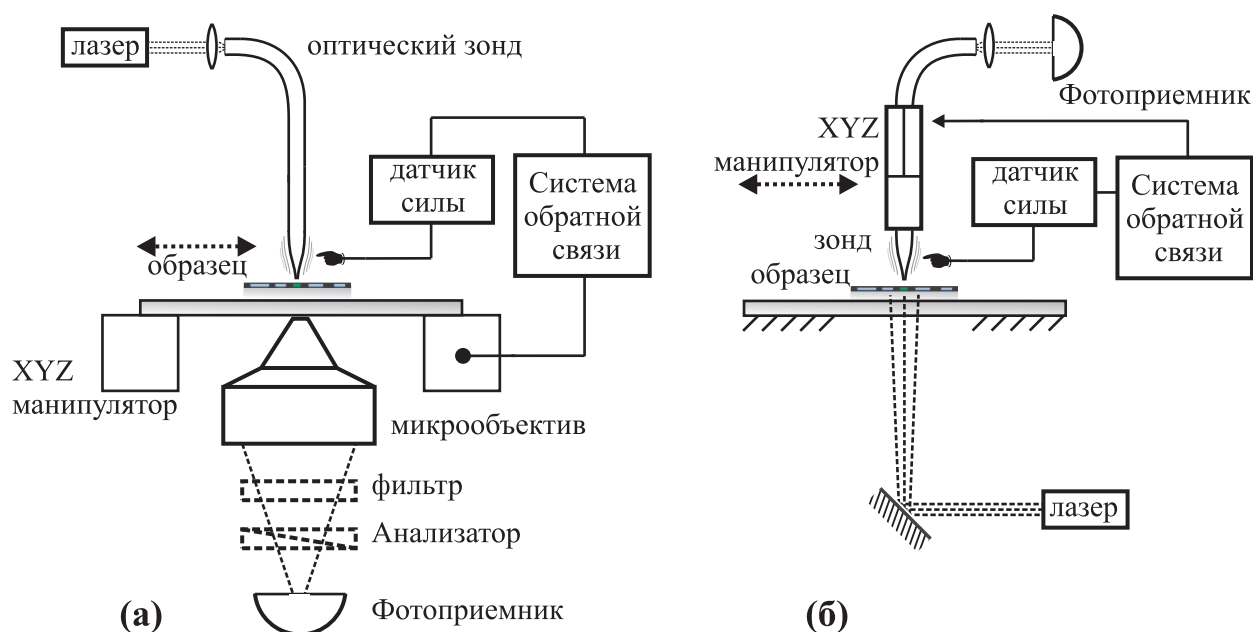
Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет **169** страниц, включая **71** рисунок. Список литературы содержит **124** наименований.

**Во введении** дается общая характеристика диссертации: обоснована актуальность темы; сформулированы цели работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов; перечислены основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации результатов, основных публикациях, объеме и структуре работы.

**В главе 1** рассмотрены основные физические принципы, положенные в основу метода СОМБП, показано преимущество методов построения оптического изображения объектов, использующих ближнее оптическое поле по сравнению с классическими методами. В параграфе 1.1 рассматриваются особенности построения дальнепольных и ближнепольных оптических изображений с точки зрения фурье-оптики. Отмечено, что с помощью оптической микроскопии ближнего поля становится возможным преодолеть дифракционный предел, лимитирующий разрешающую способность классических оптических приборов. Показано, что на сегодняшний день максимальное оптическое пространственное разрешение, достигнутое с помощью СОМБП, составляет 1 нм [10] при длине волны используемого излучения 633 нм.

Структура электромагнитного поля субдлинноволновой апертуры, как ключевого элемента СОМБП, рассмотрена в параграфе 1.2. На основании решения электродинамической задачи Бете [11] показано, что зависимость интенсивности оптического излучения, прошедшего через апертуру (диаметром  $d \ll \lambda$ ) в металлическом экране, экспоненциально зависит от расстояния до экрана, приведены теоретические и экспериментальные подтверждения данного факта. В параграфах 1.3, 1.4 рассмотрены вопросы, касающиеся пространственной разрешающей способности оптической микроскопии ближнего поля, и показано, что сверхразрешение не вступает в противоречие с принципом неопределенности Гейзенберга.

Далее, в параграфе 1.5 рассмотрены все известные на сегодняшний день механизмы формирования СОМБП изображений, в частности рассмотрены различные схемы работы СОМБП как в апертурных, так и в безапертурных режимах работы. Отмечены физические задачи, которые могут быть решены с помощью одного из рассмотренных режимов работы



*Рис. 1. Схематическое изображение устройства СОМБП модульной конструкции, функционально разделенного по принципу сканирования: (а)-схема функционирования СОМБП со сканированием образцом; (б)-схема функционирования СОМБП со сканированием зондом.*

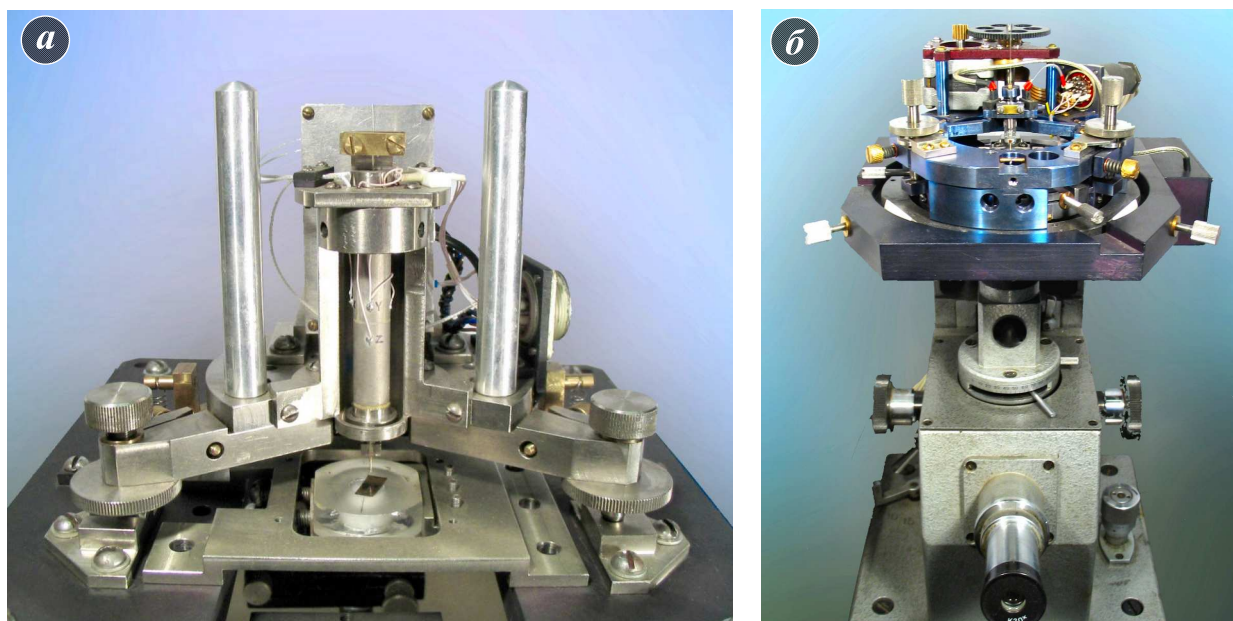
СОМБП, а так же отмечены основные преимущества и недостатки каждой схемы работы СОМБП.

Большое внимание в данной главе уделено возможностям СОМБП при исследовании оптических свойств наноструктур с разрешением значительно превышающим дифракционный предел, в том числе методом локальной оптической поляриметрии сверхвысокого пространственного разрешения. Обоснована необходимость использования комплексного подхода к исследованию оптических свойств наноструктур для взаимного дополнения информации о таких свойствах.

В заключении данной главы рассмотрены виды взаимодействия зондирующего острия с поверхностью и рассмотрены наиболее важные особенности построения датчиков квазитрения, основанных на силах поверхностного трения для использования таких датчиков в качестве измерителя силы взаимодействия зонда с поверхностью в СОМБП.

**Глава 2** посвящена описанию разработанного и созданного диагностического комплекса СОМБП модульной конструкции для исследования абсорбционных, люминесцентных и поляризационных оптических свойств систем пониженной размерности с оптическим разрешением  $\sim 30$  нм.

Опыт экспериментальной работы в области СЗМ показывает, что широта задач, стоящих перед сканирующей оптической микроскопией ближнего поля требует использования различных оптических конфигураций, изменение которых должно осуществляться, по возможности, достаточно просто и быстро. Обеспечение возможности введения в оптическую схему дополнительных элементов, таких как модуляторы, поляризаторы, компенсаторы и т.д., а также требования к простоте замены источников и де-



*Рис. 2. Общий вид диагностического комплекса СОМБП. (а)-оптико-механический модуль со сканированием зондом; (б)-оптико-механический модуль со сканирования образцом в составе металлографического инвертированного оптического микроскопа МИМ-7.*

текторов излучения приводят к необходимости использования модульного принципа при конструировании установок для СОМБП.

Применение в ряде оптических схем СОМБП стандартных оптических устройств, а также образцов больших размеров делает крайне желательным использование схемы со сканированием, осуществляемым путем перемещения зонда. Кроме того, такая схема представляется оптимальной при реализации режима фотонной сканирующей туннельной микроскопии (ФСТМ). С другой стороны, в случае применения высокоапертурной собирающей оптики (например, при регистрации слабых сигналов люминесценции) и, особенно, при использовании пространственной фильтрации (для увеличения отношения сигнал/шум), более оправданным является применение схемы, в которой все оптические элементы неподвижны. В этом случае сканирование должно осуществляться путем перемещения образца. Таким образом, целесообразным является создание СОМБП с модульным принципом построения, в котором имеются возможности осуществлять сканирование как зондом, так и образцом. Кроме того, модульность конструкции СОМБП позволяет реализовать практически все известные режимы работы в проходящем/отраженном свете и в комбинированном режиме, при котором апертурный зонд используется как источник и коллектор излучения одновременно. Общие принципы, положенные в основу разработанного модульного СОМБП, показаны на рис. 1. Такое разделение существенно расширяет область применения созданного комплекса СОМБП, при этом конструкция модулей остается простой, эффективной и надежной.

Общий вид оптико-механического модуля СОМБП со сканированием зондом показан на рис. 2(а). Процесс сканирования осуществляется зондом с помощью трубчатого пьезоманипулятора точных перемещений, при этом

образец остается неподвижным и характер взаимодействия образца с оптическим излучением остается неизменным на протяжении всего эксперимента, что весьма удобно для реализации режимов работы, когда в процессе физического эксперимента ключевым условием является необходимость сохранения неизменным взаимного положения волнового фронта оптической накачки и исследуемой поверхности. Одной из таких задач является задача изучения трехмерного распределения ЭМП вблизи поверхности при взаимодействии оптического излучения с поверхностными наноструктурами и, в частности, при работе в режиме ФСТМ.

Основные характеристики и возможные режимы работы созданного ближнепольно-оптического микроскопа со сканированием зондом:

- максимальная область сканирования:  $30 \times 30 \times 3$  мкм<sup>3</sup>;
- контроль расстояния зонд-образец: **пьезоэлектрический датчик квазитрения**;
- разрешающая способность по нормали к поверхности: **0.3 нм**;
- средняя сила взаимодействия зонда с поверхностью: **0.4 нН**;
- типы оптических зондов: **апертурные** и **безапертурные** оптоволоконные зонды.
- **Основные оптические конфигурации:**
  - работа в режиме сканирующего фотонного туннельного микроскопа;
  - работа на просвет (накачка с помощью классической оптики и сбор излучения нанометровым коллектором, и наоборот);
  - работа на отражении (накачка с помощью классической оптики и сбор излучения нанометровым коллектором, и наоборот);
  - комбинированный режим работы (накачка и сбор осуществляется одним и тем же зондирующим острием с последующим выделением информационного сигнала).

Общий вид СОМБП со сканированием образцом в составе инвертированного металлографического микроскопа МИМ-7 представлен на рис. 2(б). В нем сканирование осуществляется только образцом, при этом зонд остается неподвижным. Условие неподвижности зондирующего острия в процессе сканирования позволяет реализовывать режимы работы СОМБП с высокоэффективным сбором оптического излучения с помощью микрообъектива, а также позволяет осуществлять пространственную фильтрацию собранного излучения для повышения соотношения сигнал/шум. Эта схема дает определенные преимущества для решения физических задач, где интенсивности излучения сравнительно малы (люминесценция единичных молекул, поляризационный анализ), и эффективность сбора полезного излучения играет ключевую роль. Кроме того интеграция СОМБП и классической микроскопии позволила осуществлять выбор (в пределах  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup>) исследуемого методом СОМБП участка поверхности и применять все методики классической оптической микроскопии в сочетании со сверхразрешающей СОМБП.

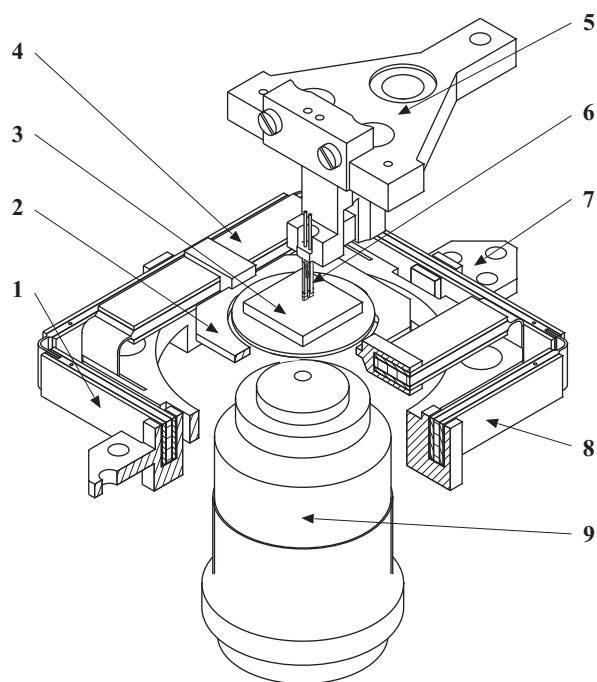
Отличительной особенностью разработанного СОМБП со

сканированием зондом является манипулятор точных перемещений, который представляет собой коробчатый биморфный пьезоманипулятор (рис. 3). В манипуляторе использованы биморфные пьезоэлементы, состоящие из пар тонких (0.3 мм) пьезокерамических пластин с сонаправленной поляризацией, приклеенных к общему центральному электроду, представляющему собой титановую пружину специальной формы. В отличие от манипуляторов на основе пьезокерамической трубки или триподного манипулятора, коробчатый биморфный манипулятор имеет более удобную конструкцию. Он практически плоский, высотой порядка 10 мм, с возможностью подвода короткофокусных объективов и возможностью доступа к поверхности образца под большими углами.

Основные характеристики и возможные режимы работы созданного ближнепольно-оптического микроскопа со сканированием образцом:

- максимальная область сканирования:  $50 \times 50 \times 6$  мкм<sup>3</sup>;
- контроль расстояния зонд-образец: **пьезоэлектрический датчик квазитрения**;
- разрешающая способность по нормали к поверхности: **1.0 нм**;
- средняя сила взаимодействия зонда с поверхностью: **0.4 нН**;
- типы оптических зондов: **апертурные** и **безапертурные** оптоволоконные зонды.
- **Основные оптические конфигурации:**
  - работа на просвет (накачка с помощью классической оптики и сбор излучения нанометровым коллектором, и наоборот);
  - работа на просвет (с высокоэффективным сбором излучения с помощью микрообъектива. Накачка ближним полем, сбор излучения апертурным зондом);
  - работа на отражении (накачка ближним полем, сбор излучения с помощью классической оптики, и наоборот);
  - комбинированный режим работы (накачка ближним полем, сбор излучения субдлинноволновым коллектором).

Заключительная часть главы посвящена разработке и созданию датчика контроля силы взаимодействия зондирующего острия с поверхностью (датчик сил квазитрения) для СОМБП.



*Рис. 3. Схематическое изображение сканирующего узла на основе биморфных пьезоэлементов. 1,8,4-пьезобиморфы для перемещения вдоль осей X,Y,Z соответственно; 2-держатель образца; 3-образец; 5-держатель зондирующего острия и камертона; 6-кварцевый резонатор камертонного типа; 7-крепление пьезоманипулятора; 9-микрообъектив.*

Датчик сил квазитрения является одним из важнейших элементов системы слежения за расстоянием зонд-поверхность, которой отводится ведущая роль в процессе формирования ближнепольного изображения, поскольку от точности позиционирования апертурного и безапертурного зондирующего острия зависит качество получаемого оптического изображения. Уменьшение силы взаимодействия зондирующего острия с поверхностью существенно расширяет возможности применения СОМБП особенно при исследовании биологических объектов.

Датчик силы квазитрения был разработан на основе кварцевого камертонного резонатора (ККР). ККР представляет собой кварцевый камертон общей длиной 4.5 мм, толщиной  $w = 0.3$  мм, длиной ветви камертона  $L = 3$  мм и шириной ветви камертона  $t = 0.4$  мм. Статический коэффициент жесткости одной ветви ККР составляет около  $k = 13.9 \cdot 10^3$  Н/м. ККР приклеивается к держателю, а зондирующее волокно приклеивается к одной из ветвей ККР параллельно последней. Детектирование пьезоэлектрического сигнала ККР осуществляется предварительным усилителем, выполненным по схеме дифференциального  $LC$ -резонансного преобразователя-усилителя заряда с внутренней добротностью  $Q_A = 200$ . Добротность  $Q_0$  свободного ККР составляет более 5000 при резонансной частоте  $f_0 = 32768$  Гц. В результате приклеивания к одной ветви ККР зондирующего острия наблюдается смещение резонансной частоты  $f_0$  в сторону низких частот, а также одновременное уменьшение добротности  $Q_0$ . Типичные значения резонансной частоты ККР с приклеенным оптическим волокном составляют  $f_p = 31.5 \div 32.5$  кГц. При этом добротность уменьшается для резонансного пика на частоте, близкой к  $f_0$  до величины  $Q_p = 300 \div 1500$ . Чувствительность ККР с резонансным преобразователем-усилителем, определенная путем независимого детектирования амплитуды резонансных колебаний ветви ККР с приклеенным зондирующим волокном с помощью оптической схемы, составила  $S_{lc} = 6$  В/нм для резонанса в районе  $f_0$ . Так например, при амплитуде колебания конца зондирующего острия  $x_0 = 5 \text{ \AA}$  соотношение сигнал/шум составляет  $S/N = U_0/U_n = 130$ . Для оценки минимальной силы квазитрения  $F_{SF}$ , при которой возможна устойчивая работа созданного датчика, использовался простой способ, предложенный в работе [12]. Оцененная по формуле  $F_{SF} = (1 - U_0/U)kx_0/Q_p\sqrt{3}$  минимально-возможная сила детектирования для созданного датчика составила 0.4 нН для соотношения стартовой и удерживаемой амплитудой колебаний зондирующего острия  $U_0/U = 95\%$ .

Представленные на рис. 4(б) результаты изучения топографии свежесколотой поверхности (0001) высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ) демонстрируют высокую разрешающую способность созданной системы. Результаты получены с использованием модуля со сканированием зондом (рис. 4), работавшего в режиме атомно-силового микроскопа. В качестве зондирующего острия использовалось заостренное оптическое волокно. Из рис. 4(б,в) видно, что чувствительность системы контроля расстояния между зондом и образцом лучше, чем 0.3 нм и



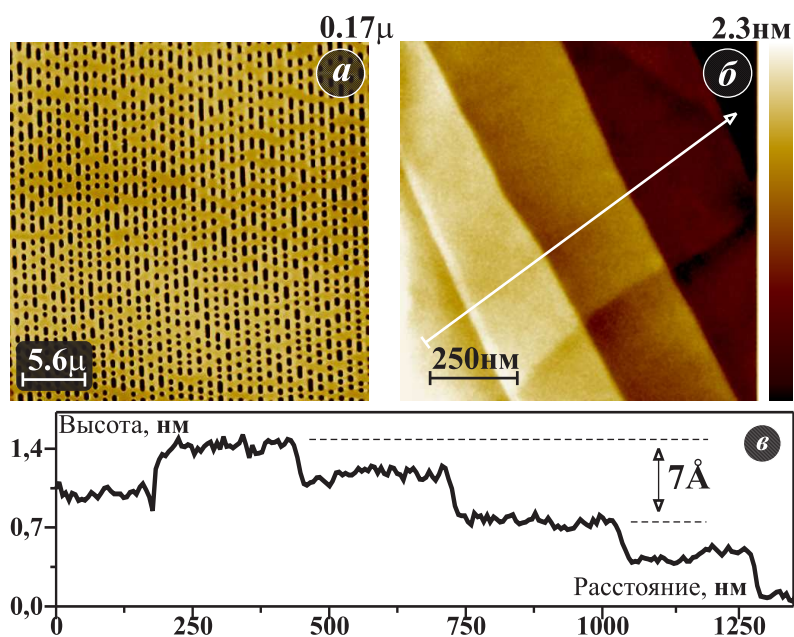
достаточна для разрешения моноатомных ступеней на поверхности ВОПГ. Это, в свою очередь, достаточно для реализации всех известных методик СОМБП, включая безапертурную СОМБП. В то же время сканирующая система наряду с высокой разрешающей способностью обладает большим динамическим диапазоном и способна реализовывать растры сканирования от сотен нанометров до 30 мкм (в случае СОМБП со сканированием зондом рис. 4(а)) и 50 мкм (в случае СОМБП со сканированием образцом), при этом сохраняя необходимое топографическое разрешение, что в свою очередь дает возможность одновременно сочетать в одном приборе преимущества методики СОМБП и атомно-силовой микроскопии.

В заключении главы приводится ряд оригинальных экспериментальных результатов, полученных с помощью созданного СОМБП, в которых продемонстрирована высокая разрешающая способность каждого из модулей СОМБП и продемонстрирован широкий спектр возможностей по использованию созданного диагностического комплекса СОМБП.

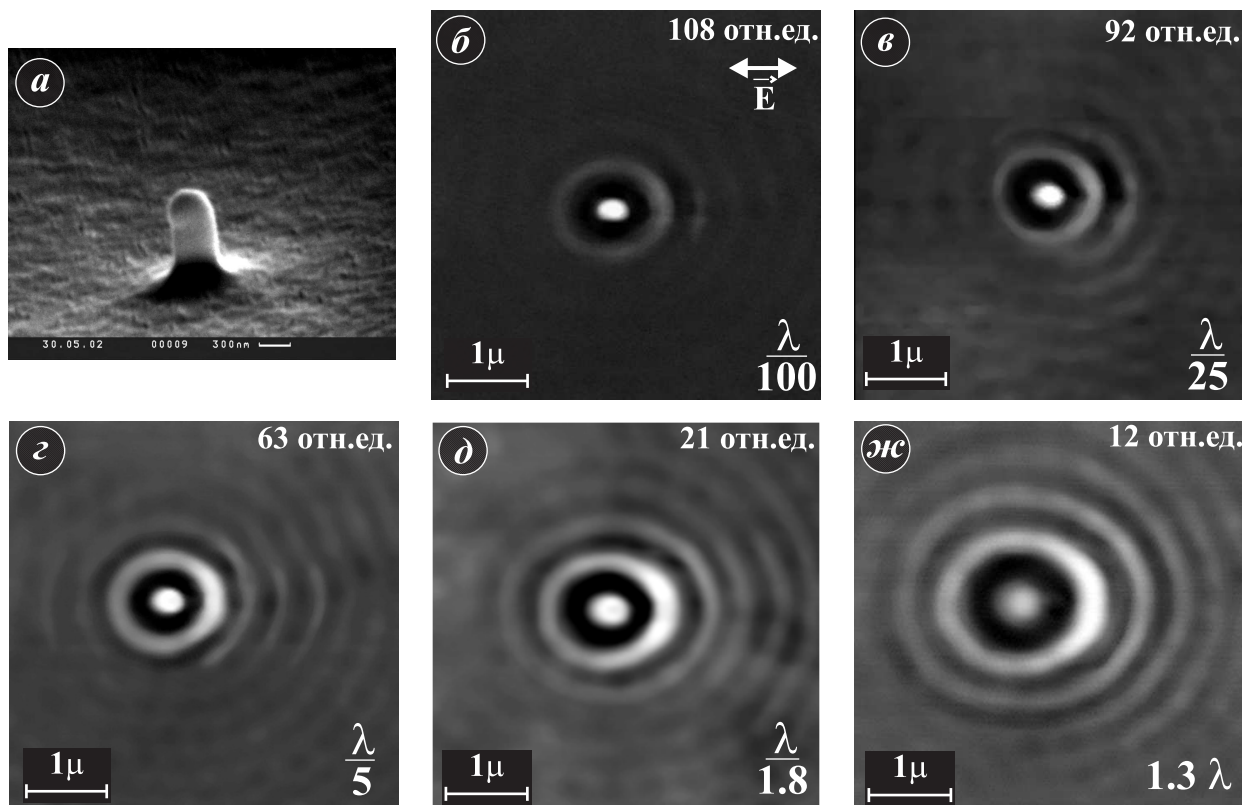
**Глава 3** посвящена исследованию трехмерного распределения ЭМП методом СОМБП вблизи наноструктур, а так же изучения локальных люминесцентных свойств тонких полимерных пленок с внедренным красителем.

В начале главы описывается разработанная и реализованная методика трехмерного картирования распределения интенсивности ЭМП над исследуемыми объектами. Описан ряд экспериментов по изучению локального трехмерного распределения ЭМП вблизи искусственно созданных периодических и неупорядоченных наноструктур, представляющих из себя полимерные и полимерно-металлизированные наноцилиндры (рис. 5(а)).

В первой серии экспериментов изучалось взаимодействие поляризованного оптического излучения с полимерными наноцилиндрами. Для этой цели использовался модуль СОМБП со сканированием зондом и плоско поляризованное лазерное излучение с длиной волны  $\lambda = 532$  нм и мощностью 10 мВт. В качестве субдлинноволнового коллектора оптического излу-



*Рис. 4. Топографические изображения поверхности заготовки стандартного DVD диска-(а) и поверхности (0001) ВОПГ-(б). Изображения получены с помощью датчика силы квазитрения в составе модуля со сканированием зондом. (в)-сечение вдоль направления, указанного стрелкой.*



*Рис. 5. Изображение полимерного наноцилиндра полученное на электронном растровом микроскопе-(а), и СОМБИ изображение трехмерного распределения интенсивности ЭМП вблизи полимерного наноцилиндра- (б-ж). СОМБИ изображение представляет собой набор двумерных распределений интенсивности на заданных расстояниях от вершины наноцилиндра: (б)-5 нм; (в)-20 нм; (z)-100 нм; (д)-300 нм; (ж)-700 нм. Длина волны накачки  $\lambda = 532$  нм. СОМБИ изображение получено в режиме сбора оптического излучения апертурным зондом.*

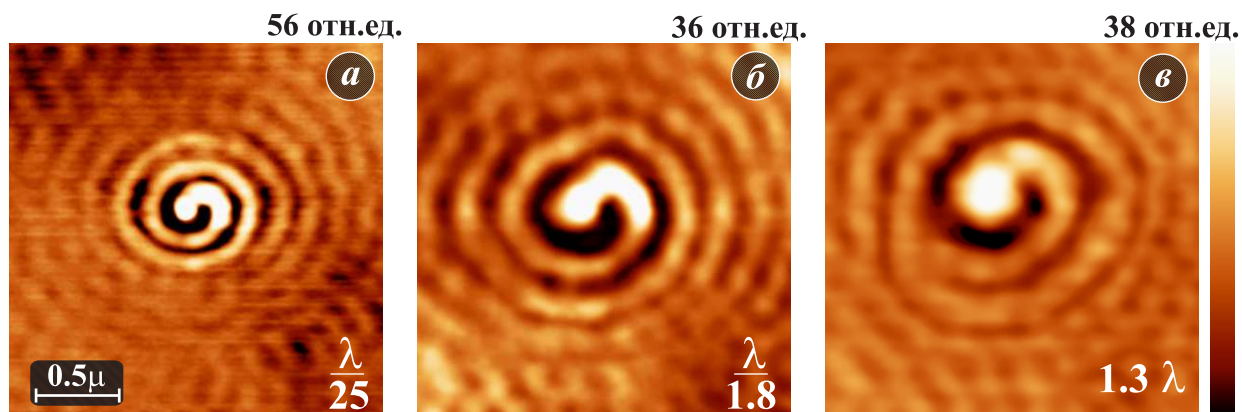
чения при изучении трехмерного распределения ЭМП использовался апертурный зонд на основе одномодового оптического волокна. Образцы были изготовлены методом двойной репликации с кремниевой матрицы, полученной с помощью электронно-лучевой литографии и представляли собой массивы полимерных наноцилиндров, расположенных друг от друга на расстоянии 10 мкм. Полимерные наноцилиндры высотой 980 нм и диаметром 300 нм были сформированы на гладкой полимерной подложке толщиной 0.6 мм. Возбуждающее слабо расходящееся излучение направлялось нормально к поверхности со стороны противоположной той, на которой располагались наноцилиндры, проходило через прозрачную подложку и, взаимодействуя с наноцилиндрами, формировало стационарную картину распределения ЭМП вблизи наноцилиндров. Результаты, полученные с помощью методики изучения трехмерного распределения ЭМП в заданном объеме над вершинами наноцилиндров представлены на рис. 5(б-ж). Изображения представляют собой плоские двумерные распределения интенсивности ЭМП, полученные в результате сечения по плоскости 3-х мерного распределения ЭМП на выбранных относительно вершины наноцилиндра высотах: 5 нм; 20 нм; 100 нм; 300 нм; 700 нм, рис. 5(б-ж) соответственно. Для полимерных наноцилиндров наблюдалось значительное усиление(до 10 раз от-



носителем интенсивности падавшего излучения) локального ЭМП вблизи вершины наноцилиндра, зависящее от высоты зондирующего острия над поверхностью наноцилиндра.

Полученные с помощью СОМБП экспериментальные результаты сравнивались с результатами расчетов распределения ЭМП, проведенных с помощью решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во времени (в иностранной литературе - Finite-Difference Time-Domain (FDTD) алгоритм) [13]. Метод расчета основан на прямом численном решении полной векторной системы уравнений Максвелла во времени и позволяет не только вычислить распределение светового поля, но и учесть влияние "возмущающего" действия оптического зонда микроскопа ближнего поля. В результате численных расчетов, выполненных на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, было подтверждено полученное экспериментальными методами десятикратное увеличение интенсивности ЭМП вблизи вершины наноцилиндра, связанное с дифракционной локализацией света внутри полимерного наноцилиндра, а также было установлено, что поле внутри наноцилиндра имеет интерференционную структуру, образующуюся в результате отражения от верхнего и нижнего края наноцилиндра. Поле вне наноцилиндра экспоненциально затухает во все стороны. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов, проведенное в диссертации, показало качественное и количественное совпадение полученных результатов, что наглядно доказало возможность использования разработанной методики как надежного инструмента для изучения трехмерного распределения электромагнитного поля вблизи наноструктур с оптическим разрешением вплоть до десятка нанометров.

Во второй серии экспериментов, проводилось исследование распределения электромагнитного поля (по такой же методике как в случае полимерного наноцилиндра) вблизи металлизированных наноцилиндров, покрытых пленкой из золота и палладия (Au-Pd) толщиной 25 нм (см. рис. 5(а)). Металлизация осуществлялась с помощью ионно-плазменного напыления, что обеспечивало однородность металлического покрытия (в частности - отсутствие эффекта отгнетения, характерного для термического напыления). В процессе изучения трехмерного распределения ЭМП с помощью СОМБП вблизи металлизированных наноцилиндров был впервые обнаружен эффект формирования оптического вихря, возникающего при прохождении поляризованного монохроматического света через подобные наноструктуры. Типичные результаты, полученные при изучении металлизированных наноцилиндров представлены на рис. 6. Изображения представляют собой двумерные распределения интенсивности ЭМП, взятые на выбранных относительно вершины наноцилиндра высотах: 20 нм; 300 нм; 700 нм, рис. 6(а-в) соответственно. Вихревые структуры ЭМП наблюдались над каждым металлизированным наноцилиндром и на любых высотах вплоть до 700 нм. Спиральная симметрия ЭМП оптической частоты такого типа вблизи наноструктур наблюдалась впервые. Поскольку дан-



**Рис. 6.** СОМБП изображение трехмерного распределения интенсивности ЭМП вблизи полимерного наноцилиндра, покрытого пленкой Au-Pd толщиной 25 нм. СОМБП изображение представляет собой набор двумерных распределений интенсивности на заданных расстояниях от вершины наноцилиндра: (а)- 20 нм; (б)-300 нм; (в)-700 нм. Длина волны накачки  $\lambda = 532$  нм. СОМБП изображение получено в режиме сбора оптического излучения апертурным зондом.

ный тип симметрии наблюдался при проведении измерений с различными апертурными зондами, спиральность не может быть связана с особенностями какого-либо конкретного зонда и является особенностью, характерной для системы апертурный зонд-металлизированный наноцилиндр.

Для теоретического описания полученных выше экспериментальных результатов рассмотрена качественная модель с использованием упрощенного подхода теории возмущений. В модели рассматривалась линейно поляризованная волна с частотой  $\omega$ , падающая из вакуума по нормали к границе полубесконечного металла, занимающего полупространство  $z < Z(\rho, \varphi)$ , где  $\rho, \varphi$  и  $z$  - цилиндрические координаты, а функция  $Z(\rho, \varphi) = Lf(\rho/R)[1 + \gamma g(\varphi)]$  описывает плоскую поверхность с единичным выступом высотой  $L$  и радиусом  $R$ . Функция  $f(x)$  удовлетворяет условиям  $f(x < 1) > 0$ ,  $f(x \geq 1) \equiv 0$ , а член  $\gamma g(\varphi)$  описывает отклонение формы выступа от цилиндрически симметричного. Выступ на поверхности предполагался: слегка наклонным; малым по сравнению с глубиной проникновения электромагнитной волны в металл; имеющим небольшое отклонение от цилиндрически симметричной формы.

В результате теоретического анализа модели показано, что рассеяние линейно поляризованного монохроматического излучения на единичном субдлинноволновом выступе может приводить к формированию оптического вихря при малых отклонениях формы выступа от цилиндрически симметричной. В рамках модели получено решение, соответствующее спирали первого порядка в плоском распределении тангенциальной компоненты усредненного по времени вектора Умова-Пойнтинга  $\mathbf{S} = \frac{c}{8\pi} \text{Re} [\mathbf{E} \mathbf{H}]$ , взятого на металлической поверхности  $z = Z(\rho, \varphi)$ .

Проекция  $\mathbf{S}$  на плоскость  $z = 0$  описывает поток энергии бегущей плазмон-поляритонной волны, возбуждение которой падающим излучением обусловлено наличием поверхностной неоднородности. Эта компонента экспоненциально затухает при росте  $|z|$  и отсутствует при отсутствии поверхностного плазмона, то есть в случае диэлектрического материала, для

которого  $\text{Re } \varepsilon > 0$ . Для рассмотренной модели

$$|S_x^{(s)}| \gg |S_y^{(s)}|, \quad S_x^{(s)} \propto e^{-\kappa_s z} \text{Re} \left\{ H_1^{(1)}(q_s R) (\sin \varphi + \gamma \text{Im } g_2 e^{i\varphi}) \right\},$$

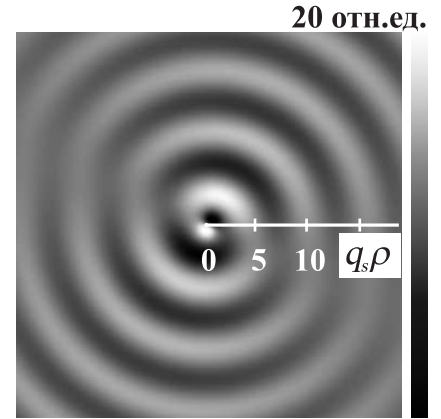
где ось  $x$  выбрана параллельно вектору  $\mathbf{E}_0$  поля падающей волны,  $H_1^{(1)}(x)$  - функции Ханкеля первого рода,  $\kappa_s = \sqrt{q_s^2 - k^2}$ ,  $k = \omega/c$ ,  $q_s$  - модуль волнового вектора поверхностной плазмонной волны с частотой  $\omega$ .

На рис. 7 представлена спираль первого порядка, проявляющаяся в плоском распределении  $S_x^{(s)}(\rho, \varphi, z = Z(\rho, \varphi))$  при  $\gamma \neq 0$ , то есть в случае, когда форма поверхностной неоднородности отклоняется от цилиндрически симметричной. Таким образом, причиной появления вихревой структуры в распределении ЭМП вблизи металлизированного наноцилиндра, в рассмотренной модели, является возбуждение циркулярных поверхностных плазмонов. Результаты теоретического исследования качественно согласуются с фактом обнаружения методом СОМБП спиралевидного распределения интенсивности электромагнитного поля в непосредственной близости от металлизированных наноцилиндров.

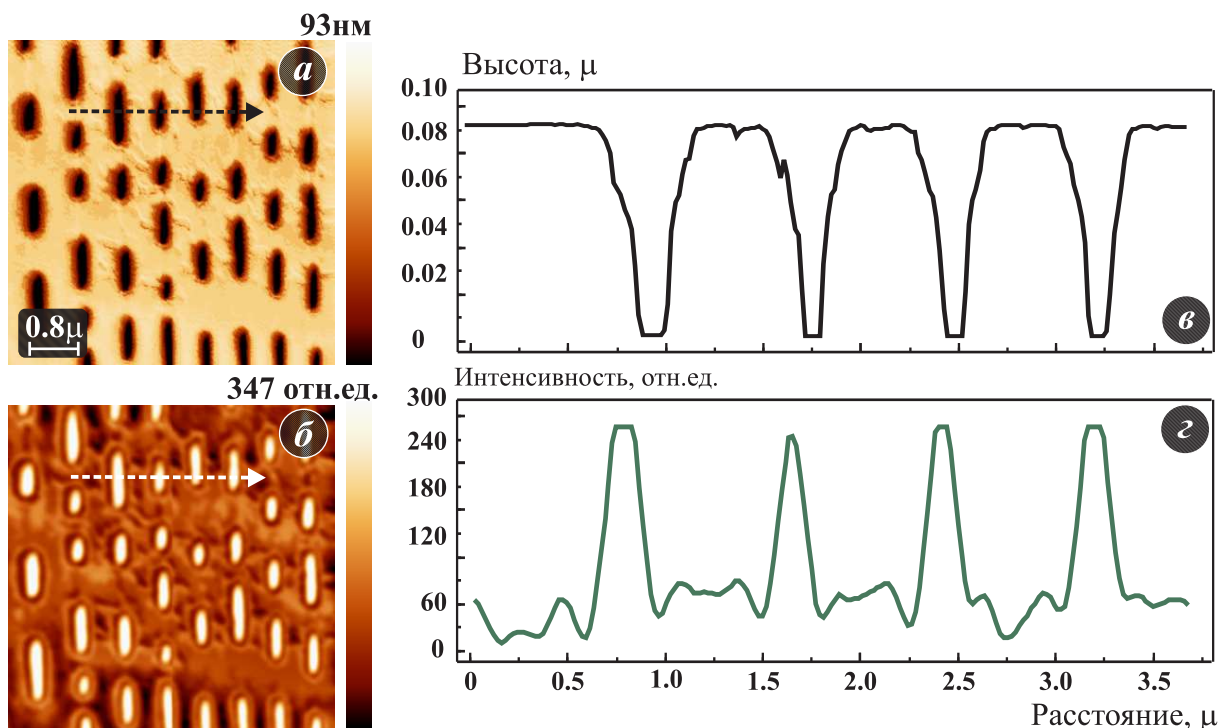
В заключительной части главы представлены результаты применения созданного комплекса СОМБП для экспериментального исследования кластеризации люминесцентного красителя ROT-300 (BASF) и красителя DCM в полимерных пленках с оптическим разрешением, много меньшим длины волны излучения накачки  $\lambda = 532$  нм и длины волны излучения люминесценции  $\lambda_{ROT-300} = 605$  нм,  $\lambda_{DCM} = 590$  нм.

Исследуемые пленки формировались путем спинингования на подложке из стекла и полиметилметакрилата (ПММА). В эксперименте использовался модуль СОМБП со сканированием образцом (рис. 2(б)) в режиме сбора излучения люминесценции с помощью высокоапертурного (N.A.=0.6) микрообъектива. Возбуждение люминесценции осуществлялось локально с помощью апертурного зонда. Средняя толщина пленок составляла  $100 \div 200$  нм. На основе статистического анализа серии изображений было показано, что характерный размер образующихся кластеров составляет около 150 нм, что значительно меньше длины волны в максимуме спектра люминесценции.

В качестве контрольных измерений проводились исследования покрытых монослоем люминофора ROT-300 сферических стеклянных частиц, наносимых на поверхность стекла или ПММА. Размер сферических частиц выбирался в диапазоне  $20 \div 200$  нм. При этом для выбранной фракции функция распределения частиц по размерам являлась одномодальной,



*Рис. 7. Распределение тангенциальной компоненты  $S_x^{(s)}$  вектора Пойнтинга на металлической поверхности в функции безразмерного радиуса  $q_s \rho$  и полярного угла.*



**Рис. 8.** Топографическое-(а) и ближнепольно-оптическое люминесцентное изображение-(б), экспериментального люминесцентного носителя информации на основе DVD диска. (в,г)-сечения вдоль указанных стрелками на (а) и (б) направлений. Длина волны накачки  $\lambda = 532$  нм, длина волны люминесценции  $\lambda_{lum} = 605$  нм.

по форме напоминающая гауссову. Полуширина пика распределения частиц по размерам составляла обычно около 70 нм. Подобный выбор контрольного объекта позволял с высокой степенью приближения создавать структуры, имеющие характерные размеры неоднородностей в оптическом отклике, близкие к предполагаемым для сплошных пленок (т.е. много меньших, чем длина волны излучения). Распределение интенсивности люминесценции сферических наночастиц было получено с использованием двухпроходной методики сканирования по плоскости на расстоянии  $z = 5$  нм от максимально высокого объекта на топографическом изображении. Исходя из проведенного в диссертации анализа сечений полученных СОМБП изображений сферических наночастиц, оценена оптическая разрешающая способность СОМБП, которая составила  $25 \div 30$  нм, при использовании собственных апертурных зондов.

В заключении приведен результаты исследований поведения люминофоров в экспериментальных носителях для создания трехмерной оптической памяти на основе мультислоев, состоящих изначально из неперемешанных люминофоров и гасителей люминесценции. Регистрация и хранение информации в таких слоях осуществляется за счет локализации люминесцентного красителя в рельефных углублениях в носителе информации. Увеличение емкости носителя (по оценкам до 1000 Гб на носителе формата DVD) достигается путем наращивания слоев с локализованным люминофором. Результаты исследования топографии и распределения люминесценции красителя ROT-300 в одном слое экспериментального носителя информации на основе DVD диска представлены на рис. 8.

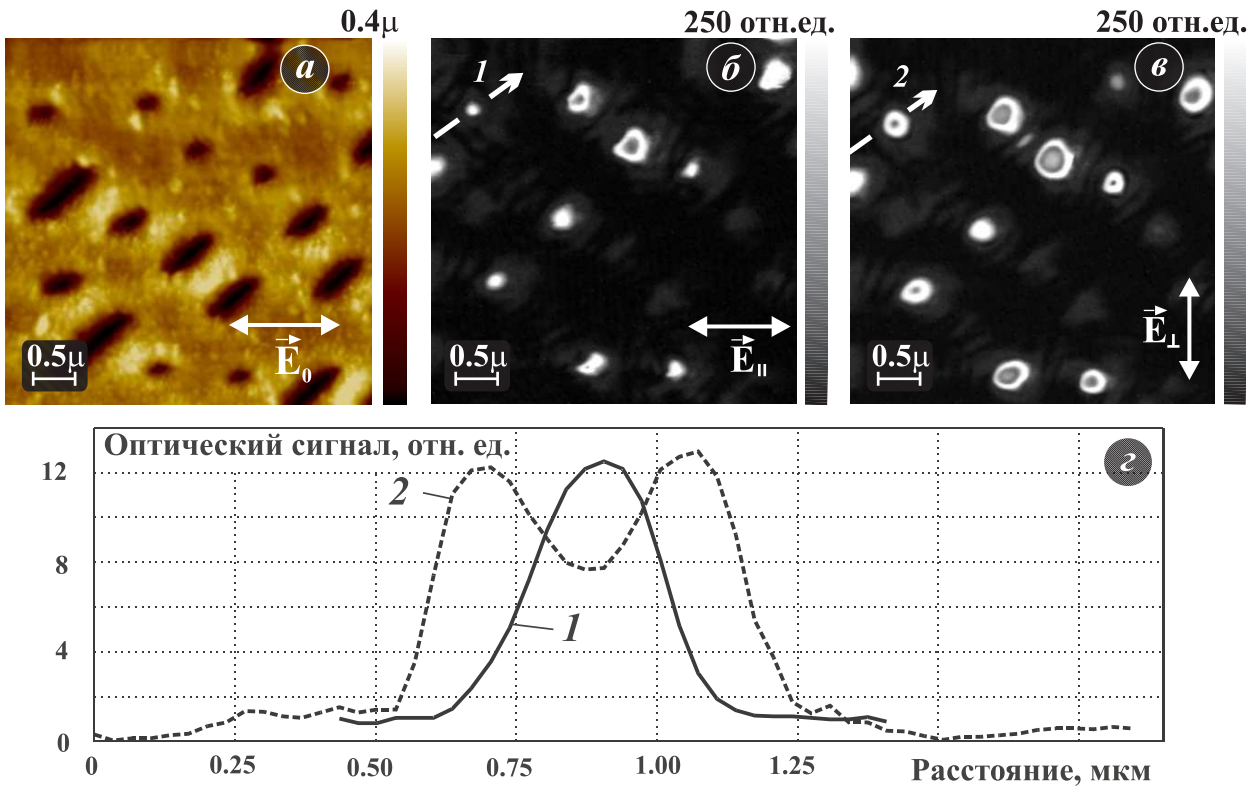
**Глава 4** посвящена анализу и разработке поляризационной методики СОМБП, сочетающей в себе статическую и динамическую поляриметрию ближнего поля с использованием созданного диагностического комплекса СОМБП. Для экспериментального исследования локальных поляризационных свойств ЭМП вблизи поверхностных субмикро- и наноструктур разработаны и созданы узлы, адаптирующие созданную аппаратуру СОМБП для локальной оптической статической и динамической поляризационной микроскопии ближнего поля.

Как было показано в предыдущей главе, СОМБП предоставляет уникальные возможности по изучению локальной трехмерной структуры ЭМП в непосредственной близости поверхностных наноструктур. В сочетании с ними применение поляризационной методики СОМБП для анализа локальной поляризационной структуры ЭМП существенно расширяет возможности созданного комплекса. Примером реализации такого рода возможностей являются результаты по экспериментальному определению локализации ортогонально поляризованных компонент ЭМП оптической частоты в непосредственной близости от апертуры субдлинноволнового размера (см. рис. 9). Апертуры субдлинноволнового размера были сформированы путем термического напыления алюминия на заготовки экспериментальных компакт дисков, имевших увеличенную до  $h = 500$  нм глубину питов-носителей информации. Напыление проводилось под углом около  $\alpha = 35^\circ$  по отношению к плоскости заготовки, с одновременным ее вращением вокруг своей оси. Толщина металлической пленки составляла  $100 \div 150$  нм. В результате такого напыления были сформированы одиночные отверстия диаметром меньше длины волны, расположенные на расстояниях, значительно превышающих их диаметры.

Поляризационные СОМБП исследования полученных образцов проводились в режиме проходящего света при освещении со стороны подложки параллельным, линейно поляризованным лазерным лучом (длина волны  $\lambda = 670$  нм, оптическая мощность 3 мВт). В связи с поставленной задачей исследования использовался модуль СОМБП со сканированием зондом в режиме статической поляризационной микроскопии ближнего поля. Оптические СОМБП изображения регистрировались в режиме постоянной высоты на высоте 20 нм над поверхностью образца.

СОМБП изображения, полученные при изучении распределения ЭМП в непосредственной близости от отверстия, представлены на рис. 9. Результаты экспериментального изучения распределения интенсивности различно поляризованных компонент электромагнитного поля оптической частоты, поляризованных параллельно (рис. 9(б)) и перпендикулярно (рис. 9(в)) поляризации излучения подсветки (рис. 9(а)), показали качественное различие в локализации этих компонент в непосредственной близости от апертуры субдлинноволнового размера в металлической пленке. Кроме того, значительная интенсивность электромагнитного поля с поляризацией, ортогональной поляризации излучения подсветки, показывает на существенный вклад нерадиационных компонент в интегральную ин-



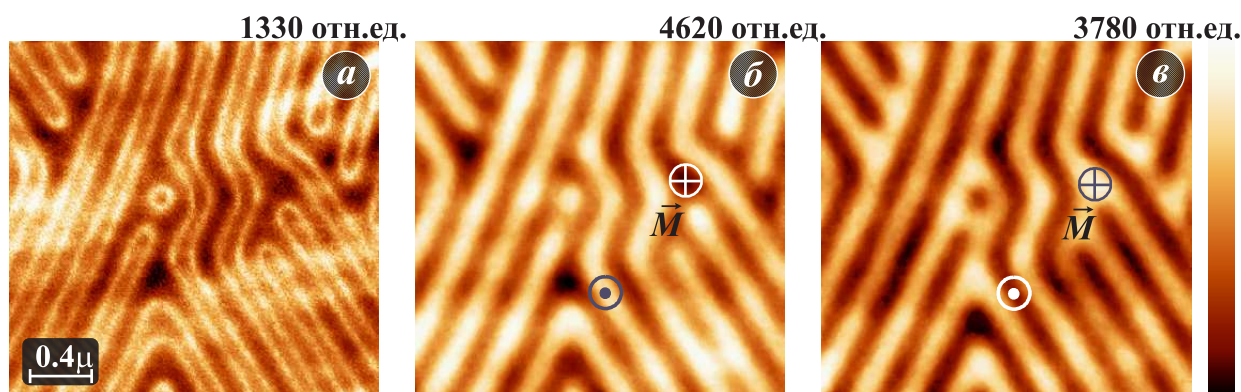


**Рис. 9.** Топографическое изображение-(а) поверхности металлической пленки, на которой сформированы субдлинноволновые апертуры, и СОМБИ изображения различно поляризованных компонент ЭМП для того же участка-(б,в). (z)-сечения СОМБИ изображений в направлениях, указанных стрелками. Ориентация анализатора относительно поляризации падающего излучения: (б)-параллельно; (в)-перпендикулярно.

тенсивность. Подобные результаты находятся в хорошем качественном соответствии с теоретическими предсказаниями [14].

Совершенствование магнитных устройств, предназначенных для хранения информации, невозможно без детального изучения ферромагнитных и ферримагнитных сред, а именно пленок, являющихся основой таких устройств. Тонкие пленки на основе феррит-гранатов являются одними из лучших на сегодняшний день магнитооптических материалов, что обусловлено их высокой прозрачностью для видимого и ближнего ИК-диапазонов, значительной величиной эффекта Фарадея и большим значением коэффициента оптической добротности. Тонкие пленки  $\text{Vi}$ -содержащих феррит-гранатов также представляют большой интерес для создания миниатюрных высокочувствительных оптических датчиков измерения магнитных полей на основе эффекта Фарадея с чувствительностью вплоть до 0.1 Гс.

Традиционными методами наблюдения доменной структуры являются оптический метод порошковых фигур, а также методы поляризационной оптической микроскопии, основанные на использовании магнитооптических эффектов Фарадея, Коттона-Мутона, Керра, кругового магнитного и линейного магнитного дихроизмов. В последнее время все большее применение для изучения магнитной структуры находит магнитная силовая микроскопия (МСМ). Несмотря на многие достоинства МСМ, присутствие магнитного зонда вблизи изучаемой структуры делает необходимым учет



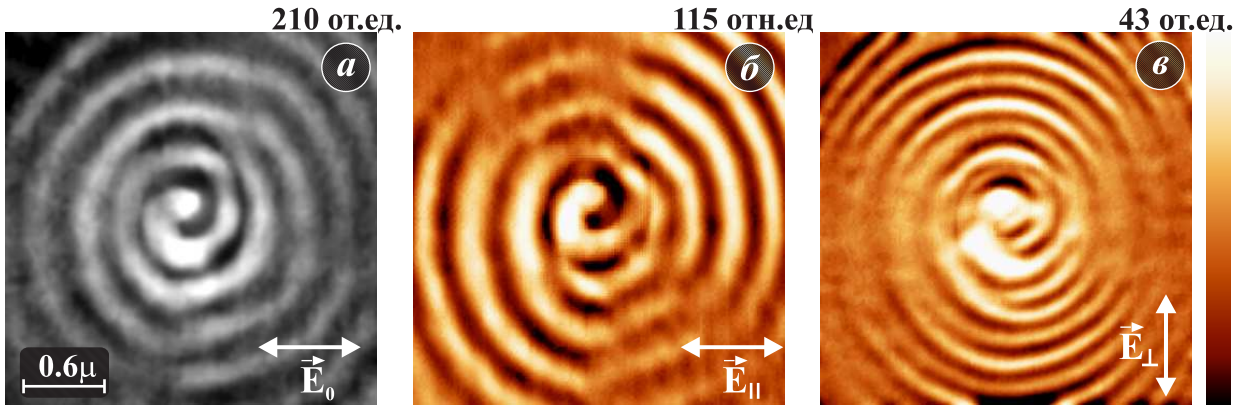
*Рис. 10. Поляризационные оптические СОМБП изображения Bi-содержащей эпитаксиальной пленки феррита-граната, полученные при использовании апертурного зонда в качестве коллектора излучения. Ориентация поляризаторов была выбрана таким образом, чтобы обеспечить раздельное наблюдение и максимальный контраст: доменных стенок-(а); доменов с противоположной намагниченностью-(б, в). Толщина пленки феррита-граната 0.55 мкм, длина волны накачки  $\lambda = 532$  нм.*

воздействия зонда на локальную магнитную структуру образца, и наоборот. Поляризационная СОМБП предоставляет уникальную возможность сочетания традиционного метода поляризационной оптической микроскопии с возможностями сверхразрешения ближнепольной микроскопии при исследовании локальных магнитооптических эффектов.

В первой серии экспериментов по изучению эффекта Фарадея в пленках ферритов-гранатов использовалась схема статического поляризационного СОМБП. В качестве объектов исследования были выбраны эпитаксиальные пленки ферритов-гранатов толщиной  $h = 2 \div 10$  мкм на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ), имеющие фарадеевский угол вращения плоскости поляризации света  $\varphi = 1 \div 4^\circ$ . В результате экспериментов впервые показана возможность анализа поляризации оптического излучения, провзаимодействовавшего с исследуемым объектом, в режиме собирающего (локальный сбор излучения апертурным зондом) СОМБП на примере раздельной визуализации магнитной доменной структуры и структуры доменных границ в пленках ферритов-гранатов. Оцененная в диссертационной работе максимальная чувствительность статической схемы поляризационного СОМБП к углу поворота плоскости поляризации составила  $\Delta\varphi = 0.8^\circ$ .

Исследование поведения пленок ферритов-гранатов при уменьшении толщины пленок приводит к необходимости увеличения чувствительности поляризационного СОМБП к углу поворота плоскости поляризации, что становится весьма затруднительно при использовании статической схемы поляризационного СОМБП. В поисках возможностей для исследования локальных поляризационных свойств тонких ( $h < 1$  мкм) пленок ферритов-гранатов были разработаны и созданы узлы, адаптирующие аппаратуру СОМБП для локальной оптической динамической поляризационной микроскопии ближнего поля.

Для повышения чувствительности СОМБП к углу фарадеевского



*Рис. 11. Распределение интенсивности ЭМП вблизи полимерного наноцилиндра, покрытого пленкой Au-Pd толщиной 25 нм-(а), и изображения поляризационной структуры ЭМП вблизи вершины наноцилиндра-(б,в). СОМБП изображения получены в режиме сбора оптического излучения апертурным зондом. Ориентация анализатора относительно поляризации падающего излучения: параллельно-(б); перпендикулярно-(в).*

вращения применена модуляция угла линейной поляризации падающего излучения, что в сочетании с синхронным детектированием позволяет существенно повысить чувствительность методики. Применение электрооптического модулятора МЛ-102 с управляющим контроллером позволяет использовать различные возможные способы модуляции угла поляризации с частотой модуляции до  $f_m \leq 150$  кГц. Основным преимуществом динамического метода является отсутствие зависимости поляризационного контраста от интенсивности неполяризованной компоненты излучения (засветки или частично деполаризованного апертурой зонда излучения).

Результаты поляризационных СОМБП исследований с применением модуляционной методики представлены на рис. 10. В качестве объекта исследования использовалась Bi-содержащая пленка феррита-граната толщиной  $h=0.55$  мкм, внутренней намагниченностью  $M_0 = 450$  Гс, напряженностью магнитного поля коллапса доменов  $H_K = 2100$  Э и углом фарадеевского вращения в доменах  $\varphi \approx 0.7^\circ$ . Полученные локальные распределения магнитного кругового двойного лучепреломления (рис. 10(б,в)) демонстрируют, что, несмотря на наличие апертуры с размерами, много меньшими длины волны, с помощью созданной установкой динамической поляризационной СОМБП возможно наблюдать локальный поворот плоскости поляризации менее  $0.7^\circ$ . В результате оценки, проведенной в диссертационной работе, установлено, что чувствительность динамической схемы СОМБП составила порядка  $\Delta\varphi = 0.2^\circ$ . Это позволяет успешно использовать СОМБП для изучения ультратонких ферромагнитных и ферримагнитных сред.

В заключении главы приводятся описание и результаты экспериментов по изучению локальной поляризационной структуры оптических вихревых структур (описанных в главе 3), возникающих при взаимодействии поляризованного излучения с металлизированными наноцилиндрами. Эксперимент проводился совместно по методике трехмерного картирования ЭМП и статической поляризационной СОМБП. Трехмерное картирование



осуществлялось по методике, которая описана выше (см. главу 3), однако в оптическую схему дополнительно были введены элементы, позволяющие регистрировать кроме интенсивности ЭМП также и его поляризацию. Результаты экспериментов представлены на рис. 11. На рис. 11(а) приведено двумерное распределение интенсивности ЭМП на высоте 20 нм над вершиной металлизированного наноцилиндра, стрелкой указано ориентация вектора  $\mathbf{E}$  падающего излучения. Поляризационная структура или различные распределения компонент ЭМП на высоте 20 нм над вершиной наноцилиндра представлены на рис. 11(б,в). Интересным фактом, обнаруженным в результате анализа поляризационной структуры в вихревом распределении ЭМП вблизи металлизированного наноцилиндра, является наличие удвоенного периода на компоненте ЭМП, перпендикулярной (рис. 11(в)) возбуждающему излучению. Исчерпывающего теоретического объяснения подобному эффекту в настоящее время не существует, что говорит о необходимости дальнейшей углубленной теоретической и экспериментальной работы в таком чрезвычайно перспективного направления, как сканирующая оптическая микроскопия/поляриметрия ближнего поля.

### Основные результаты и выводы

1. Создана экспериментальная установка СОМБП модульной конструкции для комплексного исследования абсорбционных, люминесцентных и поляризационных оптических свойств субмикро- и наноструктур с оптическим разрешением существенно превосходящим дифракционный предел (вплоть до 30 нм), топографическим разрешением 0.3 нм и чувствительностью к силе воздействия зондирующего острия с поверхностью 0.4 нН. Модульная конструкция позволяет реализовать все известные режимы работы СОМБП в проходящем/отраженном свете и в комбинированном режиме (при котором апертурный зонд используется как источник и коллектор излучения одновременно), а также в режиме фотонный сканирующий туннельной микроскопии.

2. Разработана и реализована методика изучения трехмерного распределения электромагнитного поля вблизи объектов нанометровых размеров с оптическим разрешением  $\sim 30$  нм. Проведено изучение трехмерного распределения ЭМП вблизи одиночных наноструктур, представлявших собой периодически расположенные полимерные и металлизированные наноцилиндры. Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами численного расчета по методу FDTD. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов доказало возможность использования разработанной методики для изучения трехмерного распределения электромагнитного поля вблизи наноструктур.

3. Впервые методом СОМБП обнаружен эффект формирования оптических вихрей, возникающих при прохождении через металлизированные наноструктуры с определенным типом симметрии. Выявлен механизм формирования распределения электромагнитного поля со спиральной структурой, заключающийся в возбуждении циркулярных поверхностных плазмо-

нов и их взаимодействии с падающей волной.

4. Методом сканирующей оптической микроскопии ближнего поля проведено экспериментальное исследование кластеризации люминесцентного красителя в полимерной пленке с оптическим разрешением, много меньшим длины волны излучения накачки ( $\lambda = 532$  нм) и длины волны излучения люминесценции ( $\lambda_{lum} = 605$  нм). Установлено, что характерный масштаб неоднородности распределения люминесцентного красителя в полимерной пленке толщиной 100 нм, составляет 150 нм, что значительно меньше длины волны излучения, соответствующего максимуму спектра люминесценции красителя.

5. Создана установка для статической и динамической поляризационной микроскопии ближнего поля на базе созданного диагностического комплекса СОМБП. Разработана методика исследования, позволяющая получать информацию о локальных поляризационных свойствах объектов с характерными масштабами меньше длины волны оптического излучения и с чувствительностью по углу вращения поляризации  $\Delta\varphi = 0.8^\circ$  в статическом режиме и  $\Delta\varphi = 0.2^\circ$  в динамическом.

6. На основе метода сканирующей оптической микроскопии/поляриметрии ближнего поля разработан метод определения пространственного распределения различно поляризованных компонент оптического ближнего поля вблизи поверхностных наноструктур. Методика позволяет получать информацию о распределении линейно поляризованных компонент ближнего поля с пространственным разрешением вплоть до 30 нм. Проведено изучение пространственного распределения ортогонально поляризованных компонент ЭМП вблизи одиночной апертуры диаметром  $d = 50 \div 150$  нм. Показано качественное различие в локализации этих компонент в непосредственной близости от апертуры субдлинноволнового размера в металлической пленке, что хорошо согласуется с теоретическими расчетами.

7. Впервые показана возможность изучения магнитного кругового двулучепреломления (эффекта Фарадея) в тонких ( $h < 1$  мкм) пленках с помощью анализа поляризации локально собранного апертурным зондом излучения, прошедшего через образец. На примере исследования эффекта Фарадея в  $\text{Vi}$ -содержащих пленках ферритов-гранатов продемонстрирована возможность изучения в такой схеме особенностей и тонкой структуры магнитных доменов и доменных границ с чувствительностью к фарадеевскому углу вращения порядка  $\Delta\varphi = 0.2^\circ$ .

#### **Основные результаты опубликованы в следующих работах:**

1. Ежов А.А., Музыченко Д.А., Панов В.И. Модульный сканирующий зондовый микроскоп для силовой и ближнепольной оптической микроскопии/спектроскопии наноструктур // Препринт физического факультета МГУ. 1998. № 12, Вып. 9. С. 12–22.
2. Ежов А.А., Музыченко Д.А., Панов В.И. Оптический теневой и пьезоэлектрические датчики силы для атомно силовых микроскопов и

- сканирующих оптических микроскопов ближнего поля // Препринт физического факультета МГУ. 1999. № 15. 10 с.
3. Ejov A.A., Kalachev A.I., Kaporsky L.N., Muzychenko D.A., Smirnov I.B., Veiko V.P., Voznessenski N.B., Yakovlev E.B. Peculiarities of laser-assisted drawing-out processing of optical probes for SNOM // Proceedings of SPIE: Computer-Controlled Microshaping. V.P. Veiko, T. Szoerenyi, Ed. 1999. V.3822. P. 199–206.
  4. Ejov A.A., Magnitskii, S.A., Muzychenko, D.A., Panov, V.I. Near-field optical microscopy of the elements of optical memory // Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2001. V.16, № 7. P. 1101–1107.
  5. Ezhov A.A., Magnitskii S.A., Muzychenko D.A., et al. Scanning near-field optical microscopy study of electromagnetic field localization on periodical structures and defects // Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2001. V.16, № 11. P. 1761–1767.
  6. Ezhov A.A., Logginov A.S., Muzychenko D.A., et al. Scanning near-field optical microscopy of iron garnet films // Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2001. V.16, № 11. P. 1755–1759.
  7. Ejov A.A., Muzychenko D.A., Toursynov J.S. SNOM investigation of molecular luminescence and polarize properties of domain walls // Phys. Low-Dim. Struct. 2001. No. 3/4, P. 237–242.
  8. Ezhov A.A., Logginov A.S., Muzychenko D.A., et al. Scanning near-field optical microscopy as a new tool for subwavelength-resolution magneto-optical investigations // Physics of Metals and Metallography. 2001. V. 92. P. S277–S282.
  9. Didenko N.V., Kim E.M., Muzychenko D.A., et al. Silver island films probed by hyper-Rayleigh scattering and atomic force microscopy // Applied Physics B: Lasers and Optics. 2002. V.74, Nos.(7–8), pp. 647–651.
  10. Bashevoy M.V., Ezhov A.A., Magnitskii S.A., Muzychenko D.A., et al. SNOM investigation of the electromagnetic field intensity and polarization distribution in the vicinity of nanostructures // Int. Journal of Nanoscience. 2004. V. 3, Nos. 1 & 2, P. 105–113.
  11. Bashevoy M.V., Ezhov A.A., Magnitskii S.A., Malakhov D.V., Muzychenko D.A., Panov V.I., Toursynov J.S. SNOM investigation of the electromagnetic field intensity and polarization distribution in the vicinity of subwavelength structures // Proceedings of SPIE: Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies. V.P. Veiko Editor. 2003. V.5399. 2004. P. 38–49.
  12. Bashevoy M.V., Ezhov A.A., Magnitskii S.A., Muzychenko D.A., Panov V.I., Toursynov J.S. Local optical diagnostics of nanostructures. SNOM investigation of the electromagnetic field interaction with the nanostructures // Proceedings of SPIE: Micro- and Nanoelectronics. K.A. Valiev, A.A. Orlikovsky, Ed. 2004. V. 401. P. 561–572.

13. Ежов А.А., Магницкий С.А., Музыченко Д.А., Панов В.И. Применение сканирующей оптической микроскопии ближнего поля для изучения субмикро- и нанообъектов, а также распределения электромагнитного поля // Научные технологии. 2005. Т. 6, № 1. С. 34–40.
14. Ezhov A.A., Magnitsky S.A., Maslova N.S., Muzychenko D.A., Nikulin A.A., Panov V.I. Surface-plasmon vortices in nanostructured metallic films // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82, Вып. 9-10. С. 678–681.
15. Ezhov A.A., Magnitskii S.A., Maslova N.S., Muzychenko D.A., Nikulin A.A., Panov V.I. Near-field optical vortexes at nanostructured metallic films // Int. Journal of Nanoscience. 2007. V. 6, Nos. 3 & 4. P. 233–236.

### Список цитируемой литературы

- [1] *G. Binnig, H. Rohrer.* Scanning tunneling microscopy // Helv. Phys. Acta. 1982. Vol. 55. No. 6. P. 726–735.
- [2] *G. Binnig, C.F. Quate, Ch. Gerber.* Atomic force microscope // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 56. No. 9. P. 930–933.
- [3] *A. Lewis, et al.* Scanning optical microscopy with 500 Å spatial resolution // Biophys. J. 1983. Vol. 41. P. 405a.
- [4] *D.M. Eigler and E.K. Schweizer.* Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope // Nature. 1990. Vol. 344. P. 524.
- [5] *P.H. Beton, A.W. Dunn, and P. Moriarty.* Manipulation of C60 molecules on a Si surface // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. P.1075.
- [6] *E.A. Synge.* A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region // Philosophical Mag. 1928. Vol. 6. p. 356.
- [7] *E. A. Ash, G. Nicholls.* Super-resolution aperture scanning microscope // Nature. 1972. Vol. 237. P. 510–512.
- [8] *D. W. Pohl, W. Denk, M. Lanz.* Optical stethoscopy: image recording with resolution  $\lambda/20$  // Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 44. No. 7. P. 651–653.
- [9] *A. Lewis, et al.* Development of a 500 Å spatial resolution light microscope // Ultramicroscopy. 1984. Vol. 13. P. 227–231
- [10] *F. Zenhausern, et al.* Scanning interferometric apertureless microscopy: optical imaging at 10 angstrom resolution // Science. 1995. Vol. 269, No. 8. P. 1083–1085.
- [11] *H.A. Bethe.* Theory of Diffraction by Small Holes // Phys. Rev. 1944. Vol. 66. P. 163.
- [12] *K. Karrai, R.D. Grober.* Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 66, No. 14. P. 1842–1844.
- [13] *Kane Yee.* Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1966. V. 14, No. 3. P. 302–307
- [14] *Y. Leviatan.* Study of near-field of a small aperture // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. No. 5. P. 1577–1583.