

На правах рукописи

**СКИДАНОВ
Роман Васильевич**

**ОПТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ И ВРАЩЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МИКРООБЪЕКТОВ ВИХРЕВЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ,
СФОРМИРОВАННЫМИ ДИФРАКЦИОННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

Специальность
01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Самара –2007

Работа выполнена
в Самарском государственном аэрокосмическом университете
имени академика С.П. Королева
и Институте систем обработки изображений РАН

Научный консультант:
член-корреспондент РАН СОЙФЕР Виктор Александрович.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор
Захаров Валерий Павлович;
доктор физико-математических наук, профессор
Ивахник Валерий Владимирович;
доктор физико-математических наук, профессор
Рябухо Владимир Петрович.

Ведущая организация:
Институт автоматики и электрометрии СО РАН

Защита состоится 26 октября 2007 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.01 при Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., профессор

Шахов В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Диссертация посвящена формированию радиально-симметричных вихревых лазерных пучков с помощью синтезированных методами компьютерной оптики дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и решению на этой основе задач оптического захвата и вращения диэлектрических микрообъектов.

Актуальность темы

Оптический захват и вращение микрообъектами основаны на хорошо известном явлении давления света. После создания лазеров появилась возможность создавать силу давления излучения достаточную для ускорения, замедления, отклонения, направления и даже стабильного захвата микрообъектов, размеры которых лежат в диапазоне от долей до десятков микрометров. В диссертации исследуется движение прозрачных диэлектрических микрообъектов. Если показатель преломления больше показателя преломления среды, то сила, возникающая в результате изменения направления движения света, действует на микрообъект так, что он двигается в область наибольшей интенсивности света.

Первые эксперименты по наблюдению захвата и ускорения микрообъектов, взвешенных в жидкости и газе, описаны в работах Ashkin A. в 1970г. В 1977 году этим автором наблюдалось изменение силы давления излучения на прозрачные диэлектрические сферические объекты в зависимости от длины волны и размера.

Если в первых работах было показано, что микрообъект можно захватывать и линейно перемещать, то в последующих рассматривалась возможность вращать и ориентировать в пространстве микрообъекты. Оптическое вращение позволяет реализовать бесконтактный привод микромеханических систем, как это показано в работе Friese M. E. J. в 1995г. Оптическое вращение большое значение имеет в биологии (Ashkin A., 1987), (Tadiri Y., 1991).

Можно выделить три основных способа вращения микрообъектов:

- За счет спинового углового момента, который существует у полей с круговой поляризацией (при этом вращаются только двулучепреломляющие микрообъекты, например, микрообъекты из исландского шпата), этот метод описан в работе Bretenaker F., Le Floch A. (1990), а также в работе Friese M. E. J. (1998). Основной недостаток этого метода – ограничение на материал, из которого изготовлен микрообъект: он должен быть двулучепреломляющим кристаллом;
- За счет орбитального углового момента, возникающего из-за спиральной формы волнового фронта, например, пучки Гаусса-Лагерра и Бесселя высших порядков. Передача орбитального углового момента происходит за счет частичного поглощения света в микрообъекте. Этот способ

представлен в работах He H. (1995), Friese M. E. J.(1996), Simpson N. B., Allen L., Padgett M. J. (1996). В этих работах пучки Гаусса-Лагерра и Бесселя формировались с использованием амплитудных голограмм, что чрезвычайно невыгодно с точки зрения энергетической эффективности. Гораздо эффективнее использовать чисто фазовые дифракционные оптические элементы, например для формирования пучков Бесселя (Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., 1992). Известны работы, в которых микрообъекты “вращаются” по траекториям отличным от окружности, например, по световым треугольнику, квадрату, спирали (Волостников В.Г., Рахматулин М.А., 2000). При этом оптические элементы изготавливались по технологии отбеливания амплитудных транспарантов, которая затрудняет точное воспроизведение параметров рельефа. В известных работах по вращению микрообъектов не использовались высокоэффективные и высококачественные ДОЭ, что делает актуальной задачу создания по технологии электронной и оптической литографии фазовых ДОЭ с высокой дифракционной эффективностью и формирования на их основе одномодовых вихревых лазерных пучков, в том числе пучков Бесселя, оптических вихрей, гипергеометрических мод, и проведения экспериментов по оптическому захвату и вращению микрообъектов.

– За счет изменения фазового набега в интерференционной картине (при захвате микрообъекта в интерференционную картину) между пучком, имеющим винтовой волновой фронт (например, пучок Гаусса-Лагерра), и Гауссовым пучком. И вращение этой картины осуществляется с помощью изменения оптической длины пути одного из пучков. Этот способ описан в работе Paterson L. (2001). Главный недостаток этого метода - необходимость использования довольно сложной оптической схемы. В этом случае также проще использовать ДОЭ, формирующий суперпозицию мод Бесселя или Гаусса-Лагерра (Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., 1997г.). Вращающиеся пучки Бесселя или Гаусса-Лагерра, у которых при распространении вдоль оптической оси вращается распределение интенсивности в поперечном сечении пучка, можно использовать для вращающихся микрообъектов с регулируемой скоростью с помощью линейного смещения источника излучения или фокусирующей линзы. При этом оптическая схема сводится, по сути, к одному ДОЭ. Т.е. задача создания фазовых ДОЭ, формирующих многомодовые вращающиеся пучки, и проведение экспериментов по вращению микрообъектов в таких пучках является актуальной.

В работе соответственно рассматриваются второй и частично третий способы оптического захвата и вращения диэлектрических микрообъектов из различных материалов.

Расширение возможностей ловушек также достигается за счет формирования 2D и 3D матриц ловушек. В работе Curtis J. E., Koss B. A., Grier D. G. (2002) предлагается динамический дифракционный элемент, представляющий собой матрицу $N \times N$ программируемых фазовых решеток,

дополнить матрицей $N \times N$ микролинз. В работе Сојос D. (2002) использован итерационный метод расчета фазовых ДОЭ, предназначенных для создания 2D и 3D массивов оптических ловушек. Экспериментально сформирована матрица из 8-ми Гауссовых пучков. Основными недостатками пространственных модуляторов света на жидких кристаллах пока остаются низкая дифракционная эффективность (сильный дифракционный шум из-за крупной дискретности модуляторов) и недостаточное для реализации сложных фазовых распределений разрешение матрицы пикселей. Также, конечный размер пикселей ограничивает максимальный разброс дифракционных порядков (при высоких несущих пространственных частотах происходит бинаризация фазового профиля и дифракционная эффективность уменьшается). Поэтому если не нужна динамика, для этой задачи выгоднее использовать фазовые ДОЭ.

Таким образом, актуальна задача, решаемая в диссертации: одновременное создание на базе многопорядковых ДОЭ нескольких лазерных пучков для реализации вращения группы микрообъектов.

В последнее время резко увеличилось количество работ, в которых решения с разделяющимися переменными для уравнения Гельмгольца и Шредингера используются в оптике. Многомодовые пучки Бесселя (Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., 1995). Многопорядковые пучки Гаусса-Лагерра (Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., 1999). Непараксиальные световые пучки, которые сохраняют свою структуру при распространении описывались в работах М.А. Bandres, J.C. Gutierrez-Vega, S. Chavez-Cedra (2004). Это параболические пучки волны Гельмгольца-Гаусса. Рассматривались новые параксиальные световые пучки, сохраняющие свою структуру с точностью до масштаба. Это моды Айнса-Гаусса (М.А. Bandres, J.C. Gutierrez-Vega, 2004), элегантные пучки Айнса-Гаусса (М.А. Bandres, J.C. Gutierrez-Vega, 2004), моды Эрмита-Лагерра-Гаусса (Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников, 2004), оптические вихри (Котляр В.В., Хонина С.Н., Сойфер В.А., 2005). Некоторые из этих пучков были реализованы с помощью лазерных резонаторов (Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников), жидкокристаллических дисплеев (J.B. Bentley, J.A. Devis, M.A. Bandres, J.C., 2006), фазовых ДОЭ (Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., 1995). В то же время большинство этих пучков не были использованы в задаче манипулирования микрообъектами. В то время как использование такого рода пучков может дать дополнительные возможности в методологии “оптического пинцета”.

В известных работах по расчету сил, действующих на микрообъект с использованием геометрооптического подхода, накладываются ограничения, на форму микрообъекта и на форму светового пучка, а также, как правило, не рассматриваются параметры движения микрообъектов. Так в работе Ashkin A. (1976) рассматриваются только сферические микрообъекты в Гауссовом пучке. В работе Nieminen T. A., Rubinsztein-Dunlop H., Heckenberg N. R. (2001) сила рассчитывалась для несферических микрообъектов, но авторы ограничились случаем гауссового пучка. В работе Рахматулина М. А. (2002) рассматриваются сферические и эллиптические микрообъекты в пучках

Гаусса и Гаусса-Лагерра. Для задач манипулирования микрообъектами актуальной является задача разработки универсального метода, который позволял бы без существенных ограничений на форму пучка и микрообъекта рассчитывать силы, действующие на микрообъект. Более того, для предварительного определения параметров эксперимента, необходимо чтобы метод позволял моделировать движение микрообъектов в световых пучках с заданным амплитудно-фазовым распределением, в том числе этот метод должен моделировать вращение микрообъектов в световых пучках с винтовой фазой. Поэтому актуальной является задача разработки более общего геометрооптического метода расчета сил действия света, применимого для микрообъектов и световых пучков произвольной заданной формы и позволяющего определять параметры движения микрообъектов.

Связь с государственными и международными программами.

Работы по теме диссертации выполнялись в соответствии с планами фундаментальных и прикладных НИР по программам:

«Развитие научного потенциала высшей школы» 2005год. «Развитие научного потенциала высшей школы 2006-2008 годы. Российско-американская программа «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF RUXO – 014-SA-06) 2003-2007годы. Национальный проект "Образование": развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий 2007год. Грант РФФИ 05-08-50298 2005-2007годы. Грант РФФИ 07-07-97600-р_офи 2007год.

Целью работы является формирование радиально-симметричных вихревых лазерных пучков с помощью синтезированных методами компьютерной оптики дифракционных оптических элементов и решение на этой основе задач оптического захвата и вращения диэлектрических микрообъектов.

В соответствии с поставленной целью определены основные задачи диссертации:

1. Экспериментальное исследование сформированных с помощью спиральной фазовой пластинки (в том числе многопорядковой) вихревых лазерных пучков и решение задачи одновременного вращения диэлектрических микрообъектов, в том числе многопорядковое вращение в противоположных направлениях.
2. Экспериментальное исследование микрорельефа и характеристик ДОЭ, синтезированных методами компьютерной оптики, изготовленных по технологии электронной и оптической литографии, предназначенных для вращения микрообъектов и формирующих радиально-симметричные вихревые лазерные пучки.
3. Разработка экспериментальных установок для оптического захвата, вращения и линейного перемещения микрообъектов.

4. Экспериментальное исследование лазерных пучков Бесселя, сформированных ДОЭ, их взаимное преобразование и применение этих пучков для вращения микрообъектов.
5. Разработка метода расчета силы действия света на диэлектрические трехмерные микрообъекты, заданной формы, в приближении геометрической оптики, работающего со световыми пучками с заданным амплитудно-фазовым распределением, в том числе с вихревыми пучками, а также моделирующего движение микрообъекта в заданном световом пучке.
6. Экспериментальное исследование возможности контролируемого вращения микрообъектов с помощью многомодовых вращающихся лазерных пучков, сформированных жидкокристаллическим микродисплеем.

Научная новизна работы.

- 1 Экспериментально исследованы картины дифракции Френеля и Фраунгофера, сформированные при прохождении плоской волны или пучка Гаусса через спиральную фазовую пластинку (СФП) с разными номерами сингулярности ($n=3,7,30,31$). СФП (1-, 4-, 8- порядковые), которые были изготовлены методом электронной литографии. В световых кольцах, сформированных с помощью этих СФП и твердотельного лазера, впервые было зарегистрировано одновременное вращение нескольких полистироловых шариков диаметром 5мкм, в том числе в противоположных направлениях.
2. Разработаны и исследованы оптические установки, предназначенные для захвата, вращения микрообъектов в жидкости, отличающиеся тем, что для одновременного формирования нескольких световых полей, обладающих разными орбитальными моментами, используются ДОЭ, изготовленные с помощью электронной или оптической литографии и позволяющие, за счет свойств ДОЭ, уменьшить апертуру фокусирующего микрообъектива, увеличить размер вращаемых микрообъектов, а также работать с вихревыми радиально-симметричными пучками высоких порядков.
3. С помощью линейно-поляризованного светового пучка аргонового лазера преобразованного многоуровневой фазовой спиральной зонной пластинкой в пучок Бесселя 5-го порядка экспериментально осуществлено вращение в воде сферических полистироловых шариков диаметром 5мкм.
4. Метод расчета силы действия света и параметров движения под действием этой силы диэлектрических трехмерных микрообъектов, основанный на геометрооптическом приближении, при этом в нем, в отличие от известных методов, нет ограничения на форму микрообъекта, метод позволяет работать со световыми пучками с заданным амплитудно-фазовым распределением, в том числе с вихревыми пучками, метод позволяет, используя рассчитанную силу действия со стороны светового пучка, моделировать движение микрообъекта в этом световом пучке.
5. С помощью бинарного вихревого аксикона с порядком сингулярности $n=10$, изготовленного с помощью оптической литографии на стеклянной подложке, и твердотельного лазера было сформировано в Фурье-плоскости

микрообъектива два световых кольца радиусом 75мкм, в которых в воде одновременно вращались несколько (до 10) полистироловых шариков диаметром 5мкм.

6. С помощью жидкокристаллического микродисплея были сформированы: двухмодовый вращающийся пучок Бесселя, в котором было осуществлено контролируемое вращение микрообъектов, а также гипергеометрические моды предназначенные для задачи вращения микрообъектов.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментальных исследований дифракции Френеля и Фраунгофера плоской волны или пучка Гаусса на спиральной фазовой пластинке с разными номерами сингулярности, в том числе многопорядковые, которые были изготовлены методом электронной литографии. А также результаты экспериментальных исследований вращения полистироловых шариков диаметром 5мкм в световых кольцах, сформированных с помощью этих СФП и твердотельного лазера.

2. Разработанные оптические установки для манипулирования микрообъектами, включающие газовый (или твердотельный) лазер, микроскоп, телекамеру, отличающиеся тем, что для одновременного формирования нескольких световых полей, обладающих разными орбитальными моментами, используются дифракционные оптические элементы, изготовленные на прозрачных подложках с помощью электронной или оптической литографии.

3. Результаты экспериментов по микроманипулированию полистироловыми шариками с помощью линейно-поляризованного светового пучка аргонового лазера преобразованного 16-уровневой фазовой спиральной зонной пластинкой в бесселевый пучок 5-го порядка с кольцевой поперечной интенсивностью.

4. Метод расчета силы действия света и параметров движения под действием этой силы диэлектрических трехмерных микрообъектов произвольной формы, основанный на геометрооптическом приближении, и использующий освещающие световые пучки произвольного вида (в том числе вихревые пучки), и позволяющий моделировать движение микрообъектов в световых пучках.

5. Результаты экспериментов по манипуляции микрообъектами с помощью бинарного вихревого аксикона с порядком сингулярности $n=10$ изготовленного с помощью оптической литографии на стеклянной подложке и с помощью твердотельного лазера. В ходе экспериментов в воде одновременно вращались несколько (до 10) полистироловых шариков диаметром 5мкм.

6. Результаты экспериментов по формированию с помощью жидкокристаллического микродисплея двухмодового лазерного пучка и контролируемому вращению в нем полистиролового шарика диаметром 1мкм, а также результаты экспериментов по формированию с помощью жидкокристаллического микродисплея гипергеометрических мод.

Практическая ценность работы.

Полученные результаты могут быть использованы при создании новых оптических приборов – оптических микроманипуляторов (для перемещения и вращения микробиологических препаратов, для сборки микромеханических систем), а также в системах передачи момента движения микромеханическим системам.

Апробация работы.

Международная конференция “Photon Management”, г. Страсбург, Франция, 27-28 апреля 2004 года. Первый международный форум “Голография–ЭКПО-2004”, Москва ВВЦ, 19-22 октября 2004 года. Конференция “Голография 2005”, Варна (Болгария), 21-25 мая 2005 года. Научно-практическая конференция ”Голография в России и за рубежом. Наука и практика”, Москва (Россия), 27-30 сентября 2005 года. Международная конференция по оптике и оптоэлектронике 12-15 декабря 2005 года, Диредан (Dehradun), Индия. Конференция ” Голография Экспо-2006”, Москва (Россия), Сентябрь 26-28, 2006. Конференция “ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics'2006 ”, Санкт-Петербург (Россия), Сентябрь 4-7, 2006. Международный китайско-российский семинар по дифракционной оптике, 16-19 мая 2007, Сиань (Китай).

Публикации.

По результатам выполненных исследований лично и в соавторстве опубликовано 41 научная статья и 3 монографии.

Личный вклад автора.

Основные результаты, изложенные в диссертации получены, лично автором. Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, заключается в разработке оптических схем и создании оптических установок, создании ДОЭ; постановке оптических экспериментов; в выполнении анализа полученных результатов.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключение, списка использованных источников из 285 наименований, изложенных на 218 страницах, содержит 84 рисунка и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, изложена цель и задачи исследований, дана общая характеристика работы, показана научная новизна полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В Первой Главе рассматриваются физические основы метода манипулирования микрообъектами в световых пучках, а также проводится обзор работ, посвященных манипуляции микрообъектами в световых пучках:

1. Основные виды одиночных световых ловушек для 2D захвата и 3D-захвата.
2. Основные виды матриц ловушек для 2D захвата и 3D-захвата.
3. Основные способы вращения микрообъектов.
4. Основные способы формирования световых пучков для задач микроманипуляции, а особенно для вращения микрообъектов. Подчеркивается, что все описанные пучки с высоким качеством и энергетической эффективностью проще формировать, используя ДОЭ. Более того, использование ДОЭ во многих случаях может быть более эффективным (с точки зрения энергетической эффективности), как правило, упрощает оптическую схему и позволяет формировать с высоким качеством более сложные пучки (например, многопорядковые или многомодовые), а, следовательно, решать более сложные задачи.

Во Второй Главе предложен метод расчета сил действующих на микрообъект в световом пучке. В основу метода положено геометрикооптическое приближение. Само по себе использование геометрикооптического приближения для расчета сил не ново, и впервые этот метод был описан еще в работе Ashkin A., однако все работы, посвященные расчету сил ограничивались частными случаями. Методы, описанные в них, либо рассматривали частный случай формы микрообъекта (Рахматулин М. А.), либо частный случай светового пучка (Nieminen T. A., Rubinsztein-Dunlop H., Heckenberg N. R.). В диссертации рассматривается метод, который в отличие от ранее разработанных, позволяет:

1. работать с микрообъектами любой заданной формы;
2. работать со световыми пучками с заданным амплитудно-фазовым распределением, в том числе с вихревыми пучками;
3. моделировать движения микрообъекта в заданном световом пучке.

Рассматривается микрообъект произвольной формы в световом пучке. Будем считать, что соблюдается ряд условий: Световой пучок задается функциями интенсивности $I(x,y)$ и фазы $\varphi(x,y)$ соответственно. Микрообъект ограничен двумя поверхностями: верхней, которая задается функцией $f_1(x,y)$ и нижней, которая задается функцией $f_2(x,y)$ (рис.1). Функции $f_1(x,y)$ и $f_2(x,y)$ однозначные. Микрообъект движется в плоскости xy . Световой пучок падает на микрообъект вертикально сверху вниз.

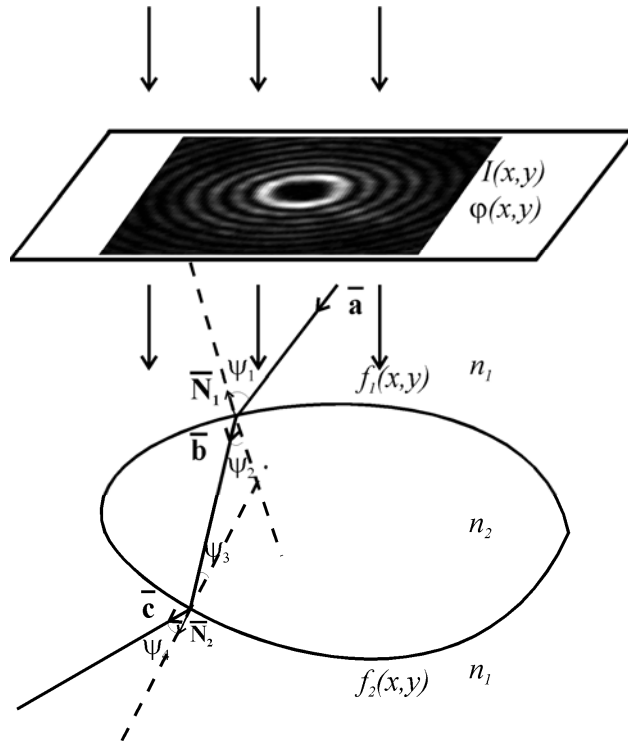


Рис.1 Схема преломления световых лучей на микрообъекте.

Единичные вектора $\vec{a}(a_x, a_y, a_z)$, $\vec{b}(b_x, b_y, b_z)$, $\vec{c}(c_x, c_y, c_z)$ задают направление падающего и преломленных лучей. При этом вектор $\vec{a}(a_x, a_y, a_z)$ определяется исходя из функции $\varphi(x, y)$, которая определяется в плоскости непосредственно перед микрообъектом. Этот вектор должен быть всегда перпендикулярен волновому фронту.

Компоненты силы действия $\vec{F}$ единичного луча на микрообъект определяются формулой

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{N}{c}(a_x - c_x) \\ F_y &= \frac{N}{c}(a_y - c_y) \end{aligned} \quad (1)$$

где N – мощность луча, c – скорость света.

При этом надо учитывать, что направляющий вектор для преломленного выходящего луча напрямую зависит от направляющего вектора падающего луча. Для всего пучка формула (1) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{1}{c} \iint_{\Omega} I(x, y)(a_x - c_x(\vec{a})) dx dy \\ F_y &= \frac{1}{c} \iint_{\Omega} I(x, y)(a_y - c_y(\vec{a})) dx dy \end{aligned} \quad (2)$$

где Ω - область максимального по площади сечения микрообъекта в плоскости перпендикулярной направлению распространения светового пучка. Зависимость $\vec{c}(\vec{a})$, т.е. направление луча после микрообъекта в зависимости от начального направления луча определяется исходя из законов преломления.

Кроме того, во второй главе рассматривается достоверность предложенного метода. Для этого результаты, которые он дает для

цилиндрического микрообъекта в гауссовом пучке, сравниваются с точным расчетом силы, действующей на этот микрообъект, осуществленным в рамках электромагнитного подхода (этот метод также приводится в диссертации). Параметры расчета: диаметр цилиндра был равен длине волны $d = \lambda = 1$ мкм, диэлектрическая постоянная цилиндра, находящегося в вакууме, $\varepsilon = 2$, диаметр перетяжки гауссова пучка 1 мкм.

На рис. 2а представлен графики зависимости проекций силы F_z для геометрооптического и электромагнитного подходов при смещении вдоль оси пучка. На рис. 2б, представлены аналогичные графики для проекций силы F_y при смещении цилиндра относительно оси распространения пучка.

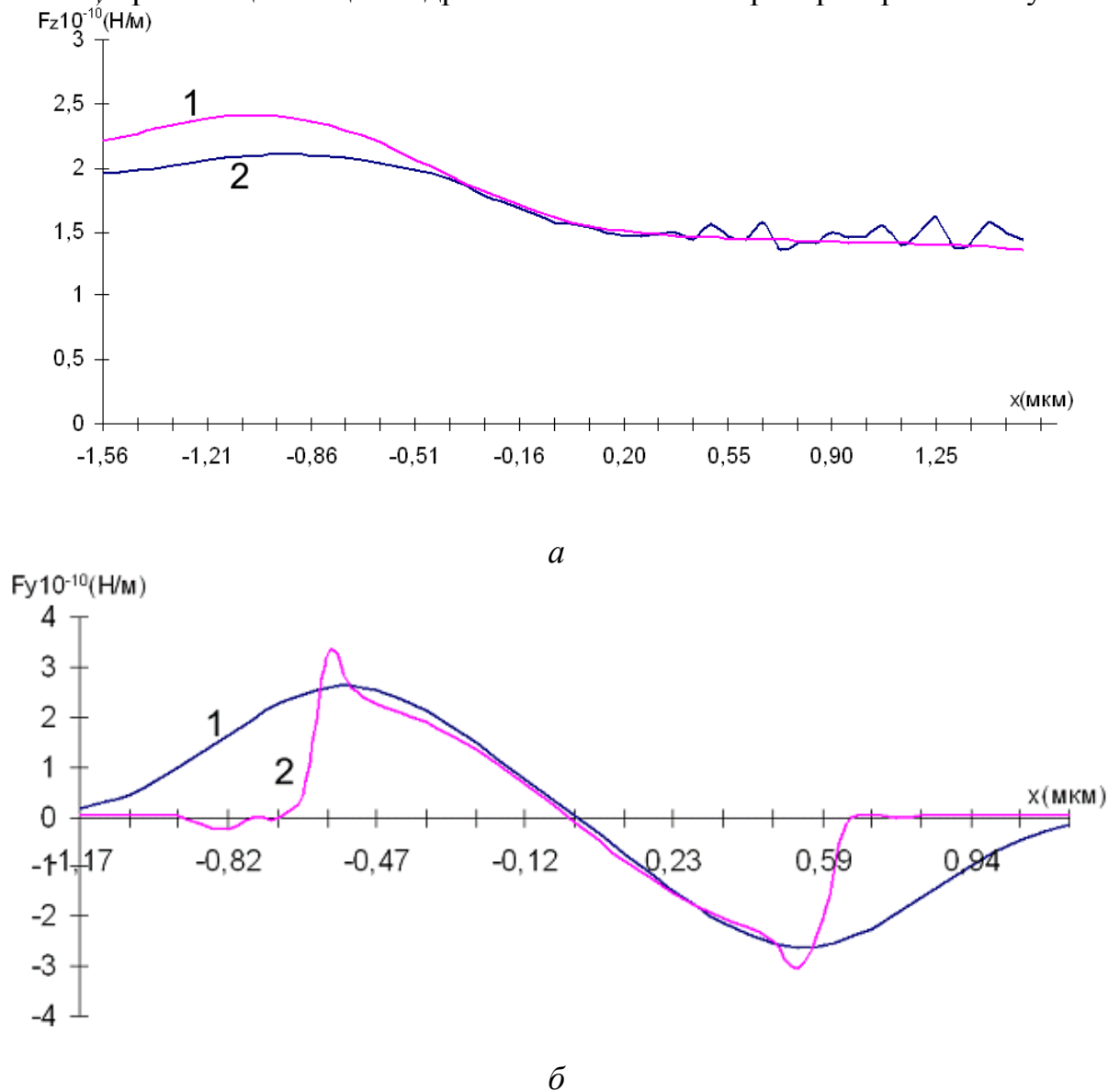


Рис.2 а) зависимость силы F_z от смещения L объекта вдоль оси Z через центр перетяжки ($Y=0$), б) зависимость силы F_y от смещения L объекта вдоль оси Y через центр перетяжки ($Z=0$) (1 – точный расчет, 2 – геометрооптический расчет).

Для расчета среднеквадратичного отклонения (С.К.О.) использовалась формула

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{1i} - f_{2i})^2}}{\langle f_2 \rangle}, \quad (3)$$

где f_{1i} – точки дискретизации сравниваемой функции, f_{2i} – точки дискретизации эталонной функции, N – количество точек дискретизации функции, $\langle f_2 \rangle$ – среднее значение эталонной функции.

Для продольной силы (рис.2а) существует область, где среднеквадратичное отклонение силы полученной в геометрикооптическом приближении от силы, рассчитанной в рамках электромагнитного подхода, составляет не более 0,1. Как видно рис.2б для поперечной силы также существует область, в которой СКО, составляет не более 0,1.

Полученные результаты позволяют утверждать, что геометрикооптический метод расчета силы, действующий на микрообъект со стороны светового пучка, обладает достаточной точностью для практического использования, за исключением случаев, не представляющих практического интереса, например, при смещении более 0,5мкм от оси пучка на рис.2б.

Третья Глава посвящена исследованию оптического захвата и вращения микрообъектов в бесселевых пучках (БП).

Приведены аналитические соотношения для скалярных и векторных БП. Скалярные БП известны как бездифракционные, так и расходящиеся. Бездифракционный БП может быть непараксиальным и удовлетворять уравнению Гельмгольца, а может быть параксиальным и преобразовываться с помощью параболического преобразования Френеля.

Для векторных двумерных непараксиальных БП с ТЕ-поляризацией и для трехмерных параксиальных БП с линейной поляризацией рассчитаны векторы Пойнтинга. Показано, что для БП ненулевого порядка вектор Пойнтинга имеет азимутальную составляющую, которая пропорциональна орбитальному угловому моменту БП. В диссертации показано, что изображение бездифракционного БП с помощью сферической линзы приводит к расходящемуся параксиальному БП, т.е. в задачах микроманипулирования используется расходящийся БП, сохраняющий свою структуру с точностью до масштаба. Формировались бесселевы пучки с помощью амплитудных голограмм (J. Turunen, 1989), винтового аксикона (Сойфер В.А., Котляр В.В., 1992). В этой работе впервые экспериментально сформирован бездифракционный бесселев пучок с помощью спиральной зонной пластинки (A. Fedotowsky, K. Lehovec, 1974):

$$E(r, \varphi) = \text{sgn}[J_n(\alpha r)] \exp(in\varphi) \quad (4)$$

где α – параметр функции Бесселя, r, φ – полярные координаты, n – целое число. ДОЭ с пропусканием (4) формирует светового кольца в Фурье-плоскости с максимальной интенсивностью.

При расчете фазы ДОЭ, для формирования БП 5-го порядка выбирались следующие параметры: $R=3$ мм, $\lambda=633$ нм, $\alpha=44.5$ мм⁻¹. На рис. 3а показан шаблон (600×600 отсчетов), по которому был методом электронной литографии изготовлен 16-градационный ДОЭ с пропусканием (4) (шаг

дискретизации 10 мкм). На рис. 3б показана центральная часть микрорельефа ДОЭ при увеличении в 50 раз (вид сверху), а на рис.3в – при увеличении в 200 раз. Картины микрорельефа получены с помощью интерферометра NEWVIEW 5000 фирмы Zygo.

На рис.3г,д,е показаны результаты эксперимента для расходящегося пучка Бесселя 5-го порядка. Бездифракционный Бесселев пучок был сформирован ДОЭ с пропусканием (4) (рис.3а,б,в), а расходящийся БП получается преобразования бездифракционного БП с помощью линзы (рис.3г,д,е). Расходящийся БП пучок описывается формулой:

$$E(r, \varphi, z) = (-1)^{n+1} \sqrt{\frac{r_0}{2\pi}} \frac{k}{z} J_n\left(\frac{krr_0}{z}\right) \exp(in\varphi) \exp\left[\frac{ik}{2z}(r^2 + r_0^2)\right] \quad (5)$$

где r, φ, z – цилиндрические координаты.

Была использована линза с фокусным расстоянием $f=50$ мм, расстояние от ДОЭ до линзы 200мм, He-Ne лазер с длиной волны 0,633 мкм, на рис. 3ж,з,и показаны результаты моделирования при этих же параметрах.

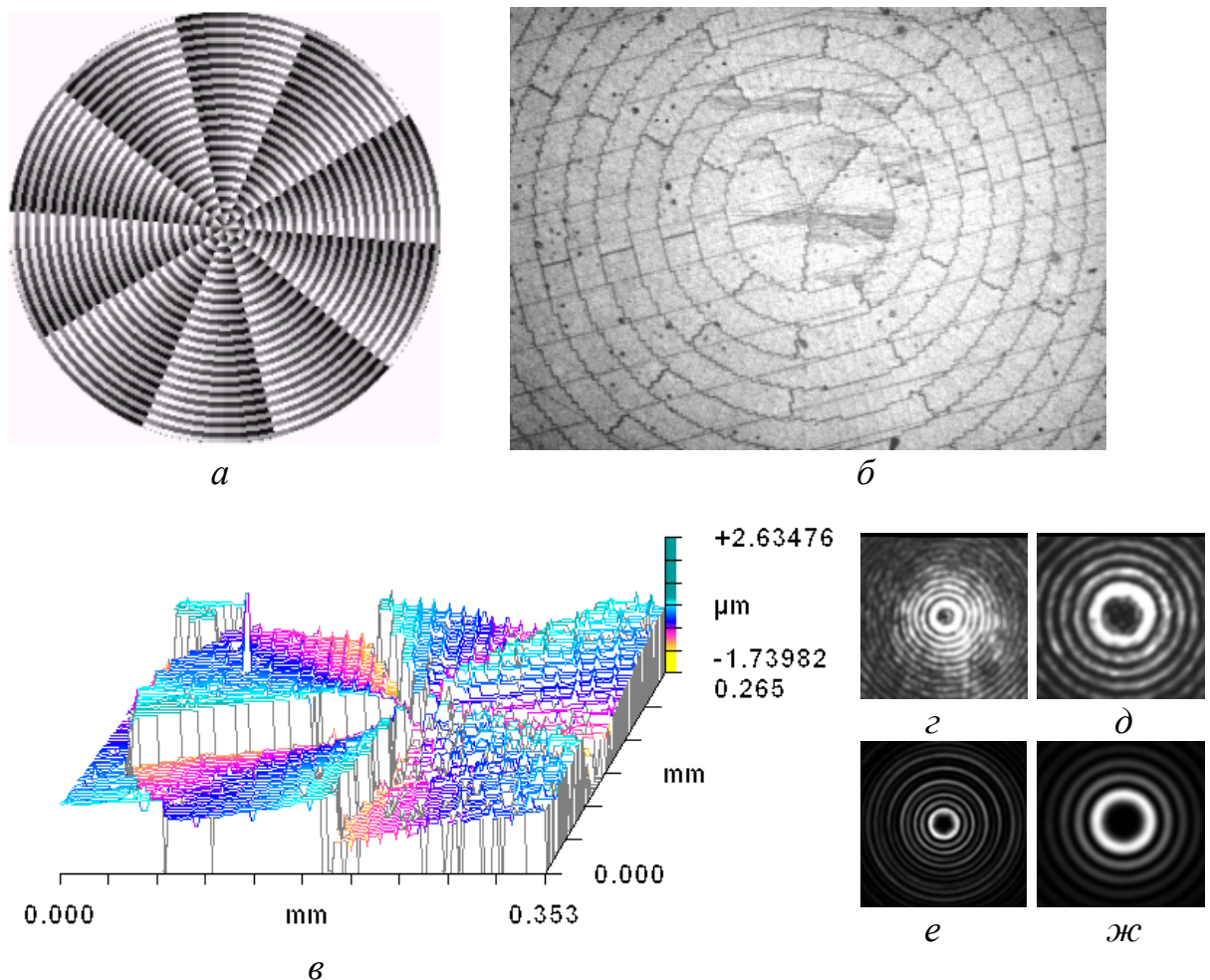


Рис.3 Фазовый ДОЭ, формирующий БП пятого порядка: шаблон фазы (а) и вид центральной части микрорельефа при увеличении в 50 раз (б) и 200 раз (в), расходящийся параксиальный БП на расстояниях 100мм, 150мм от линзы соответственно (г), (д) (эксперимент), (е), (ж) (расчет).

Для проведения экспериментов по манипулированию микрообъектами был разработан макет экспериментальной оптической установки, оптическая

схема которой приведена на рис.4а. Основной установкой является модифицированный микроскоп “Биолам – М”. Для ввода лазерного излучения использовался стандартный оптический тракт осветителя микроскопа. Внешний вид самой установки приведен на рис.4б.

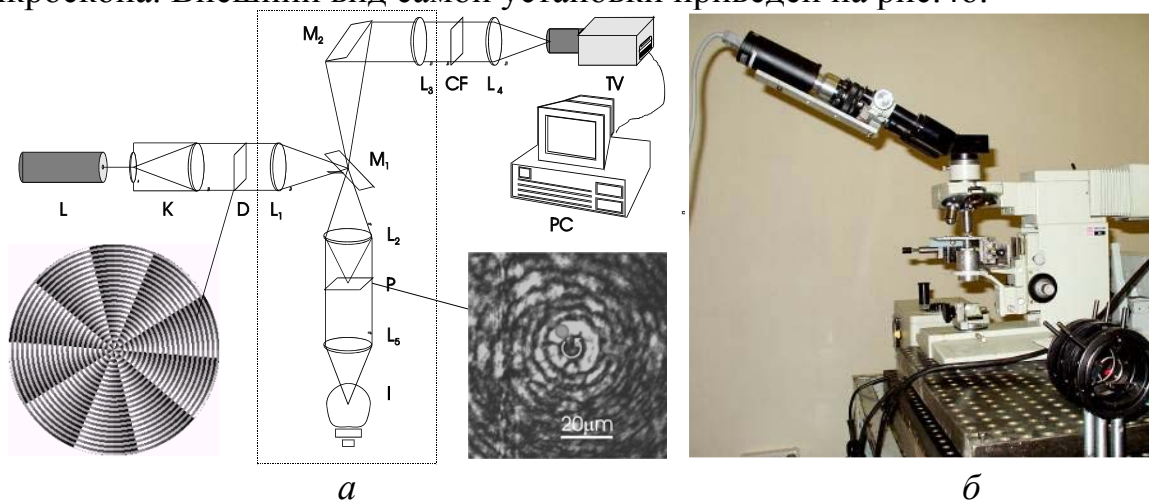


Рис.4 Оптическая схема экспериментальной установки (а): L – аргонный лазер, K – коллиматор, D – ДОО, L_1 – корректирующая линза, M_1 – полупрозрачное зеркало микроскопа, M_2 – поворотное зеркало, L_2 – микрообъектив, P – кювета с микрообъектами, L_3 – окуляр микроскопа, CF – красный светофильтр, TV – телекамера, L_4 – объектив телекамеры, L_5 – конденсор осветителя, I – лампа осветителя, фотография экспериментальной установки (б).

При разработке этой оптической установки нужно было удовлетворить нескольким противоречивым требованиям: во первых, для наибольшей эффективности фокусировки необходимо было использовать микрообъектив с большим увеличением, во вторых, размер ДОО определял размер пучка, попадающего на микрообъектив, и, например, для микрообъектива 90 $\times$ размер пучка был существенно больше входной апертуры, что неизбежно приводит к уменьшению энергии пучка, следовательно нужно использовать микрообъектив с меньшим увеличением (16 $\times$, 20 $\times$). Кроме этого, использование одного микрообъектива для фокусировки и формирования изображения, приводит к необходимости совместить фокальную и рабочую плоскости микрообъектива. Обе эти проблемы были успешно решены с помощью корректирующей линзы L_1 . Для определения минимально необходимой мощности пучка с помощью разработанного метода расчета сил была определена минимальная интенсивность $2 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$, при которой возможно движение микрообъекта диаметром 5мкм, с показателем преломления 1,5 в БП 5-го порядка. При использовании микрообъектива 16 $\times$, это дает мощность пучка в рабочей плоскости 90мВт. Учитывая, что потери при отражении от преломляющих поверхностей в фокусирующей системе составляют 55%-60% (экспериментально полученное значение), следует, что мощность пучка на выходе из лазера должна быть около 200мВт. Светофильтр CF в эксперименте был подобран так, чтобы было видно микрообъект, но не видно пучка.

В эксперименте в качестве микрообъекта использовалась клетка дрожжей размером $4,5 \times 7 \text{ мкм}$. Такой выбор объекта для вращения в световом пучке объясняется несколькими причинами: клетка дрожжей удобный прозрачный микрообъект с известным показателем преломления, клетка дрожжей довольно часто используется другим экспериментаторами, область применения оптического вращения включает в себя вращение микробиологических препаратов, близких по параметрам к клетке дрожжей. Всего клетка дрожжей совершила восемь оборотов по круговой траектории диаметром 17 мкм . На рис. 5. представлены стадии движения клетки дрожжей в БП 5-го порядка.

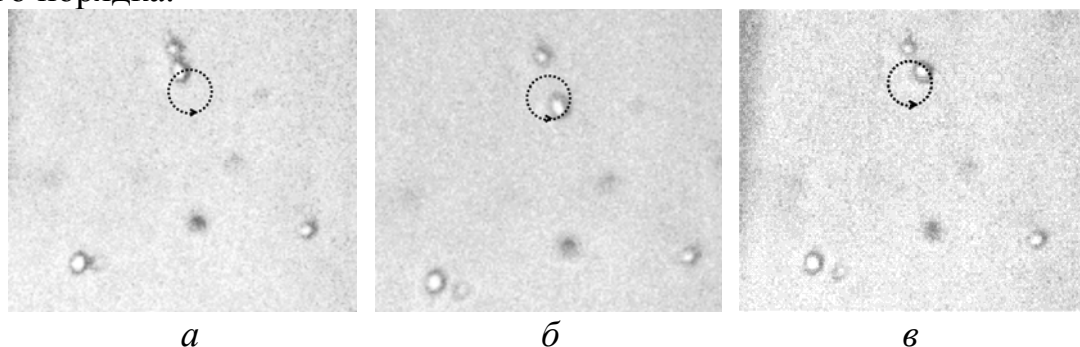


Рис.5 Клетка дрожжей захватывается световым БП и совершает 8 оборотов по кольцу диаметром 17 мкм (первое кольцо БП), а, б, в – стадии движения через $0,5 \text{ с}$. траектория показана контуром.

Клетки дрожжей как объект для экспериментов по вращению в световых пучках имеет два существенных недостатка:

1. Подготовка этих микрообъектов для эксперимента занимает время порядка нескольких часов;
2. Невозможно точно определить размеры и форму клетки дрожжей, поэтому сложно моделировать их движение в световых пучках.

Этих недостатков лишены полистироловые шарики (производство АНО “Синтез полимерных сорбентов”), которые изготавливаются для использования в хроматографии. Кроме того, такие шарики, часто используются в работах других экспериментаторов, что облегчает сравнение результатов экспериментов. Для экспериментов были выбраны полистироловые шарики диаметром 5 мкм . Они изготовлены с хорошей точностью $\pm 0,1 \text{ мкм}$, поэтому являются хорошим объектом для моделирования. Следует заметить, что диаметр шариков в 5 мкм очень большой для экспериментов по вращению, обычно в работах других экспериментаторов используются шарики диаметром 1 мкм (по массе в 125 раз меньше), однако если думать о дальнейшем практическом использовании результатов диссертации (например, в микромеханике) этот размер является наиболее подходящим, т.к. сопоставим с характерными размерами микромеханических устройств. Перед каждым натурным экспериментом, проводился вычислительный эксперимент (с использованием разработанного метода), который позволял оценить скорость движения микрообъектов в конкретном световом пучке при заданных параметрах. Так для БП пятого порядка было проведено моделирование для фокусирующего

микрообъектива 16× и мощности пучка 230мВт (на выходе из лазера). Была получена средняя скорость движения шариков диаметром 5мкм – 8мкм/с, что дало основание полагать успешность натурального эксперимента при тех же параметрах. В БП пятого порядка сформированного элементом (4) было осуществлено вращательное движение группы из таких шариков. Это позволило определить среднюю скорость движения такого шарика в БП 5-го порядка.

Для сравнения был проведен аналогичный эксперимент с БП 10-го порядка. В этом случае БП был сформирован с помощью бинарного вихревого аксикона (рис.6а). Предваряющий его вычислительный эксперимент дал значение средней скорости 6мкм/с (для мощности пучка 100мВт). Различные стадии движения полистироловых шариков через интервал в одну секунду в БП десятого порядка представлены на рис.6б,в.

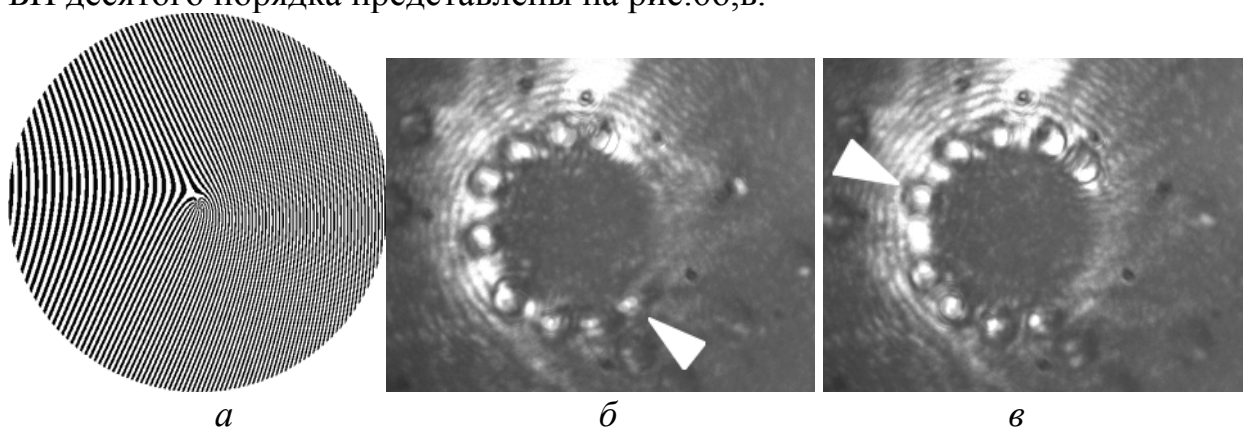


Рис.6 Фаза бинарного аксикона (а,) различные стадии движения полистироловых шариков в БП, сформированном бинарным вихревым аксиконом 10-го порядка (б,в).

Для определения средней скорости движения в экспериментах было разработано специальное программное обеспечение. При определении средней скорости использовалось несколько десятков последовательных кадров движения микрообъектов. Программа работала в два этапа, на первом этапе улучшалось качество исходного изображения (рис.7а), путем разделения цветовых каналов (был оставлен только красный канал) (рис.7б).

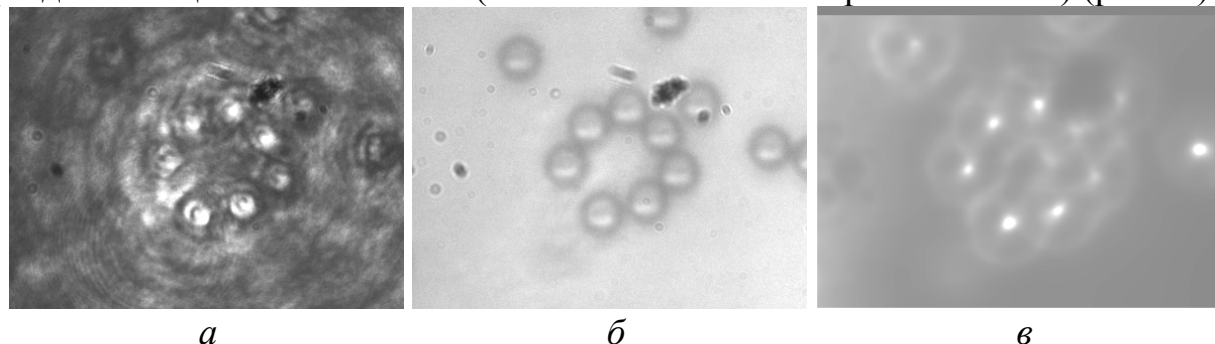


Рис.7 Экспериментальное изображение с хорошо видимым БП 5-го порядка (а), изображение после устранения пучка (видны только шарики (б), изображение с корреляционными пиками в центре шариков.

На втором этапе рассчитывалась корреляционная функция для обработанного изображения. В качестве эталонного изображения

использовалось изображение одного из шариков. В результате формировалось изображение с корреляционными пиками (рис.7в). Затем определялись координаты шариков по максимумам корреляционных пиков. Такая обработка последовательности кадров позволяла точно и с минимальными затратами времени вычислить среднюю скорость шариков в эксперименте.

В таблице 1 представлены основные параметры экспериментов для БП 5-го и 10-го порядков, включая экспериментальную среднюю скорость.

Таблица 1 Сравнительные параметры экспериментов.

Номер порядка БП	Мощность пучка в рабочей плоскости (мВт)	Средняя интенсивность на самом ярком кольце (Вт/м^2)	Диаметр самого яркого кольца (мкм)	Средняя скорость движения шариков (мкм/с)
5	230	$27 \cdot 10^7$	18	$3,4 \pm 0,4$
10	100	$8 \cdot 10^7$	37	$3,1 \pm 0,4$

Как видно из таблицы при использовании БП 10-го порядка скорость движения шариков почти не изменилась, хотя интенсивность пучка почти в три раза меньше из-за увеличения радиуса кольца. Это доказывает эффективность использования БП высоких порядков для вращения микрообъектов. Из таблицы видно довольно большое расхождение экспериментальных данных с результатами моделирования. Скорость, полученная при моделировании, всегда несколько больше экспериментальной скорости. Это можно объяснить наличием неучтенной компоненты силы трения о дно кюветы, которая появляется вследствие наличия на дне кюветы неровностей.

В Четвертой Главе проведены экспериментальные исследования оптического захвата и вращения микрообъектов в оптических вихрях. Особое внимание уделялось многопорядковым световым пучкам, когда формировалось одновременно несколько оптических вихрей. Для проведения экспериментов с такими пучками использовалась оптическая схема представленная на рис.8. Схема, представленная на рис.8, отличается от схемы на рис.4а тем, что фокусировка и наблюдение осуществлялось через разные микрообъективы, что позволило работать с пучками, не имеющими модовых свойств. Кроме этого фокусировка лазерного пучка осуществлялась как снизу, так и сверху (меняются местами камера и лазер). При фокусировке снизу минимизируется сила трения микрообъекта о дно кюветы, но, к сожалению, в этом случае налагается ограничение на мощность светового пучка (при некоторой мощности микрообъекты выдавливаются вверх и уходят из рабочей плоскости).

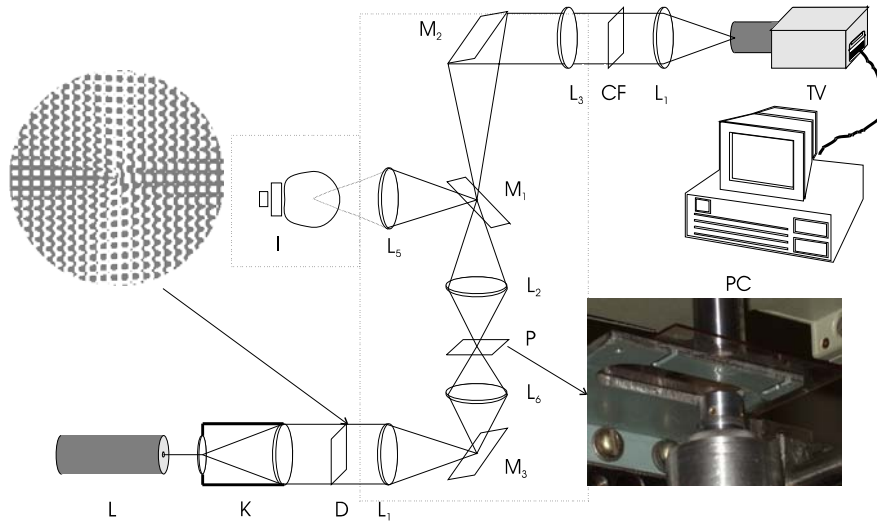


Рис.8 Экспериментальная оптическая схема: L = аргонный или твердотельный лазер, K = коллиматор, D = ДОО, L_1 = корректирующая линза, M_1 = полупрозрачное зеркало микроскопа, M_2 = поворотное зеркало, L_2 = микрообъектив, P = кювета с микрообъектами, L_3 = окуляр микроскопа, CF = красный светофильтр, TV = CCD-камера, L_4 = объектив CCD-камеры, L_5 = конденсор осветителя, и I = лампа осветителя.

Оптический вихрь формируется спиральной фазовой пластиной с пропусканием:

$$\tau(\varphi) = \exp(in\varphi), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (6)$$

где (r, φ) полярные координаты в плоскости $z=0$. В плоскости дифракции Фраунгофера он представляет собой световое кольцо. Картина дифракции Фраунгофера плоской волны на СФП формируется в фокальной плоскости сферической линзы с фокусным расстоянием f и описывается преобразованием Фурье:

$$E_n(\rho, \theta) = \frac{(-i)^{n+1} k}{f} \exp(in\theta) \int_0^R J_n\left(\frac{k}{f} r \rho\right) r dr = \frac{(-i)^{n+1} \exp(in\theta)}{(n+2)n!} \left(\frac{kR^2}{f}\right) \left(\frac{kR\rho}{2f}\right)^n {}_1F_2\left[\frac{n+2}{2}, \frac{n+4}{2}, n+1; -\left(\frac{kR\rho}{2f}\right)^2\right], \quad (7)$$

где (ρ, θ) полярные координаты в Фурье плоскости, $J_n(x)$ функция Бесселя n -го порядка, и ${}_1F_2(a, b, c; x)$ гипергеометрическая функция:

$${}_1F_2(a, b, c; x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(a)_m x^m}{(b)_m (c)_m m!}, \quad (8)$$

где $(a)_m = a(a+1)(a+2)\dots(a+m-1)$, $(a)_0 = 1$.

Впервые элемент с пропусканием (6) был предложен в работе Прохорова А.М., Сисакяна И.Н., Сойфера В.А. в 1984 году. Впервые изготовлен этот элемент был в работе Сойфера В.А., Котляра В.В. в 1992 году.

На рис.9а представлена фаза СФП с $n=3$. СФП была изготовлена с 32 уровнями квантования на высококонтрастном резисте XAR-N7220 прямой записью электронным пучком на литографе Leica LION LV1 с разрешением 5 мкм.

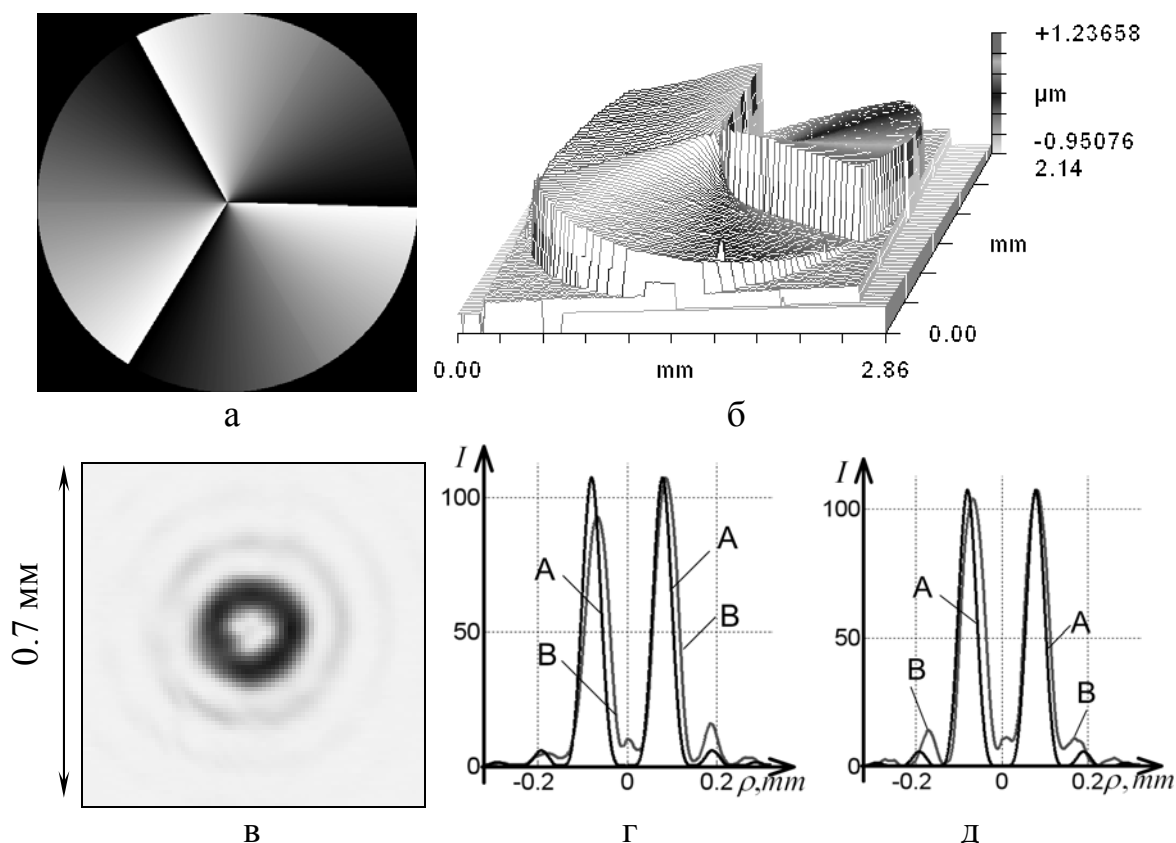


Рис. 9 Фаза СФП ($n=3$) (а), рельеф поверхности СФП (б) дифракция Фраунгофера (негатив) плоской волны радиуса 1.25 мм с длиной волны 0.633 мкм на СФП с $n=3$, формируется в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием 150 мм: (в) распределение интенсивности (негатив), и сечения интенсивности: (г) горизонтальное и (д) вертикальное (А- теория, В- эксперимент).

Показанный на рис. 9б рельеф поверхности СФП с $n=3$ и диаметром 2.5 мм получен на интерферометре Newview 5000 Zygo (200× увеличения). Отклонение рельефа СФП от идеальной непрерывной поверхности составило 4.3%. При этом отклонение сечений экспериментально сформированного пучка от расчетных сечений (рис.9г, 9д) составило около 15%, что доказывает необходимость максимально точного изготовления ДОЭ. Для эксперимента по вращению микрообъектов был использован четырех порядковый ДОЭ. Бинарная фаза этого ДОЭ, который формирует четыре оптических вихря, с номерами порядков ($\pm 3, \pm 7$) показана на рис.10а. Она представляет собой суперпозицию фазы СФП с $n=3$ и фазы СФП с $n=7$, закодированных разными несущими частотами. ДОЭ был изготовлен по методу электронной литографии. Центральная часть рельефа этого ДОЭ представлена на рис. 10б. Картины микрорельефа получены с помощью интерферометра NEWVIEW 5000 фирмы Zygo. Высота микрорельефа составила 1,1мкм. Диаметр ДОЭ составил 10мм. На рис.10в показано распределение интенсивности в зоне дифракции Фраунгофера.

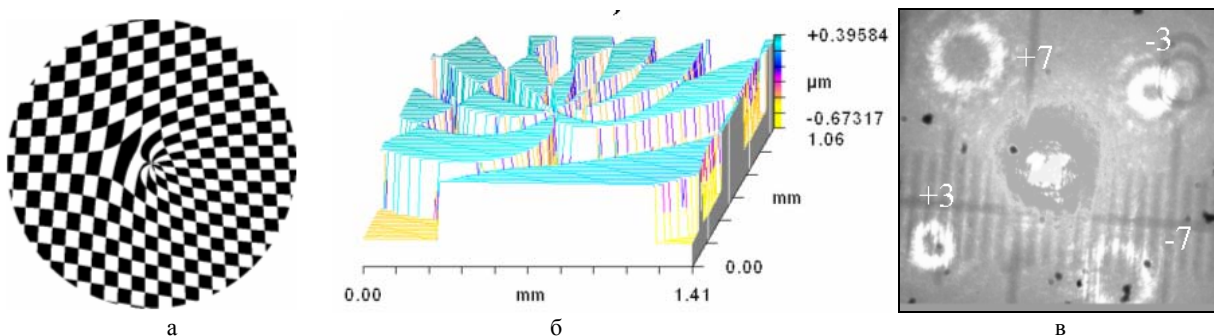


Рис.10 Фаза ДОЭ для формирования оптических вихрей-31, -30, 30, 31 порядков (а), фаза ДОЭ для формирования оптических вихрей -7, -3, 3, 7 порядков (г), представлены центральные части микрорельефа этих элементов соответственно (б, д), а также распределения интенсивности в картинах дифракции соответственно (в, ж)

Для этих пучков было проведено моделирование движения в них полистироловых шариков диаметром 5мкм. Для вихря 3-го порядка прогнозировалась средняя скорость 5мкм/с, для 7-го порядка 8мкм/с (получены в результате моделирования). Рис.11 показывает различные стадии движения полистироловых шариков, захваченных лазерным пучком в виде светового кольца. Световые пучки с оптическими вихрями одновременно захватывали и вращали группу шариков в разных порядках. Было захвачено по четыре шарика в оптические вихри 3-го и -3-го порядков, четыре шарика в оптическом вихре 7-го порядка и пять шариков в оптическом вихре -7-го порядка.

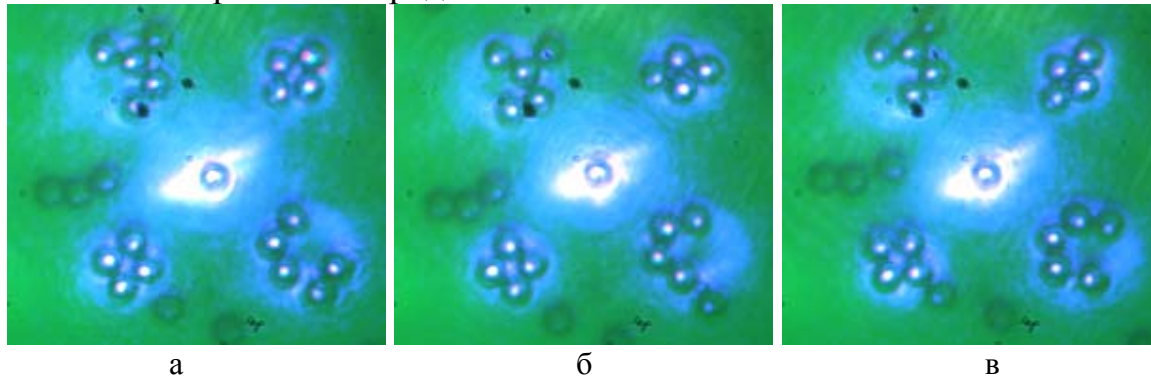


Рис.11 Захват и вращение группы шариков в оптических вихрях 3-го, -3-го и 7-го порядков, стадии движения показаны с интервалом в 5с.

Группы шариков вращались в разных порядках светового пучка с оптическими вихрями 3-го и 7-го порядков. При этом из рис.11 видно, что шарики в оптических вихрях разных знаков вращались в противоположных направлениях.

Согласно работе G. Mingwei, G. Chunqing, L. Zhifeng передаваемый микрообъекту орбитальный угловой момент светового поля может быть выражен формулой:

$$M = \frac{\lambda n P}{2\pi c} \eta_{abs} \quad (9)$$

где M - передаваемый момент, λ - длина волны, n – порядок (номер) сингулярности, P - мощность пучка, η_{abs} – коэффициент поглощения

микрообъекта. Для экспериментальной проверки этой формулы был изготовлен ДОЭ, формирующий набор из 4-х оптических вихрей (с номерами порядков -31, -30, 30, 31). Бинарная фаза этого ДОЭ представлена на рис.12а. На рис. 12г показано распределение интенсивности в зоне дифракции Фраунгофера.

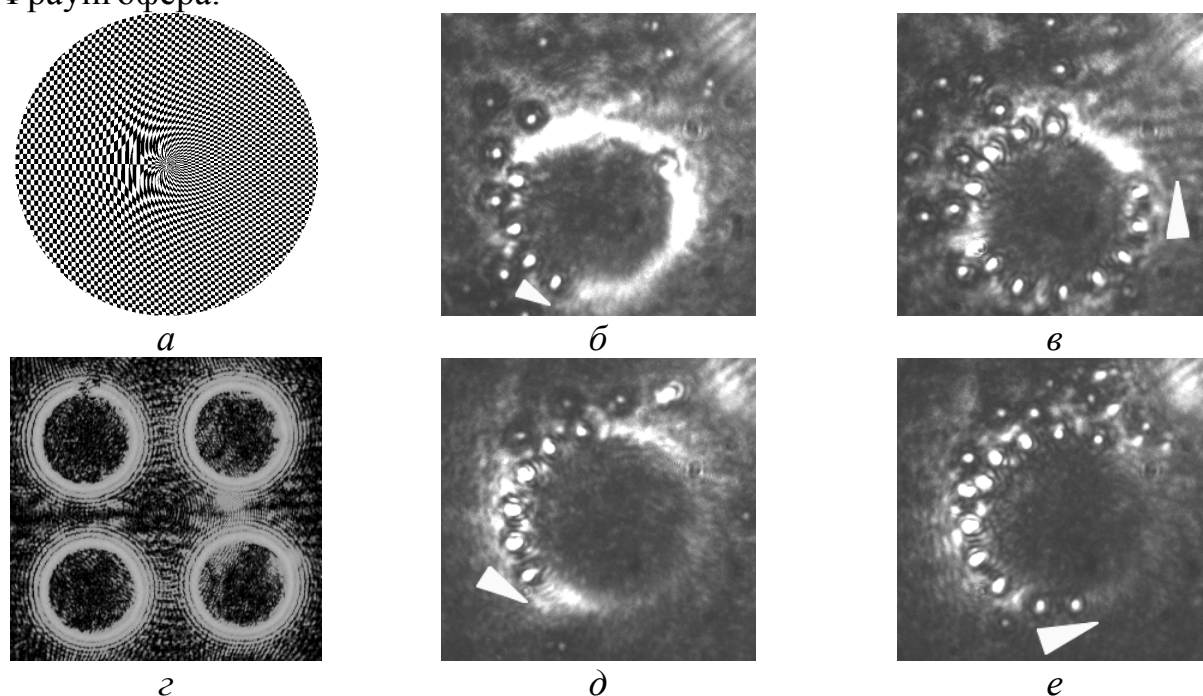


Рис.12 Различные стадии движения шариков в вихревых пучках, сформированных ДОЭ: (рис.4.21а)(а-г) оптический вихрь 30-го порядка, (д-и) оптический вихрь 31-го порядка.

Различные стадии движения шариков в оптическом вихре 30-го порядка через интервал в четырнадцать секунд представлены на рис.12(б,в). Точно такой же эксперимент был проведен для оптического вихря 31-го порядка, стадии движения представлены на рис. 12(д,е). Средняя скорость движения шариков была определена по методике, указанной выше.

На основании этих экспериментов была составлена таблица 2. Используя формулу (9) и считая, что для одной из экспериментально полученных значений скорости и расчетной скорости наблюдается полное соответствие ($n=3$) рассчитывается коэффициент поглощения шариков, а затем рассчитываются скорости шариков для других значений n .

Таблица 2. Сравнительные параметры экспериментов.

Порядок оптического вихря	Мощность пучка в рабочей плоскости (мВт)	Средняя интенсивность на самом ярком кольце (Вт/м^2) $\times 10^8$	Диаметр кольца (мкм)	Средняя скорость движения шариков (эксперимент), (мкм/с)	Средняя скорость движения шариков (расчет), (мкм/с)
3	50	3,2	9	4 ± 2	4
7	50	2,1	13	6 ± 2	6,2
30	40	0,9	27	14 ± 3	10,7
31	40	0,9	28	11 ± 3	11,4

Следует заметить, что при этом сложно учесть силу трения шариков о дно кюветы, которая возрастает с увеличением мощности пучка (из-за давления света в результате френелевского отражения от шариков). Как видно из таблицы 2 экспериментальные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами расчета в пределах погрешности эксперимента, за исключением $n=30$. Как и в случае с БП наиболее эффективно использовать для вращения микрообъектов оптические вихри высоких порядков.

Еще одна задача, рассматривавшаяся в четвертой главе: создание светового пучка, который бы мог эффективно вращать как прозрачные, так и непрозрачные микрообъекты. Известно, что при оптическом захвате в области фокуса, где градиент интенсивности максимальный, диэлектрические микрообъекты “втягиваются” в области с максимальной интенсивностью, а поглощающие микрообъекты, наоборот “выталкиваются” в область с минимальной интенсивностью. Поэтому, чтобы манипулировать микрообъектами обоих видов (поглощающими и прозрачными), в распределении интенсивности должны быть области с повышенной и пониженной интенсивностью. Единственной возможностью для формирования двойного светового кольца, диаметр которого много больше ширины кольца, это использование дифракционного оптического элемента (ДОЭ). Проще всего изготовить бинарный ДОЭ, имеющий всего два уровня рельефа. На рис. 13а. показана бинарная фазовая функция ДОЭ: белый цвет – фаза π , черный цвет – фаза 0. Функция пропускания ДОЭ, фаза которого показана на рис. 13а имеет вид:

$$T_{\text{ноа}}(r, \varphi) = \text{sign}[\cos S(r, \varphi)], \quad (10)$$

где

$$S(r, \varphi) = \begin{cases} \alpha_1 r + n\varphi + \beta r \cos \varphi, & r < R_1, \\ \alpha_2 r + n\varphi + \beta r \cos \varphi, & R_1 \leq r < R, \end{cases} \quad (11)$$

где α_1, α_2 – параметры двух аксиконов с одинаковыми номерами n , которые формируют два двойных кольца, β – пространственная несущая частота.

Знаковая функция равна: $\text{sign}(x) = \{1, x \geq 0; -1, x < 0\}$. Бинарный ДОЭ с пропусканием (10) будет формировать два двойных кольца с эффективностью около 40% каждый.

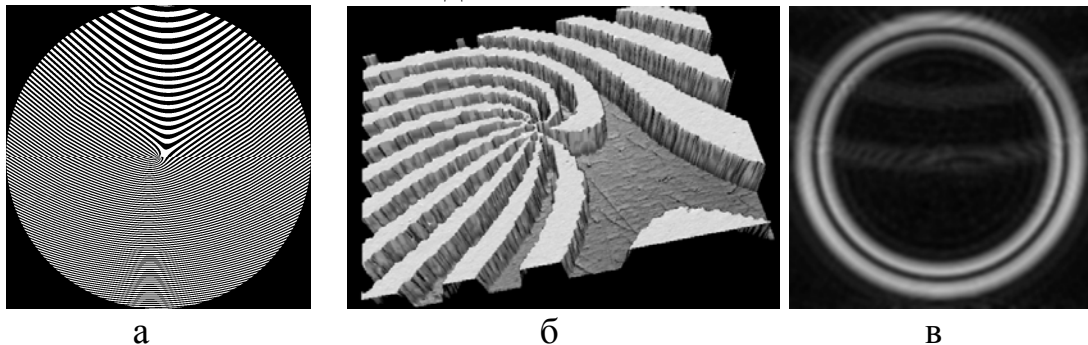


Рис. 13 Бинарная фаза составного ДОЭ, функция пропускания которого описывается уравнениями (7), (8) (а), центральная часть микрорельефа (б) и рассчитанная интенсивность картины дифракции Фраунгофера в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием $f = 100$ мм (в).

ДОЭ с фазой на рис. 13а был изготовлен по технологии оптической литографии, с помощью изготовления бинарного фотошаблона и жидкостного травления стеклянной подложки. На рис. 13б показан бинарный профиль центральной части ДОЭ (10) размером 260×350мкм, измеренный с помощью интерферометра NewView 5000 Zygo. На рис. 13в показана рассчитанная интенсивность в картине дифракции Фраунгофера при условии: $R = 2$ мм, $\lambda = 532$ нм, $f = 100$ мм. Показан только минус первый порядок дифракции. В эксперименте, по вращению микрообъектов в этом пучке, был использован твердотельный лазер с длиной волны 532нм и мощностью 500мВт. В этом эксперименте было очень важно минимизировать потери мощности пучка (из-за больших размеров световых колец). В целях минимизации потерь мощности при отражениях на преломляющих поверхностях пучок не расширялся коллиматором, а нужный размер достигался увеличением расстояния между лазером и первым поворотным зеркалом. Для увеличения интенсивности использовался микрообъектив 40× (водная иммерсия, фокусное расстояние 4,3мм). Полистироловые шарики захватывались световыми кольцами и двигались вдоль них с примерно постоянной скоростью. Различные стадии движения шариков через интервал в 5 секунд в двойном световом кольце представлены на рис.14.

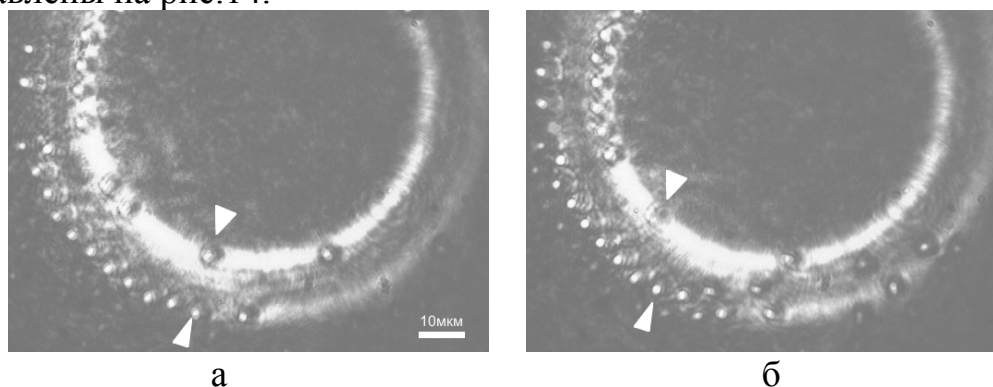


Рис.14 Различные стадии движения шариков в двойном световом кольце, сформированном составным аксиконом, фаза которого показана на рис.13а, стадии движения показаны через 5с.

Радиус внутреннего кольца составлял 37мкм, радиус внешнего кольца 48мкм. Как видно из рис.14, наблюдалось устойчивое движение шариков вдоль внутреннего светового кольца со средней скоростью около 3-4мкм/с и движение шариков вдоль внешнего светового кольца со скоростью 0,5-0,7мкм/с. Такая разница в скорости движения вызвана различными интенсивностями колец. Разница интенсивностей колец обусловлена тем, что ДОЭ освещался гауссовым пучком с радиусом меньшим радиуса ДОЭ (для уменьшения потерь при фокусировке). Результаты моделирования давали при этих параметрах скорость 7мкм/с для внутреннего кольца и 2мкм/с для внешнего кольца, что с учетом трудности при определении силы трения о дно кюветы, хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Таким образом, экспериментально показана возможность захвата и вращения

микрообъектов в двойном световом кольце, сформированном двойным аксиконом.

В Пятой Главе рассматривается формирование световых пучков с помощью динамического модулятора света и их использование в задаче манипулирования микрообъектами. В частности рассматривается формирование гипергеометрических (ГГ) мод и их распространение в пространстве. Гипергеометрические моды описываются формулой:

$$E_{\gamma,n}(r,\varphi,z)=\frac{1}{2\pi n!}\left(\frac{z_0}{z}\right)^{\frac{1}{2}}\Gamma\left(\frac{n+1+i\gamma}{2}\right)\exp\left[\frac{i\pi}{4}(-n+i\gamma-1)+\frac{i\gamma}{2}\ln\frac{z_0}{z}+in\varphi\right]x^{\frac{n}{2}}{}_1F_1\left(\frac{n+1+i\gamma}{2},n+1,ix\right), \quad (12)$$

где $-\infty < \gamma < \infty$, $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ непрерывный и дискретный параметры, от которых зависят функции (12) называются номерами моды; $z_0 = \frac{kw^2}{2}$ - аналог длины Релея, w - параметр моды, аналогичный радиусу гауссового пучка, хотя здесь он имеет другой смысл; $x = \frac{kr^2}{2z}$; $\Gamma(x)$ - гамма функция; ${}_1F_1(a,b,x)$ -

вырожденная или конфлюэнтная гипергеометрическая функция. ДОО формировался на пространственном модуляторе света (ПМС) CRL OPTO с разрешением 1280×1024 . Размер пиксела модулятора (микродисплея) 15 мкм. По данным производителя коэффициент отражения ПМС составляет 70%. Но кроме потерь на отражение, в указанном выше ПМС, существуют потери вызванные появлением большого количества дифракционных порядков. В результате дифракционная эффективность ПМС не превышает 10%. Поэтому, если не нужна динамика целесообразнее, использовать фазовые ДОО, изготовленные на оптической подложке.

При квадратичном радиальном кодировании бинарная фаза ДОО, который формировал ГГ-моду рассчитывалась по формуле

$$S(r,\varphi) = \text{sgn}\left\{\cos\left[\gamma \ln \frac{r}{w} + n\varphi + \frac{kr^2}{2f}\right]\right\} \quad (13)$$

где f - фокусное расстояние сферической линзы, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ волновое число

света с длиной волны λ , γ - параметр ГГ моды, r, φ - полярные координаты. Это значит, что из-за фактического добавления линзы, гипергеометрические моды формируются в сходящемся пучке. На рис.15 представлено распределение интенсивности на разных расстояниях от пространственного модулятора света.

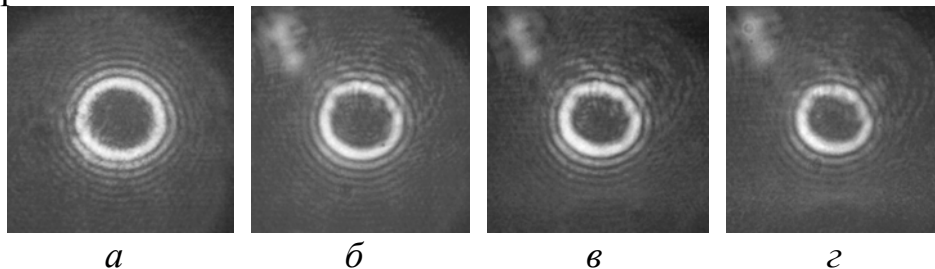


Рис.15 Распространение пучка $n=10, \gamma=1$ (а) 700 мм, (б) 725 мм, (в) 750 мм, (г) 775 мм.

Уменьшение размера гипергеометрической моды связано с тем, что фиксируемое изображение снималось в сходящемся пучке. Как видно из рис.15, структура пучка сохраняется, что доказывает его модовый характер. Т.к. структура пучка сохраняется при фокусировке, это означает, что данный пучок можно использовать наряду с пучками Бесселя в задачах вращения микрообъектов на разных плоскостях.

Также в пятой главе рассматривается контролируемое вращение шарика в световом пучке, который является суперпозицией двух пучков Бесселя, и который был также сформирован с помощью ПМС. Параметры этого пучка были подобраны так, чтобы его суммарный орбитальный момент был равен нулю.

Для суперпозиции мод Бесселя можно записать:

$$\Psi_{nm}(x,y) = \left[\sqrt{\pi} R J'_m(\gamma_n) \right]^{-1} J_m(k\alpha_n r) \exp(im\varphi), \quad (14)$$

где $\alpha_n = \cos \theta_n = \frac{\gamma_n}{kR}$, θ_n – угол наклона к оси z конической волны, $J_m(x)$, $J'_m(x)$ – функция Бесселя и ее производная, γ_n – корень функции Бесселя. Лазерный пучок, состоящий из мод Бесселя, будет вращаться на конечном расстоянии от исходной плоскости ($z=0$) при условии, что номера мод (n,m) , входящих в суперпозицию (14) будут удовлетворять соотношению:

$$B_1 = \frac{\alpha_n^2 - \alpha_{n'}^2}{m - m'} = \text{const}. \quad (15)$$

Число $B_1/2$ равно числу оборотов, которые совершает интенсивность в сечении пучка на расстоянии равном одной длине волны λ .

Подбором номеров (n,m) можно сформировать пучки Бесселя, обладающие вращением интенсивности в поперечном сечении ($B_1 \neq 0$), но имеющие нулевой орбитальный момент ($J_z = 0$).

При проведении экспериментов использовался жидкокристаллический ПМС CRL Opto SXGA H1 с разрешением 1280×1024 . На рис.16 показана фазовая картина, предназначенная для формирования светового поля представляющего собой суперпозицию двух мод Бесселя с номерами $C(\alpha_1, 3) = C(\alpha_2, -3) = 1$ ($\alpha_1 = 1.4 \times 10^{-4}$, $\alpha_2 = 7 \times 10^{-3}$). Размер области ПМС, в которой формировалась фазовая картина, составил 7×7 мм.

Распределения интенсивности в сечении одного из двух сформированных пучков, измеренные на разных расстояниях от микродисплея с помощью CCD камеры, показаны на рис.16. Как видно из рис.16, наблюдается качественное соответствие между экспериментальными и теоретическими данными.

С этим пучком был проведен эксперимент по управляемому вращению микрообъекта. Мощность пучка в плоскости фокусировки составила около 5 мВт, длина волны $\lambda = 0,532$ мкм.

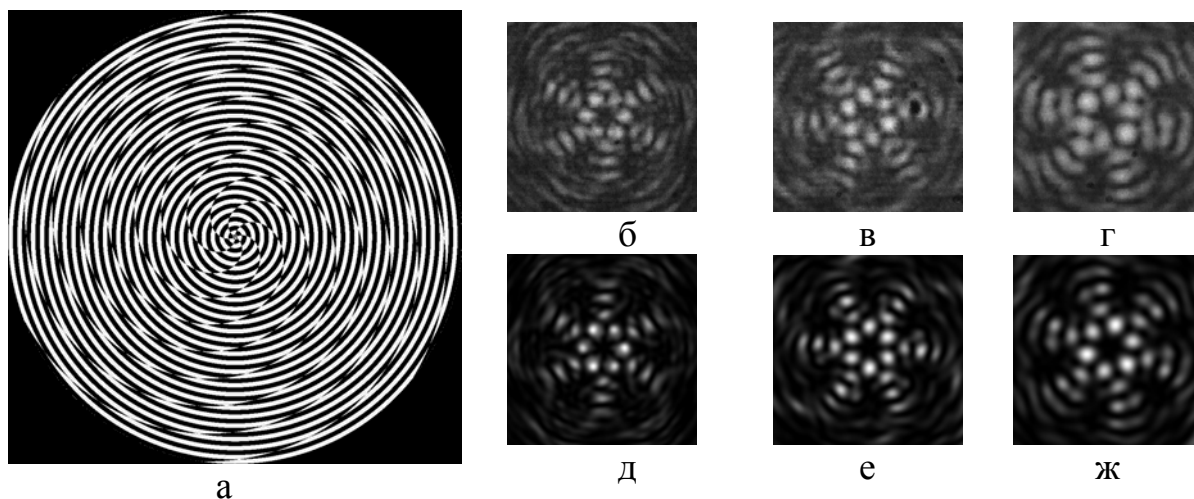


Рис.16 Бинарная фазовая картина, сформированная на микродисплее (а), картина дифракции вращающегося двухмодового пучка Бесселя на разных расстояниях от ПМС (б,в,г – эксперимент, д,е,ж – теория): $z=720$ мм (а,г); $z=735$ мм (б,д); $z=765$ мм (в,е).

На рис.17 представлены различные положения вращающегося пучка с нулевым орбитальным моментом с захваченным полистироловым шариком диаметром около 1мкм. Картины 16а, 16б сняты при разном положении фокусирующего микрообъектива (16х) от начальной плоскости: 0мм – (рис.16а), 0,2мм – (рис.16б). При смещении микрообъектива картинка поворачивается. Пунктирной линией отмечена середина пучка. По этой линии строится сечение пучка по рис.17б (рис.17в).

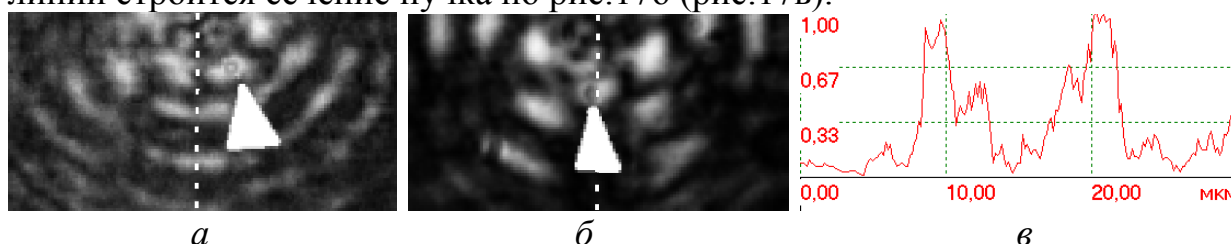


Рис.17 Вращающийся пучок с захваченным полистироловым микрошаром диаметром 1мкм, интервал между кадрами (а) и (б) – 10с, (в) сечение по пунктирной линии пучка (б).

Как видно из рис.17, захваченный в максимуме интенсивности микрошар поворачивается вслед за поворотом пучка. Из сечения пучка видно, что максимумы на рис.17б ориентированы вертикально. Наблюдается вращательное движение, несмотря на отсутствие орбитального углового момента у светового пучка. Этот эксперимент показывает, что с помощью ДОЭ и очень простой оптической схемы можно получить контролируемое вращение микрообъекта вместе с пучком. Обычно этот эффект достигается с помощью довольно сложных интерферометров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача вращения диэлектрических микрообъектов в вихревых радиально-симметричных лазерных пучках, сформированных дифракционными оптическими элементами, в том числе многопорядковыми.

Получены следующие основные результаты

1. Экспериментально исследованы картины дифракции Френеля и Фраунгофера, сформированные при прохождении плоской волны или гауссового пучка через спиральную фазовую пластинку с разными номерами сингулярности ($n=3,7,30,31$). СФП (1-, 4-, 8- порядковые), которые были изготовлены методом электронной литографии. В световых кольцах, сформированных с помощью этих СФП и твердотельного лазера, было зарегистрировано вращение нескольких полистироловых шариков диаметром 5 мкм.
2. Разработаны и исследованы оптические установки, включающие газовый (или твердотельный) лазер, микроскоп, телекамеру, освещающие микрообъекты против и по направлению силы тяжести, и предназначенные для захвата, вращения и линейного перемещения микрообъектов в жидкости, отличающиеся тем, что для одновременного формирования нескольких световых полей, обладающих разными орбитальными моментами, используются синтезированные методами компьютерной оптики дифракционные оптические элементы, изготовленные на прозрачных подложках по технологии электронной или оптической литографии.
3. С помощью линейно-поляризованного светового пучка аргонового лазера преобразованного многоуровневой фазовой спиральной зонной пластинкой в квази-бесселевый пучок 5-го порядка экспериментально осуществлено вращение в воде сферических полистироловых шариков.
4. Разработан расчета силы действия света и параметров движения под действием этой силы диэлектрических трехмерных микрообъектов заданной формы, основанный на геометрооптическом приближении, и использующий освещающие световые пучки с заданным амплитудно-фазовым распределением (в том числе вихревые пучки), и позволяющий моделировать движение микрообъектов в световых пучках.
5. С помощью бинарного вихревого аксикона с порядком сингулярности $n=10$, изготовленным с помощью оптической литографии на стеклянной подложке, твердотельного лазера было сформировано в Фурье-плоскости микрообъектива два световых кольца большого радиуса, в которых в воде одновременно вращались до 10 полистироловых шариков.
6. Осуществлено контролируемое вращение полистиролового шарика с помощью двухмодового вращающегося бесселевого пучка, сформированного жидкокристаллическим микродисплеем.
7. Экспериментально сформированы лазерные модовые гипергеометрические пучки, сформированные с помощью жидкокристаллического микродисплея и твердотельного лазера.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

Монографии

1. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Оптическая обработка информации с применением ДОО // Методы компьютерной оптики, М., Физматлит, глава 10, с. 597-683, 2000.

2. Soifer V.A., Kotlyar V.V., Khonina S.N., Skidanov R.V. Optical data processing using DOEs // *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*, Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc, chapter 10, p.673-754, 2002.
3. Soifer V.A., Kotlyar V.V., Khonina S.N., Skidanov R.V. Optical data processing using DOEs // *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*, Tianjin Science & Technology Press, Tianjin, (in Chinese), chapter 10, p.506-570, 2007.

Статьи и материалы конференций

4. Khonina S. N., Kotlyar V.V. Skidanov R.V., Soifer V. A. Levelling the intensity of the gaussian beam // *EOS Topical Meetings Digest Series "Diffractive Optics"*, (Jena, Germany, 23-25 August) - 1999. V. 22. pp.165-166.
5. Хонина С.Н., Котляр В.В., Соифер В.А., Скиданов Р.В., Лаакконен П., Турунен Я. Фазовые дифракционные оптические элементы для одновременного формирования мод Гаусса-Лагерра в различных дифракционных порядках // *Компьютерная оптика* - 1999, Вып.19, с. 107-111.
6. Khonina S. N., Skidanov R. V., Kotlyar V.V., Wang Y. Experimental selection of spatial Gauss-Laguerre modes // *Компьютерная оптика* – 1999. Вып.19. С. 115-117.
7. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Skidanov R.V., Soifer V.A., Laakkonen P., Turunen J., Wang Y. Experimental selection of spatial Gauss-Laguerre Modes // *Optical Memory & Neural Networks* – 2000. vol. 9, № 1, pp. 73-82.
8. Волков А.В., Скиданов Р.В. Численное исследование дифракции света на дифракционных линзах // *Вестник СГТУ* - 2000. вып. 9, с. 174-179.
9. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Skidanov R.V., Soifer V.A. Levelling the focal spot intensity of the focused Gaussian beam // *Journal of Modern Optics* – 2000. v.47, no.5 pp. 883-904.
10. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Skidanov R.V., Soifer V.A., Laakkonen P., Turunen J. Gauss-Laguerre modes with different indices in prescribed diffraction orders of a diffractive phase element // *Optical Communication* – 2000. v.175 pp.301-308.
11. Волков А.В., Котляр В.В., Моисеев О.Ю., Рыбаков О.Е., Скиданов Р.В., Соифер В.А., Хонина С.Н. Бинарный дифракционный оптический элемент для фокусировки гауссового пучка в продольный отрезок. *Оптика и спектроскопия* – 2000. т.89, вып.2, с.343-348.
12. Хонина С.Н., Котляр В.В., Скиданов Р.В. Бесконтактное прецизионное измерение линейных смещений с использованием ДОЭ, формирующих моды Бесселя // *Компьютерная оптика* – 2001. Вып. 21.
13. Котляр В.В., Налимов А.Г., Скиданов Р.В. Быстрый метод расчета дифракции электромагнитной волны на цилиндрических диэлектрических объектах // *Компьютерная оптика* - 2003, Вып. 25, с. 24-28.
14. Хонина С.Н., Котляр В.В., Скиданов Р.В. Фазовый дифракционный фильтр, предназначенный для анализа световых полей на выходе волокна со ступенчатым профилем показателя преломления // *Компьютерная оптика* - 2004, Вып. 25, с. 89-94.

15. Скиданов Р.В., Хонина С.Н. Влияние технологических ошибок и уширения линии излучения лазера на качество работы дифракционных оптических элементов // Оптический журнал - том 71, № 7, с.62-64.
16. Skidanov R.V., Khonina S.N. How processing errors and broadening of the emission line of a laser affect the operating quality of diffractive optical elements J. Opt. Technol. – 2004, v.71, No.7, 469-471.
17. Khonina S. N., Kotlyar V. V., Skidanov R. V., Soifer V. A., Jefimovs K., Simonen J., Turunen J. Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements // J. Mod. Opt. – 2004. v.51, N 14, p.2167-2184.
18. Khonina S.N., Skidanov R.V., Almazov A.A., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Volkov A.V. DOE for optical micromanipulation // Proceedings of SPIE-2004. v.5447, p.304-311.
19. Khonina S.N., Skidanov R.V., Kotlyar V.V., Soifer V.A. Rotating microobjects using a DOE-generated laser Bessel beam // Proceedings of SPIE- 2004. v.5456, p.244-255.
20. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Дифракционные оптические элементы для оптического манипулирования микрочастицами // Материалы международного форума по голографии Экспо-2004 – 2004. 19-22 октября, Москва, с.62-63.
21. Khonina S.N., Skidanov R.V., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Turunen J. DOE-generated laser beams with given orbital angular moment: application for micromanipulation // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 2005. 5962, 59622W, Optical Design and Engineering II, Jena, Germany.
22. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Оптическое микроманипулирование спомощью ДОО // Официальные материалы второго международного форума "Голография-ЭКСПО-2005" – 2005. 27-29 сентября, Москва, с.69-70.
23. Kotlyar V.V., Khonina S.N., Skidanov R.V., Soifer V.A. New DOE-generated invariant laser beams: application for microparticle manipulation // Proceedings of International Conference on Optics & Optoelectronics, 12-15 Dec. 2005, IRDE, Dehradun, India, IT-HDO-3.
24. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Вращение микрочастиц в световых полях // Компьютерная оптика – 2005. Вып. 28, с.5-17.
25. Котляр В.В., Налимов А.Г., Скиданов Р.В. Метод быстрого расчета дифракции лазерного излучения на микрообъектах // Оптический журнал – 2005. т.72, № 5, с.55-61.
26. Скиданов Р.В. Расчет силы взаимодействия светового пучка с микрочастицами произвольной формы // Компьютерная оптика - 2005, Вып.28, с.18-22.
27. Котляр В.В., Смирницкий А.В., Скиданов Р.В. Расчет и измерение поля дифракции плоской электромагнитной волны внутри и снаружи микрошара // Компьютерная оптика - 2005,с.95-104.
28. Котляр В.В., Ковалев А.А., Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Сойфер В.А., Турунен Я. Дифракция конической волны и гауссового пучка на спиральной фазовой пластинке // Компьютерная оптика – 2005. Вып.28, с.29-36.
29. Kotlyar V.V., Kovalev A.A., Khonina S.N., Skidanov R.V., Soifer V.A., Elfstrom H., Tossavainen N., and Turunen J. Diffraction of conic and

- Gaussian beams by a spiral phase plate // *Appl. Opt.* – 2006. Vol. 45, No.12, 2656-2665.
30. Khonina S. N., Skidanov R. V., Kotlyar V. V., Kovalev A. A., and Soifer V. A. Optical micromanipulation using DOEs matched with optical vortices // *Proc. SPIE* – 2006. v. 6187, p. 61871F.
 31. Soifer V. A., Kotlyar V. V., Khonina S. N., and Skidanov R. V. Remarkable laser beams formed by computer-generated optical elements: properties and applications // *Proc. SPIE* - 2006, v. 6252, p. 62521B.
 32. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Оптическая микроманипуляция с использованием многопорядковых ДОО // Официальные материалы научно-практической конференции “Голография в России и за рубежом. Наука и практика” - 2006, 26-28 сентября, Москва, с57-59.
 33. Skidanov R.V, Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A. Optical microparticle trapping and rotating using multi-order DOE // *Proc. Of the ICO Topical Meeting on Optoinformatics Information Photonics’ 2006* 4-7 Sep. 2006, Saint-Peterburg, Russia , pp. 466-468.
 34. Скиданов Р.В. Самовоспроизводящиеся лазерные пучки и их применение // *Компьютерная оптика* – 2006. Вып. 29, с. 4-23.
 35. Котляр В.В., Скиданов Р.В., Хонина С.Н., Балалаев С.А. Гипергеометрические моды // *Компьютерная оптика* – 2006. Вып. 30, с. 16-22.
 36. Скиданов Р.В., Котляр В.В., Хонина С.Н. Экспериментальное исследование передачи орбитального углового момента сферическим микрочастицам // *Известий СНЦ РАН* – 2006. № 4, с. 1200-1211.
 37. Kotlyar V. V., Skidanov R. V., Khonina S. N., and Soifer V. A. Hypergeometric modes // *Opt. Lett.* – 2007. Vol. 32, No. 7, April 1, p.742-744.
 38. Doskolovich L. L., Kazanskiy N. L., Khonina S. N., Skidanov R. V., N. Heikkilä N., S. Siitonen S., and Turunen J. Design and investigation of color separation diffraction gratings // *App. Opt.* – 2007. Vol. 46, n. 15, p.2825-2830.
 39. Скиданов Р.В., Хонина С.Н., Котляр В.В., Сойфер В.А. Экспериментальное исследование движения диэлектрических шариков в световых пучках с угловыми гармониками высоких порядков // *Компьютерная оптика* – 2007. Вып. 31, с. 14-21.
 40. Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Сойфер В.А. Вращение лазерных пучков, не обладающих орбитальным угловым моментом // *Компьютерная оптика* – 2007. Вып. 31, с. 35-38.
 41. Kotlyar V. V., Kovalev A. A., Skidanov R. V., Moiseev O.Y., and Soifer V. A. Diffraction of a finite-radius plane wave and a Gaussian beam by a helical axicon and a spiral phase plate // *J. Opt. Soc. Am. A* – 2007. Vol. 24, n. 7, p.1955-1964.
 42. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Дифракционные элементы как безопорные компьютерные голограммы // *Труды всероссийского семинара «Ю.И. Денисюк – основоположник оптической голографии», ФТИ РАН, С.Пб* – 2007, с. 116-123.
 43. Skidanov R.V., Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A. Optical micromanipulation using diffractive optical elements, Xian, Chine – 2007. p.168-180.

44. Skidanov R. V., Kotlyar V. V., Khonina V. V., Volkov A. V., and Soifer V. A. Micromanipulation in Higher-Order Bessel Beams // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) – 2007. v. 16, №. 2, p. 84.