На правах рукописи

Ганчевская София Владиславовна

ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОМАНИПУЛЯЦИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНЫХ АКСИКОНОВ

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Самара – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре технической кибернетики и в Институте систем обработки изображений РАН _ филиале Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской акалемии наук».

Научный руководитель:

Скиданов Роман Васильевич, доктор физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Ежов Евгений Григорьевич, доктор физико-математических наук, доцент; федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», профессор кафедры информационных систем и компьютерного моделирования;

Майорова Александра Михайловна, кандидат физико-математических наук; Самарский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования и автоматизации лазерных систем.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится 19 ноября 2019 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» и на официальном сайте по электронному адресу: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Ganchevskaja_S_V_Opticheskaja_mikromanipuljacija_na_osnove.pdf.

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.215.01 д.ф.-м.н., доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Разработка методов оптической манипуляции микрообъектами – одно из перспективных направлений развития лазерной физики и прикладной оптики. Оптические ловушки находят применение в микробиологии, физике коллоидов, атомной физике, микромеханике. Например, способность прикладывать силы порядка пиконьютонов к частицам микронного размера, одновременно измеряя смещение частицы с точностью до нанометров, применяется для изучения молекулярных двигателей (Mehta, A. D, 2018; Jeney, S, 2019), физики коллоидов и мезоскопических систем (Grier, D. G., 2017; Korda, P. T., 2002), механических свойств полимеров и биополимеров (Bustamante, C, 2003; Wang, M. D., 2011). Параллельно с широким использованием оптического захвата активно продолжается теоретическая и экспериментальная работа по фундаментальным аспектам оптического захвата (McGloin, D., 2018; Arlt J., 2017).

Первые эксперименты по оптической микроманипуляции датируются 1970 годом. А. Эшкин в серии экспериментальных работ продемонстрировал, что, используя оптические силы, можно захватывать и перемещать диэлектрические частицы в воде и в воздухе (Ashkin, A., 1970). Затем А. Эшкин, С.Чу и их коллеги из лаборатории Bell Labs (США) использовали оптическую ловушку для различных экспериментов: от охлаждения и захвата нейтральных атомов (Fallman, E., 1997) до манипуляции живыми бактериями и вирусами (Konig, K., 1996; Neuman, K. C., 2004).

Дифракционные аксиконы позволяют формировать световые ловушки для решения задач оптической микроманипуляции: ориентирования микрообъектов ряда в пространстве (Bretenaker, F., 1990); захвата частиц с малым показателем преломления и непрозрачных частиц можно формировать световые «бутылки» (Neale S. L., 2005) и кольцевые ловушки (Tanaka, Y., 2013; Kummel F., 2014) с использованием аксикона или генерировать пучки Бесселя высоких порядков для захвата атомов (Ahluwalia, B.P.S., 2006). Формирование группы световых ловушек для захвата прозрачных (van der Horst, А., 2008; Rodrigo, P. J., 2006) и непрозрачных микрообъектов (Порфирьев, А.П., 2012) является достаточно сложной задачей, особенно формирование близкого расположения ловушек (Singh, B.K., 2018; Коробцов, А.В., 2014). С помощью дифракционных оптических элементов, формирующих несколько мод Бесселя или Гаусса-Лагерра, можно сформировать набор световых ловушек, который будет определенным образом трансформироваться при перемещении в пространстве (Хонина, С.Н., 2000; Котляр, В.В., 2007). Однако эффективность формирования таких ловушек относительно невелика. В работе Котляра, В.В., 2007 эффективность формирования системы ловушек составляла, очевидно, не более 20%, поскольку большая часть мощности в пучках распределена по площади, намного превышающей площадь формируемых световых ловушек.

Существует ряд работ, в которых показана возможность формирования вихревого пучка в виде линии сложной формы для перемещения микрообъектов вдоль нее (Волостников, В.Г., 2015; Кишкин, С.А., 2017). Чаще всего распределение интенсивности в виде световой линии формируется либо вдоль оптической оси (Poffo, L. 2018; Xu, X., 2018), либо поперек оптической оси с наклоном волнового фронта (Guo, C.-S., 2010; Parlatan, U., 2019). Однако рассмотренные выше методы сложны в реализации.

Таким образом предложенные в диссертации гибридные аксиконы позволяют формировать световые ловушки для большого числа задач оптической микроманипуляции.

3

Степень разработанности темы

Формированию световых ловушек для задач оптической микроманипуляции посвящено множество работ зарубежных и отечественных авторов, таких как Fedotowsky, A., Xiudong Sun; B.A. Сойфер, L. Paterson; Bretenaker F., B.B. Котляр, Le Floch A.; Chang S., Lee S. S., C.H. Хонина, S.K. Mohanty; Ye Tian; N K Metzger, M Mazilu, L Kelemen, P Or-mos and K Dholakia; Hiroo Ukita; S. Maruo, K. Volke-Sepulveda и других.

Однако, необходимо подчеркнуть, что в работах вышеперечисленных авторов:

1. Не осуществлено формирование пучков Бесселя с меньшей погрешностью по сравнению с формированием пучка Бесселя, формирующегося с максимальной эффективностью оптимальным элементом с фазовой функцией $sign(J_n(\alpha r))exp(in\varphi)$.

2. Не рассматривалось формирование расположенных в заданных позициях световых ловушек для захвата группы прозрачных и непрозрачных микрообъектов.

3. Не рассмотрена возможность контролируемого поворота микрообъектов сложной формы за счет орбитального углового момента пучка с остановкой градиентными силами при расфокусировке пучка.

4. Не рассмотрена возможность создания световой ловушки с высокой энергетической эффективностью в виде световой линии поперёк оптической оси для сортировки микрообъектов.

Целью работы является разработка, моделирование и экспериментальное исследование гибридных аксиконов в задаче формирования световых ловушек для оптической микроманипуляции.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработка и исследование нового типа дифракционных оптических элементов – гибридных аксиконов, сочетающих свойства спиральных аксиконов и спиральных фазовых пластин.

2. Разработка метода формирования близкорасположенных световых ловушек для оптического захвата и перемещения микрообъектов.

3. Разработка и исследование метода формирования пучков Бесселя, основанного на использовании гибридных аксиконов.

4. Формирование световых ловушек для контролируемого поворота микрообъектов сложной формы с использованием гибридных аксиконов с несколькими топологическими зарядами.

5. Формирование световой ловушки с распределением интенсивности в виде линии для задач сортировки с использованием гибридных аксиконов.

Научная новизна

1. Дифракционные оптические элементы – гибридные аксиконы, структура которых основана на многоуровневом спиральном аксиконе. Каждый уровень квантования спирального аксикона заменяется на фазовую функцию соответствующей спиральной фазовой пластины.

2. Метод формирования световых ловушек в виде минимумов и максимумов интенсивности, расположенных на расстоянии, сопоставимом с дифракционным пределом. Ловушки образуются за счет интерференции нескольких вихревых пучков формируемых гибридным аксиконом с эффективностью около 40%.

3. Метод формирования пучков Бесселя, основанный на использовании гибридных аксиконов. Показано, что топологический заряд пучка Бесселя складывается из зарядов

структуры и зон аксикона, что позволяет формировать пучки Бесселя разными по структуре гибридными аксиконами и дает возможность формировать пучки Бесселя с меньшей погрешностью, чем оптимальный по дифракционной эффективности элемент.

4. Метод контролируемого поворота микротурбины с использованием гибридных аксиконов, формирующих световые пучки с почти равномерным распределением интенсивности по полярному углу в дальней зоне дифракции и менее равномерным в ближней зоне дифракции. Таким образом, поворот микротурбины происходит за счет орбитального углового момента пучка, а остановка микротурбины – градиентными силами в расфокусированном пучке.

5. Предложен метод формирования световой ловушки с распределением интенсивности в виде световой линии с разной силой захвата по разным направлениям смещения. Отношение силы захвата при перемещении микрообъекта поперек линии к силе захвата при перемещении микрообъекта вдоль линии составляет 3,65.

Методы исследований

В диссертационной работе используются методы математического моделирования и натурного эксперимента. Для моделирования распределений интенсивности используются интегральные преобразования Френеля и Фурье.

Теоретическая значимость заключается в применении разработанного в рамках работы метода формирования пучков Бесселя гибридными аксиконами.

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанные световые ловушки позволят более эффективно решать следующие задачи: захват группы микрообъектов, расположенных на расстоянии, сопоставимым с дифракционным пределом; сортировка микрообъектов на основе использования линейной анизотропной ловушки; контролируемый поворот микромеханических систем вихревыми пучками, распределенными по площади микрообъекта.

На защиту выносятся:

1. Гибридные аксиконы, основанные на многоуровневом спиральном аксиконе, каждый уровень квантования которого заменяется на фазовую функцию соответствующей спиральной фазовой пластины, формируют вихревые пучки, содержащие совокупность топологических зарядов от спиральных фазовых пластин и топологический заряд от исходного спирального аксикона.

2. Гибридные аксиконы позволяют формировать световые ловушки в виде минимумов и максимумов интенсивности с дифракционной эффективностью около 40%, расположенных на расстоянии, сопоставимом с дифракционным пределом, за счет интерференции нескольких вихревых пучков.

3. Гибридные аксиконы позволяют формировать пучки Бесселя с топологическим зарядом, который складывается из топологических зарядов от спиральных фазовых пластин и топологического заряда от исходного спирального аксикона, и за счет выбора сочетания топологических зарядов позволяют формировать пучки Бесселя с меньшей погрешностью, чем при использовании оптимального по дифракционной эффективности элемента.

4. Гибридные аксиконы реализуют возможность контролируемого поворота микротурбины за счет формирования световых пучков с почти равномерным распределением интенсивности по полярному углу в дальней зоне дифракции и менее равномерным в ближней зоне дифракции. Контролируемый поворот микротурбины

5

осуществляется за счет орбитального углового момента пучка, а остановка микротурбины – градиентными силами при небольшой расфокусировке пучка.

5. Гибридный аксикон с топологическими зарядами 2, 0, -2 формирует линейную световую ловушку с разной силой захвата по разным направлениям смещения и шириной линии на 30% меньше ширины пятна Эйри. Отношение силы захвата при перемещении микрообъекта поперек линии к силе захвата при перемещении микрообъекта вдоль линии составляет 3,65.

Достоверность результатов работы проведенного исследования обеспечивается результатами численного моделирования, натурных экспериментов. Результаты были представлены на международных и всероссийских конференциях.

Апробация материалов научно-квалификационной работы проводилась на следующих научно-технических конференциях: 11-я Международной конференции «ГОЛОЭКСПО – 2014», 16-17 сентября 2014 г., г. Сочи; XIII Международной конференции "Оптические технологии в телекоммуникациях», 16-18 ноября 2015 г., r. Y da: International Symposium "Fundamentals of Laser Assisted Micro – and Nanotechnologies" (FLAMN-16), 30 июня-2 июля 2016 г., г. Санкт-Петербург; Международная научная конференция «Оптика и биофотоника IV» (Saratov Fall Meeting), 19-21 октября 2017 г., г. Саратов; ХХХ Школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике 2-6 октября 2017 г., г. Калининград; 6-я Международная конференция по сингулярной оптике: «Цифровая сингулярная оптика: основы и приложения», 17-21 сентября 2018 года, Севастополь; IV Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» 24-27 апреля 2018 г., г. Самара; XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, г. Самара, 13-17 ноября 2018.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 13 статей в научных журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Личный вклад автора

Изложенные в диссертации оригинальные результаты получены соискателем, либо при его непосредственном участии. Соискателем самостоятельно проводились вычислительные и натурные эксперименты, разрабатывались методы и математические модели. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав основного текста, заключения, списка литературы. Работа изложена на 117 страницах машинописного текста, включающего 62 рисунка, 3 таблицы, список литературы из 152 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы научно-квалификационной работы, приведён обзор существующих работ, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы и их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В первой главе предложен новый тип дифракционных оптических элементов – гибридные аксиконы, в каждом периоде которых присутствуют зоны с полным набором топологических зарядов.

Фазовая функция гибридного аксикона описывается формулой:

$$\tau(r,\varphi) = \sum_{m} \delta_{km} \exp[iC_{m}(\varphi + \varphi_{0})]$$

$$k = \left[\frac{2\pi r v + n\varphi}{2\pi} \cdot M\right]$$
(1.1)

где m – номер дополнительной вихревой составляющей; r, φ – полярные координаты; φ_0 – сдвиг фазы в зоне; v – пространственная несущая частота; n – топологический заряд бинарного дифракционного аксикона, который является основой структуры ДОЭ и определяет форму зон; δ – символ Кронекера; M – количество уровней квантования; C_m – топологический заряд в m-ой зоне; [] – целая часть вещественного числа.

Сочетая вихревые пучки с разными топологическими зарядами, можно получить практически любое распределение интенсивности (рисунок 1).



Рисунок 1 – Фазовая функция гибридного аксикона с n = 0, m₁ = 1, m₂ = -1, m₃ = -3 (a), распределение интенсивности при дифракции на гибридном аксиконе (б), фаза пучка (в), фазовая функция гибридного аксикона для формирования суперпозиции пучков 2-го, 2-го, 2го, 2-го порядков со смещением на четверть периода, топологический заряд структуры 1(г), распределение интенсивности в ближней зоне дифракции (д), фаза пучка (е), фазовая функция гибридного аксикона для формирования суперпозиции пучков 1-го, -1-го, 2-го, -2-го, 3-го, -3го, 4-го, -4-го порядков (ж), распределение интенсивности (з), фаза пучка (и)

На рисунке 1а представлена фазовая функция гибридного аксикона, который формирует распределение интенсивности (рисунок 1б), характеризующееся малой шириной по одной из координат. На рисунке 1г представлена фазовая функция

гибридного аксикона, формирующего световую ловушку в форме четырёхлопастной турбины (рисунок 1д). На рисунке 1ж представлена фаза гибридного аксикона, формирующего прямоугольную световую ловушку (рисунок 1з).

Также в Первой главе разработан алгоритм расчета фазовых функций гибридных аксиконов, которые образуют заданную конфигурацию световых ловушек за счет формирования суперпозиции вихревых пучков.

В качестве функции невязки используется линейная комбинация СКО и разности первых моментов распределения интенсивности формируемого и эталонного изображений по относительному радиусу г (г меняется в пределах от 0 до 1 от оптической оси к краю изображения):

$$\delta_1 = k_1 \delta + k_2 m, \tag{1.2}$$

где значения весовых коэффициентов k_1 , k_2 подбирались эмпирическим путём (k_1 =0,8, k_2 =0,2). Значение m определялось по формуле:

$$m = \frac{\int_{0}^{R} rI(\mathbf{r}) \,\mathrm{d}\mathbf{r}}{\int_{0}^{R} I(\mathbf{r}) \,\mathrm{d}\mathbf{r}},$$
(1.6)

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – радиальная полярная координата в плоскости изображения. Необходимо отметить, что эталонное распределение интенсивности должно располагаться в центральной области изображения.

СКО рассчитывается только в областях, в которых необходимо сформировать световую ловушку. Для предотвращения попадания алгоритма в локальный минимум, алгоритм последовательно начинает итерации в нескольких начальных точках с последующим сравнением найденных решений.

Задав координаты минимумов, можно получить световую ловушку для непрозрачных микрообъектов с заданным числом и положением минимумов (рисунок 2).



Рисунок 2 – Распределение, сформированные гибридным аксиконом с топологическими зарядами m₁ = 3, m₂ = 1, m₃ = 1, m₄ = 1 (одиночная ловушка) (а), распределение, сформированные гибридным аксиконом с топологическими зарядами m₁ = 2, m₂ = 0, m₃ = 2 (двойная ловушка) (б), распределение, сформированное гибридным аксиконом с топологическими зарядами m₁ = 1, m₂ = 3, m₃ = 7, m₄ = 13 (тройная ловушка) (в), распределение, сформированное гибридным аксиконом с топологическими зарядами m₁ = 5, m₂ = 5, m₃ = 2, m₄ = 2, угол поворота зон 180° (четырехкратная ловушка) (г), распределение, сформированное гибридным аксиконом с топологическими зарядами m₁=6, m₂=2, m₃=6 (пятикратная ловушка) (д)

Таким образом, можно найти практически любую конфигурацию ловушек, задав координаты одного или нескольких минимумов интенсивности, и получить инструмент для захвата группы микрочастиц.

Во второй главе рассматривается метод формирования вихревых пучков на основе сложения топологических зарядов на примере пучков Бесселя.

Элементы формируют пучки, похожие по распределению интенсивности на пучки Бесселя. Исследование формирования пучков Бесселя проводилось на отрезке от 0,3 м до 0,4 м. В таблице 1 приведены значения полученных ошибок формирования пучка Бесселя 5-го порядка разными гибридными аксиконами и элементом Fedotowsky, формирующим пучок Бесселя с максимальной эффективностью.

r, м	n=0; m=5	n=1; m=4	n=2; m=3	n=3; m=2	n=4; m=1	n=5; m=0	n=6; m=-1	n=7; m=-2	5 пор.
0,3	0,008	0,020	0,012	0,036	0,006	0,024	0,002	0,011	0,006
0,33	0,002	0,012	0,017	0,015	0,013	0,001	0,006	0,004	0,037
0,35	0,044	0,045	0,057	0,050	0,033	0,030	0,047	0,018	0,022
0,38	0,005	0,022	0,008	0,027	0,009	0,021	0,011	0,007	0,027
0,4	0,016	0,003	0,009	0,002	0,019	0,017	0,031	0,002	0,020
<δ>	0,015	0,020	0,021	0,026	0,016	0,019	0,019	0,008	0,023

Таблица 1 – СКО формирования пучка Бесселя 5-го порядка разными гибридными аксиконами на отрезке от 0.3м до 0.4м

Как видно из таблицы 1, при формировании пучка Бесселя 5-го порядка гибридные аксиконы позволяют получить меньшую погрешность ($<\delta>$ до 0,008), чем элемент Fedotowsky формирует пучок с большей погрешностью ($<\delta>=0,023$).

Распределения фазы элементов, рассчитанные по формуле (1.3), были сформированы на модуляторе Holoeye Pluto VIS. На рисунке 3 представлены распределения интенсивности в пучке Бесселя 5-го порядка, сформированном гибридным аксиконом с n=5, m=0 (a), n=2, m=3 (б).



Рисунок 3 – Распределения интенсивности в пучке Бесселя 5-го порядка, полученные при моделировании (а,в) и в результате натурного эксперимента на расстоянии 0,7 м от модулятора (б,г)

Методом вычислительного и натурного экспериментов показана возможность формирования пучков Бесселя гибридными аксиконами.

В третьей главе рассматривается метод изготовления микротурбин на основе засветки ультрафиолетовым пучком толстослойного фоторезиста AZ6632, представлены результаты эксперимента по контролируемому повороту изготовленных микротурбин с помощью некольцевых вихревых пучков с практически равномерным распределением интенсивности по полярному углу.

Для формирования фотошаблона использовалось 28 типов микротурбин диаметром 40-100 мкм и разным количеством лопастей (5,10,15). Общее количество микротурбин на

подложке составило более 10000 (рисунок 4в). Сформированное изображение использовалось в качестве шаблона для процедуры прямой лазерной записи по фоторезисту. На рисунке 4 представлены изображения микротурбин, полученные с разным увеличением на электронном растровом микроскопе Supra.



Рисунок 4 – Изображения микрорельефа с микротурбинами, полученного на электронном растровом микроскопе Supra

На рисунке 5 представлена реконструкция формы пятилопастной микротурбины диаметром 100 мкм.



Рисунок 5 – Формирование микротурбин методом прямой лазерной записи по фоторезисту: изображение микротурбины диаметром 100 мкм, полученное на электронном растровом микроскопе Supra (а), реконструкция формы пятилопастной микротурбины, полученнная на интерферометре New View Zygo 5000 (б)

Высота микротурбин составляет 8.9 мкм при толщине слоя фоторезиста 9 мкм. Толщина фоторезиста подбиралась из условия оптимального наклона для лопаток микротурбины от 4° по краю микротурбины до 20° возле центрального диска.

Для контролируемого поворота микротурбин использовался рассчитанный пучок, удовлетворяющий условию равномерности распределения интенсивности по полярному углу. На рисунке 6 представлен гибридный аксикон, формирующий изображение с практически равномерным распределением интенсивности.



Рисунок 6 – Фазовая функция гибридного аксикона с топологическими зарядами 25, 10, 25 (a), распределение интенсивности пучка в дальней зоне дифракции (б), фаза пучка (в)

Для пучка, представленного на рисунке 66, выполняется условие (3.1). На рисунке 7 представлен график распределения величины I_s в зависимости от полярного угла.



Рисунок 7 – Распределения суммарной интенсивности сфокусированного (а) и расфокусированного пучка по полярному углу (б)

Относительно отклонение значения I_s от среднего значения для пучка на рисунке 7а не превышает 0,1. В пучке на рисунке 7б наблюдается 15 максимумов интенсивности, которые обеспечивают остановку микротурбины с дискретностью 24°.

На рисунке 8 показан поворот микротурбины диаметром 100 мкм сфокусированным световым пучком, рассчитанным для контролируемого поворота микротурбин (рисунок 6б).



Рисунок 8 – Стадии движения полимерной микротурбины с интервалом 2с

Средняя скорость поворота микротурбины составила 0,067 с⁻¹. При этом четко наблюдается моменты торможения поворота микротурбины в точках максимумов и остановка при небольшой расфокусировке пучка. Средний момент вращательных сил, действующих на микротурбину равен 3,76 фН·м, а суммарная сила, действующей со стороны светового пучка на микротурбину – около 75 пкН. Угол поворота микротурбины составил 48°.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию световых пучков, сформированных гибридными аксиконами и полученными в 1 главе.

На рисунке 10 показаны фазовая функция гибридного аксикона (рисунок 10а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (рисунок 10б), фаза пучка (рисунок 10в).



Рисунок 10 – Фазовая функция гибридного аксикона (а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б), фаза пучка (в)

Рассмотрим сечения распределения интенсивности по горизонтальной и вертикальной координатам (рисунок 11).



Рисунок 11 – Сечение распределения интенсивности по горизонтальной (а) и вертикальной (б) координате, центральные сечения распределений интенсивности пучка с n = 2, m1 = 0, m2 = -2 (красная линия) и картины Эйри (черная линия)

Ширина линии по полуспаду по горизонтальной координате уже, чем по вертикальной координате и на 30% меньше ширины пятна Эйри. Сила захвата микрообъекта, который будет двигаться вдоль горизонтальной оси больше, чем сила захвата объекта, который будет двигаться в перпендикулярном направлении. Расчетное отношение этих сил 3,7.

На рисунке 12 представлены различные стадии процесса перемещения полистироловой частицы диаметром 5 мкм, снятые с интервалом 2с.



Рисунок 12 – Стадии процесса микроманипуляции полистироловой микрочастицы, снятые с интервалом 2 с

Скорость отрыва частицы по горизонтальной координате составила 14,6 мкм/с, по вертикальной – 4 мкм/с. Отношение силы захвата при перемещении по горизонтальной координате к силе захвата по вертикальной координате составляет 3,65.

С помощью алгоритма, рассмотренного в 1 главе, рассчитаны фазовые функции, на основе которых изготавливались гибридные аксиконы. На рисунке 13 представлены световые ловушки, сформированные гибридными аксиконами с топологическими зарядами n=0, $m_1 = 7$, $m_2 = -5$, $m_3 = 7$, $m_4 = 7$ (рисунок 13а) и n=0, $m_1 = 6$, $m_2 = 6$, $m_3 = 2$ соответственно (рисунок 13б).



Рисунок 13 – Световые ловушки, сформированные гибридными аксиконами с топологическими зарядами $n = 0, m_1 = 7, m_2 = -5, m_3 = 7, m_4 = 7$ (a), $n = 0, m_1 = 6, m_2 = 6, m_3 = 2$ (б)

На рисунке 14 показаны различные стадии процесса перемещения полистироловых частиц в пучке, представленном на рисунке 136. При разной фокусировке микрочастицы полистирола попадают в области, соответствующие разному топологическому заряду, и поворачиваются на фиксированный угол до попадания в ближайший максимум.



Рисунок 14 - Стадии поворота полистироловых микрочастиц с интервалом 2 с

В результате натурного эксперимента был осуществлен захват частиц полистирола и инициирован поворот группы частиц за счет фокусировки и расфокусировки светового пучка.

На рисунке 15 показаны различные стадии процесса перемещения полистироловых частиц по кольцу, снятые с интервалом 2 с.



Рисунок 15 - Стадии перемещения полистироловых микрочастиц с интервалом 2 с

Несмотря на некольцевую природу пучка, частицы движутся по кругу за счет ненулевого орбитального момента.

В настоящей диссертации разработаны и экспериментально исследованы гибридные аксиконы в задаче формирования световых ловушек для оптической микроманипуляции: оптического захвата, перемещения и контролируемого поворота микрообъектов. Разработаны и исследованы метод формирования близкорасположенных световых ловушек и метод формирования пучков Бесселя с помощью гибридных аксиконов. Основными результатами работы являются:

1. Предложен и исследован новый тип дифракционных оптических элементов – гибридные аксиконы. Структура гибридного аксикона основана на многоуровневом спиральном аксиконе, каждый уровень квантования которого заменяется на фазовую функцию соответствующей спиральной фазовой пластины. Гибридный аксикон формирует вихревой пучок, который содержит совокупность топологических зарядов от спиральных фазовых пластин и топологический заряд от исходного спирального аксикона.

2. Предложен метод формирования световых ловушек в виде минимумов и максимумов интенсивности, расположенных на расстоянии, сопоставимом с дифракционным пределом, основанный на формировании гибридным аксиконом суперпозиции нескольких вихревых пучков. Для заранее заданного расположения световых ловушек можно подобрать такое сочетание топологических зарядов вихревых пучков, формируемых гибридным аксиконом, которое образует нужную конфигурацию световых ловушек с дифракционной эффективностью 40%.

3. Разработан и исследован новый метод формирования пучков Бесселя, основанный на использовании гибридных аксиконов. Показано, что топологический заряд пучка Бесселя складывается из топологических зарядов от спиральных фазовых пластин и топологического заряда от исходного спирального аксикона. Выбор сочетания топологических зарядов позволяет сформировать пучок Бесселя 5 порядка с погрешностью в 2,9 раза меньше, чем при формировании пучка Бесселя оптимальным по дифракционной эффективности элементом.

4. Предложен и экспериментально реализован метод контролируемого поворота микротурбины с использованием гибридных аксиконов, формирующих световые пучки с почти равномерным распределением интенсивности по полярному углу в дальней зоне дифракции и менее равномерным в ближней зоне дифракции. Контролируемый поворот микротурбины происходит за счет орбитального углового момента пучка, а остановка микротурбины – градиентными силами при небольшой расфокусировки пучка. Скорость поворота микротурбины рассчитанным пучком составила 0,067 с-1. Момент вращательных сил, действующих на микротурбину, равен 3,76 фН⋅м, а суммарная сила, действующая со стороны светового пучка на микротурбину – около 75 пкН. Угол поворота микротурбины рассчитанным пучком составила 48°.

5. Предложен метод формирования световой ловушки с распределением интенсивности в виде световой линии для разной силы захвата по разным направлениям смещения гибридным аксиконом с топологическими зарядами 2, 0, -2. Ширина линии по полуспаду по горизонтальной координате на 30% уже, чем ширина картины Эйри для плоской волны. Экспериментально доказано, что отношение силы захвата при перемещении микрообъекта поперек световой линии к силе захвата при перемещении микрообъекта вдоль световой линии составляет 3,65. Рассчитанная световая ловушка в виде линии может использоваться для сортировки микрообъектов.

14

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК и журналах, реферируемых Scopus, WoS

1. Скиданов, Р.В. Формирование микротурбин методом прямой лазерной записи по фоторезисту / Р.В. Скиданов, О.Ю. Моисеев, **С.В. Ганчевская** // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 63, № 6. – С. 862-865.

2. Skidanov, R.V. Vortex lenses for optical micromanipulation / R.V. Skidanov, S.V. Ganchevskaya // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2017. – Vol. 10337. – P. 103370R.

3. Ganchevskaya, S.V. Vortex axicons for hypergeometric beams formation / S.V. Ganchevskaya, R.V. Skidanov // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 135-140.

4. Ganchevskaya, S.V. A technique for optimizing the structure of an optical trap to rotate multiple microobjects / S.V. Ganchevskaya, R.V. Skidanov // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2016. – Vol. 25, , No. 3. – P. 160-167.

5. Ganchevskaya, S.V. The microturbine rotation by not circular light beam formed by vortex axicon / S.V. Ganchevskaya, R.V. Skidanov // CEUR Workshop Proceedings . – 2016. – Vol. 1638. – P. 24-31.

6. Скиданов, Р.В. Алгоритм расчёта ДОЭ для формирования заданной конфигурации световых ловушек / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 181-186.

7. Скиданов, Р.В. Вихревые дифракционные линзы для формирования вихревых световых пучков / Р.В. Скиданов, **С.В. Ганчевская** // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 674-677.

8. **Ganchevskaya, S.V.** Diffractive optical elements for capturing and controlled rotation of microobjects / **S.V. Ganchevskaya,** R.V. Skidanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2015. – Vol. 1490. – P. 53-60.

9. Скиданов, Р.В. Формирование пучков Бесселя вихревыми аксиконами / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 463-468.

10. Скиданов, Р.В. Дифракционные оптические элементы для формирования комбинаций вихревых пучков в задаче манипулирования микрообъектами / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 65-71.

11. Скиданов, Р.В. Манипуляция микрообъектами с помощью линейных ловушек, формируемых вихревыми аксиконами / / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 717-721.

12. Porfirev, A.P. Various superpositions of Bessel beams for capture and controlled rotation of microobjects / Porfirev, A.P., Morozov, A.A., Rykov, M.A., **Ganchevskaya, S.V.**, Skidanov, R.V. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2014. – Vol. 9164. – P. 91643D.

13. Ганчевская, С.В. Сложение топологических зарядов в гипергеометрических пучках / С.В. Ганчевская, Р.В. Скиданов // Краткие сообщения по физике. – 2019. – Т. 4. – С. 3-8.

Патенты Российской Федерации

14. Патент на изобретение 2601391 Российская Федерация, Способ изготовления дифракционных оптических элементов. **Ганчевская С.В**, Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Полетаев С.Д., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем обработки изображений Российской академии наук (ИСОИ РАН). Заявл. 28.11.2014, опубл. 10.10.2016.

Публикации в прочих изданиях

15. Ганчевская С.В., Скиданов Р.В. Вращение микромеханических элементов в оптимизированных световых пучках на основе суперпозиций оптических вихрей // Голография. Наука и практика: тезисы докладов XIII международной конференции. / Издво МГТУ имени Н.Э.Баумана. 2016. С. 355-358.

16. Ганчевская С.В. Вихревые аксиконы с логарифмическим расположением зон // В сборнике: XV Всероссийский молодежный Самарский конкурс – конференция научных работ по оптике и лазерной физике Сборник трудов конференции. Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. 2017. С. 79-83.

17. Ганчевская С.В., Скиданов Р.В., Васильев В.С. Передаваемый момент вращения в пучках Бесселя, формируемых разными вихревыми аксиконами // В сборнике трудов ИТНТ-2019. 2019. С. 137-141.