



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G02B 21/32 (2023.08)

(21)(22) Заявка: 2023123112, 06.09.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.09.2023

Дата регистрации:
21.11.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 06.09.2023

(45) Опубликовано: 21.11.2023 Бюл. № 33

Адрес для переписки:
660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50,
ФИЦ КНЦ СО РАН

(72) Автор(ы):

Иконников Денис Андреевич (RU),
Вьюнышев Андрей Михайлович (RU),
Проконова Дарья Владимировна (RU),
Лосевский Николай Николаевич (RU),
Самагин Сергей Анатольевич (RU),
Котова Светлана Павловна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение "Федеральный
исследовательский центр "Красноярский
научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2781504 C1, 12.10.2022. RU
2458367 C2, 10.08.2012. Котова С.П. и др.
**МАНИПУЛЯЦИЯ
МИКРОСКОПИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
ДВУХЛЕПЕСТКОВЫМИ СВЕТОВЫМИ
ПОЛЯМИ** // Краткие сообщения по физике
Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской Академии Наук. - 2022. - Т. 49. - N
11. - С. 9-14. CN 108375836 A, 07.08.2018. JP
2010199308 A, 09.09.2010.

(54) Способ создания оптического пинцета с конфигурируемым массивом вихревых лазерных пучков

(57) Реферат:

Изобретение относится к оптике и предназначено для создания оптического пинцета на основе фазовых масок. Способ создания оптического пинцета с конфигурируемым массивом вихревых лазерных пучков включает взаимодействие лазерного луча с пространственным модулятором света, на который загружена фазовая маска, проектируемая с помощью компьютера, лазерный луч приобретает желаемое распределение светового поля, формируя оптический пинцет с возможностью изменения конфигурации массива вихревых лазерных пучков путем перестройки и

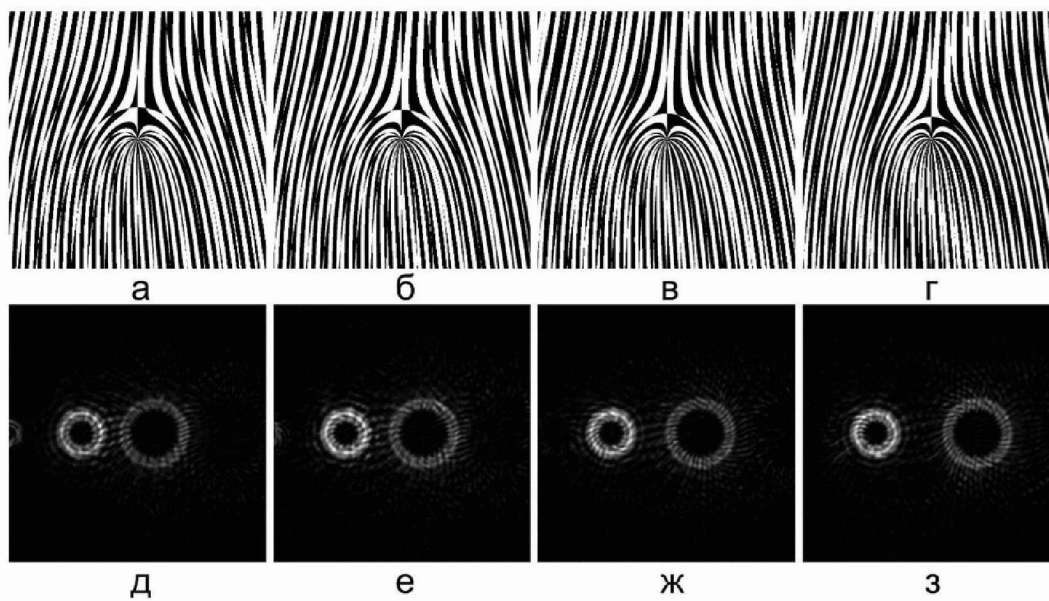
загрузки на пространственный модулятор другой фазовой маски, при дифракции на которой формируется оптический пинцет с заданными положениями вихревых лазерных пучков и их орбитальными угловыми моментами, при этом вид фазовой маски проектируется на основе следующей формулы:

$$\Phi(x, y) = \Phi_0 + \Delta\Phi \cdot \text{sign} \left(\sum_n a_n \cos[G_n x + l_n \arctan(y/x)] \right),$$

для проектирования фазовой маски, формирующей оптический пинцет с измененной конфигурацией вихревых лазерных пучков, достаточно изменить значения векторов обратной

решетки G_n для изменения положений соответствующих вихревых пучков и значения топологических зарядов l_n для изменения их

орбитальных угловых моментов. Технический результат – сокращение времени переключения между конфигурациями вихревых пучков. 3 ил.



Фиг. 1

RU 2807969 C1

RU 2807969 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G02B 21/32 (2023.08)

(21)(22) Application: **2023123112, 06.09.2023**
(24) Effective date for property rights:
06.09.2023
Registration date:
21.11.2023
Priority:
(22) Date of filing: **06.09.2023**
(45) Date of publication: **21.11.2023** Bull. № 33
Mail address:
**660036, g. Krasnoyarsk, ul. Akademgorodok, 50,
FITS KNTS SO RAN**

(72) Inventor(s):
**Ikonnikov Denis Andreevich (RU),
Viunyshev Andrei Mikhailovich (RU),
Prokopova Daria Vladimirovna (RU),
Losevskii Nikolai Nikolaevich (RU),
Samagin Sergei Anatolevich (RU),
Kotova Svetlana Pavlovna (RU)**
(73) Proprietor(s):
**Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe
nauchnoe uchrezhdenie "Federalnyi
issledovatel'skii tsentr "Krasnoyarskii nauchnyi
tsentr Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii
nauk" (RU)**

(54) **METHOD FOR CREATING OPTICAL TWEEZERS WITH CONFIGURABLE ARRAY OF VORTEX LASER BEAMS**

(57) Abstract:

FIELD: optics.
SUBSTANCE: invention is intended to create optical tweezers based on phase masks. A method for creating optical tweezers with a configurable array of vortex laser beams includes the interaction of a laser beam with a spatial light modulator, onto which a phase mask designed using a computer is loaded; the laser beam acquires the desired distribution of the light field, forming an optical tweezer with the ability to change the configuration of the array of vortex laser beams by rearrangement and loading of another phase mask onto the spatial modulator, during diffraction on which an optical tweezer is formed with given positions of vortex laser beams and their orbital angular momenta, while

the type of phase mask is designed based on the following formula:
$$\Phi(x, y) = \Phi_0 + \Delta\Phi \cdot \text{sign} \left(\sum_n a_n \cos[G_n x + l_n \arctan(y/x)] \right),$$

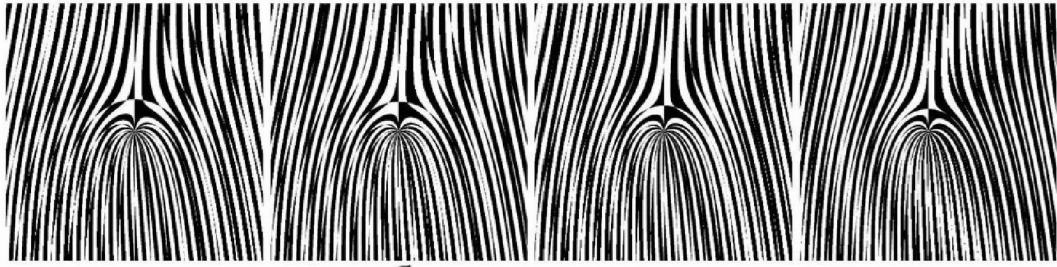
to design a phase mask that forms optical tweezers with a changed configuration of vortex laser beams, it is enough to change the values of the reciprocal lattice vectors G_n to change the positions of the corresponding vortex beams and the value of topological charges l_n to change their orbital angular momenta.

EFFECT: reduction in switching time between configurations of vortex beams.

1 cl, 3 dwg

RU 2 807 969 C1

RU 2 807 969 C1

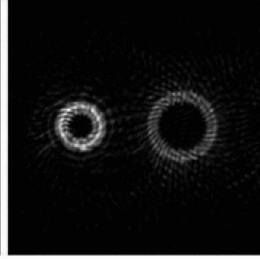
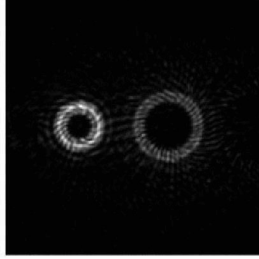
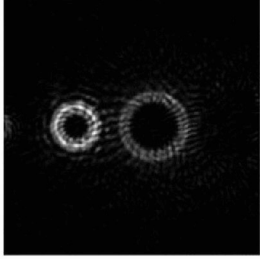
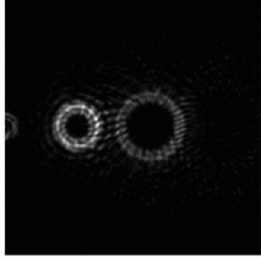


а

б

в

г



д

е

ж

з

Фиг. 1

RU 2807969 C1

RU 2807969 C1

Настоящее изобретение относится к оптике и предназначено для формирования оптических пинцетов (оптических ловушек) в виде массива вихревых лазерных пучков для захвата и оптического манипулирования ансамблями микрообъектов.

Предложенный способ дает возможность независимого управления положением вихревых пучков в фокальной плоскости ловушки и их орбитальным угловым моментом.

Идея оптического захвата микрочастиц лазерным пучком впервые была предложена в 1970 г. в работе [1] и с тех пор нашла широкое применение в различных областях знаний, включая медицину и биологию, атомную физику и химию. Наибольший интерес оптические ловушки представляют для биологических наук ввиду их неинвазивности и малой травматичности. Оптические ловушки используются в клеточной биологии и эмбриологии благодаря возможности фиксации и перемещения живых клеток в естественных условиях, а также в биофизике и микробиологии для исследования структуры белков и процессов белкового обмена.

Использование вихревых лазерных пучков [2,3] в устройстве оптических пинцетов [4] позволяет захватывать ансамбль микрочастиц в кольцевую пространственную конфигурацию, в которой микрочастицы совершают орбитальное движение с определенной угловой скоростью и направлением. Основными характеристиками вихревых лазерных пучков являются орбитальный угловой момент и величина топологического заряда (ТЗ), показывающая количество скачков фазы на 2π радиан при полном обходе по азимутальному углу.

Наиболее близким к предложенному способу является способ формирования произвольных оптических ловушек (оптических пинцетов) [5]. В данном способе лазерный луч при взаимодействии (отражении/прохождении) с дифракционным оптическим элементом (ДОЭ) в результате дифракции приобретает желаемое распределение светового поля. В качестве дифракционного элемента в данном способе использовался пространственный модулятор света, на который загружена фазовая маска (голограмма), проектируемая с помощью компьютера посредством использования итеративного алгоритма вычисления с применением прямого и обратного Фурье-преобразования.

Недостатком этого способа является необходимость проведения многократных, сложных и ресурсоемких вычислений для формирования фазовой маски, что замедляет скорость перестройки оптического пинцета, поскольку скорость расчета фазовой маски в представленном аналоге существенно зависит от выбора входных условий и в определенных случаях алгоритм может не сходиться.

Технический результат изобретения заключается в том, что уменьшается время необходимое для проектирования фазовой маски, что приводит к сокращению времени переключения между последовательными (отдельными) конфигурациями вихревых пучков в устройстве оптического пинцета.

Технический результат достигается тем, что в способе создания оптического пинцета с конфигурируемым массивом вихревых лазерных пучков лазерный луч при взаимодействии с дифракционным оптическим элементом, на который загружена фазовая маска, проектируемая с помощью компьютера, приобретает желаемое распределение светового поля, тем самым формируя оптический пинцет с возможностью изменения конфигурации вихревых лазерных пучков, осуществляемой путем перестройки и загрузки на пространственный модулятор света другой фазовой маски, при дифракции на которой формируется оптический пинцет с заданными положениями вихревых лазерных пучков и их орбитальными угловыми моментами, новым является то, что вид фазовой маски проектируется на основе следующей формулы

$\Phi(x, y) = \Phi_0 + \Delta\Phi \cdot \text{sign}(\sum_n a_n \cos[G_n x + l_n \arctan(y/x)])$, где Φ_0 – среднее значение фазы, $\Delta\Phi$ – максимальное отклонение фазы от её среднего значения, a_n , G_n ,

5 l_n – амплитуда, вектор обратной решетки и топологический заряд n-ой пространственной гармоники, $\text{sign}(\psi)=|\psi|/\psi$ – функция знака от аргумента ψ , при этом для проектирования фазовой маски, формирующей требуемую конфигурацию вихревых лазерных пучков в оптическом пинцете, достаточно изменить значения векторов обратной решетки G_n для изменения положений соответствующих вихревых пучков и
10 значения топологических зарядов l_n для изменения их орбитальных угловых моментов.

Время, требуемое на изменение конфигурации оптического пинцета, напрямую зависит от времени, затрачиваемого на перестройку фазовой маски. Поскольку отсутствует необходимость сложных, ресурсоемких и продолжительных вычислений,
15 данный способ позволяет осуществлять перестройку конфигурации вихревых пучков в устройстве оптического пинцета за меньшее время.

В предложенном способе источником лазерного излучения формируется лазерный пучок, который падает на пространственный модулятор света. Пространственный модулятор света представляет собой массив ячеек, состоящий из двух стеклянных
20 подложек с прозрачными электродами, на внутренние поверхности которых нанесены ориентирующие покрытия. Полость между стеклянными подложками заполнена жидкими кристаллами. Генерируемые на компьютере фазовые маски определяют напряжения, подаваемые на ячейки пространственного модулятора света, и тем самым, задают требуемые конфигурации направлений директоров (преимущественного
25 направления ориентации молекул) жидких кристаллов в ячейках. В зависимости от направления директора свет, падающий на соответствующую ячейку, приобретает определенный набег фазы в пределах указанной области, что позволяет осуществлять пространственную модуляцию фазы в поперечном сечении пучка света и как результат формировать оптический пинцет с конфигурируемым массивом вихревых лазерных
30 пучков (заданными положениями вихревых лазерных пучков и их орбитальными угловыми моментами). В данном способе фазовые маски имеют вид

$\Phi(x, y) = \Phi_0 + \Delta\Phi \cdot \text{sign}(\sum_n a_n \cos[G_n x + l_n \arctan(y/x)])$, где Φ_0 – среднее значение фазы, $\Delta\Phi$ – максимальное отклонение фазы от её среднего значения Φ_0 ; a_n ,

35 G_n , l_n – амплитуда, вектор обратной решетки и топологический заряд n-ой пространственной гармоники; $\text{sign}(\psi)=|\psi|/\psi$ – функция знака от аргумента ψ . Вихревые пучки, приобретающие в результате взаимодействия с пространственным модулятором света желаемые положения и орбитальные угловые моменты, попадают в кювету, содержащую микрочастицы. Совокупное воздействие градиентных сил и сил светового
40 давления заставляет частицы устремляться в области с наибольшей интенсивностью света, благодаря чему осуществляется оптический захват частиц, т.е. пучок света действует как оптический пинцет.

Предложенный способ позволяет формировать оптический пинцет, содержащий как один вихревой пучок, так и набор вихревых пучков. Микрочастицы, захваченные
45 оптическим пинцетом, будут перемещаться вслед за перемещением вихревого пучка/пинцета. Перемещение оптического пинцета в предложенном способе осуществляется путем перестройки и загрузки на пространственный модулятор света другой фазовой маски, такой, что в результате дифракции на ней лазерного пучка в области кюветы

будет формироваться оптический пинцет, смещенный по сравнению с исходным. Таким образом скорость смещения оптического пинцета в предложенном способе напрямую зависит от времени, затрачиваемого на перестройку фазовой маски.

Таким образом, предложенный способ проектирования фазовых масок для формирования конфигурируемых массивов вихревых лазерных пучков в устройстве оптического пинцета отличается от прототипа тем, что в нем фазовые маски представляют собой суперпозицию модуляций (гармонических функций), описывающих распределения фазы с заданными параметрами, в результате чего отсутствует необходимость в выполнении многократных, ресурсоемких вычислений, возникающих, например, при решении обратной задачи дифракции. В заявленном способе картина дифрагированного светового поля определяется параметрами, входящими в спроектированную фазовую маску, в результате чего параметры сформированных вихревых пучков варьируются независимо друг от друга.

Изобретение поясняется чертежами:

На фиг. 1 представлены примеры сгенерированных предлагаемым способом бинарных фазовых масок с фиксированными параметрами $l_1 = 10, l_2 = 20, G_1 = 0.0523$ рад/мкм и значениями G_2 (рад/мкм): (а) 0.0849, (б) 0.0873, (в) 0.0924, (г) 0.0982, а также соответствующие им рассчитанные распределения интенсивности (д,е,ж,з), формируемые при дифракции на расстоянии 1 м за маской.

На фиг. 2 представлена оптическая схема оптического пинцета с конфигурируемым массивом вихревых лазерных пучков для демонстрации заявленного способа. Коллимированный пучок лазера (2) испытывает дифракцию на пространственном модуляторе света (3) и первый порядок дифракции направляется через светоделитель (4) и микрообъектив (5) в рабочую область, находящуюся внутри кюветы с раствором микрочастиц латекса (6), положения которых регистрируются камерой (1).

На фиг. 3 представлены снимки, демонстрирующие формирование вихревых лазерных пучков и захват микрочастиц с помощью сформированного массива ловушек с фиксированными параметрами $l_1 = 10, l_2 = 20, G_1 = 0.0523$ рад/мкм и значениями G_2 (рад/мкм): (а, д) 0.0849, (б, е) 0.0873, (в, ж) 0.0924, (г, з) 0.0982.

Фазовые маски, сформированные предложенным способом, представляют собой суперпозицию нескольких гармонических функций (пространственных гармоник). При прохождении света через маску или отражении от нее в первом порядке дифракции формируется набор дифракционных максимумов, положение которых определяется векторами обратной решетки, соответствующих пространственных гармоник.

Для демонстрации возможности использования фазовых масок, сформированных предложенным способом, для оптического захвата и манипулирования микрообъектами в устройстве оптического пинцета был рассчитан набор из 4 масок (фиг. 1 а-г). На фиг. 2 представлена оптическая схема для формирования оптического пинцета с конфигурируемым массивом вихревых лазерных пучков.

Пример 1. Сформированный источником лазерный пучок падает на пространственный модулятор света, на котором загружена фазовая маска, представляющая собой суперпозицию двух гармонических функций. Формируется набор из двух вихревых пучков в первом дифракционном порядке. Топологические заряды вихревых пучков l_1 и l_2 равны соответственно 10 и 20, а векторы обратной решетки $G_1 = 0.0523$ рад/мкм и $G_2 = 0.0849$ рад/мкм. Вид фазовой маски и

соответствующая ей рассчитанная картина дифракции, демонстрирующая формирование вихревых пучков, показаны на фиг. 1 а, 1 д. Сгенерированная фазовая маска загружается на пространственный модулятор света и используется в устройстве оптотермической ловушки на основе непрерывного твердотельного лазера с длиной волны 532 нм для захвата латексных микросфер со средним размером 2 мкм в водном растворе, как показано на фиг. 3 а, 3 д.

Пример 2. Сформированный источником лазерный пучок падает на пространственный модулятор света, на котором загружена фазовая маска, представляющая собой суперпозицию двух гармонических функций. Формируется набор из двух вихревых пучков в первом дифракционном порядке. Топологические заряды вихревых пучков l_1 и l_2 равны соответственно 10 и 20, а векторы обратной решетки $G_1 = 0.0523$ рад/мкм и $G_2 = 0.0873$ рад/мкм. Вид фазовой маски и соответствующая ей рассчитанная картина дифракции, демонстрирующая формирование вихревых пучков, показаны на фиг. 1 б, 1 е. Сгенерированная фазовая маска загружается на пространственный модулятор света и используется в устройстве оптотермической ловушки на основе непрерывного твердотельного лазера с длиной волны 532 нм для захвата латексных микросфер со средним размером 2 мкм в водном растворе, как показано на фиг. 3 б, 3 е.

Пример 3. Сформированный источником лазерный пучок падает на пространственный модулятор света, на котором загружена фазовая маска, представляющая собой суперпозицию двух гармонических функций. Формировался набор из двух вихревых пучков в первом дифракционном порядке. Топологические заряды вихревых пучков l_1 и l_2 равны соответственно 10 и 20, а векторы обратной решетки G_1 и G_2 0.0523 рад/мкм и 0.0924 рад/мкм. Вид фазовой маски и соответствующая ей рассчитанная картина дифракции демонстрирующая формирование вихревых пучков показаны на фиг. 1 в, 1 ж. Сгенерированная фазовая маска загружается на пространственный модулятор света и используется в устройстве оптотермической ловушки на основе непрерывного твердотельного лазера с длиной волны 532 нм для захвата латексных микросфер со средним размером 2 мкм в водном растворе, как показано на фиг. 3 в, 3 ж.

Пример 4. Сформированный источником лазерный пучок падает на пространственный модулятор света, на котором загружена фазовая маска, представляющая собой суперпозицию двух гармонических функций. Формируется набор из двух вихревых пучков в первом дифракционном порядке. Топологические заряды вихревых пучков l_1 и l_2 равны соответственно 10 и 20, а векторы обратной решетки $G_1 = 0.0523$ рад/мкм и $G_2 = 0.0982$ рад/мкм. Вид фазовой маски и соответствующая ей рассчитанная картина дифракции демонстрирующая формирование вихревых пучков показаны на фиг. 1 г, 1 з. Сгенерированная фазовая маска загружается на пространственный модулятор света и используется в устройстве оптотермической ловушки на основе непрерывного твердотельного лазера с длиной волны 532 нм для захвата латексных микросфер со средним размером 2 мкм в водном растворе, как показано на фиг. 3 г, 3 з.

Из фиг. 3 а-г видно, что в рабочей области оптического пинцета образуются пары вихревых пучков, отличающиеся набором $\{G_1, G_2\}$. Изменение значения G_2 приводит

к перемещению одного из вихревых пучков (соответствует G_2), при этом другой пучок (соответствует G_1) сохраняет свое положение, что свидетельствует о возможности независимого манипулирования вихревыми пучками в массиве.

5 На фиг. 3 д-з представлены снимки, демонстрирующие захват микрочастиц латекса с помощью сформированного набора вихревых лазерных пучков в устройстве оптического пинцета. Ансамбли микрочастиц захватываются в максимумы интенсивности света с образованием устойчивых кольцеобразных структур. При рассмотрении процесса в динамике, микрочастицы латекса испытывают орбитальное движение, связанное с наличием орбитального углового момента вихревого пучка.

10 Таким образом, способ создания оптического пинцета с конфигурируемым массивом вихревых лазерных пучков позволяет проектировать фазовые маски для дифракционного формирования набора вихревых пучков с заданными положениями в фокальной плоскости оптического пинцета и значениями орбитальных угловых моментов (топологических зарядов) за счет изменения значений векторов обратной решетки G_n для изменения положений соответствующих вихревых пучков и значений топологических зарядов l_n для изменения их орбитальных угловых моментов. В результате отсутствует необходимость в выполнении сложных, ресурсоемких и продолжительных вычислений, что в свою очередь позволяет осуществлять перестройку конфигурации вихревых пучков в устройстве оптического пинцета за меньшее время.

Источники информации

1. A. Ashkin Acceleration and trapping of particles by radiation pressure // Physical Review Letters, – 1970. – 24 – 156–159. DOI: 10.1103/PhysRevLett.24.156.
- 25 2. L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre Gaussian laser modes // Phys Rev A, –1992. – 45 – 8185–8189. DOI: 10.1103/PhysRevA.45.8185.
3. M.S. Soskin, V.N. Gorshkov, M.V. Vasnietsov, J.T. Malos, N.R. Heckenberg Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices // Phys Rev A, –1997. – 56 – 4064–4075. DOI: 10.1103/PhysRevA.56.4064.
- 30 4. V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, W.Z. Krolikowski, Y.S. Kivshar Optical vortex beams for trapping and transport of particles in air // Applied Physics A, – 2010. – 100(2) – 327–331. DOI: 10.1007/s00339-010-5860-4.
5. Jennifer E. Curtis, Brian A. Koss, David G. Grier MULTIPLE OPTICAL VORTICES FOR MANIPULATING PARTICLES // United States Patent – 2005. – Patent No.: US6,995,351 B2.

(57) Формула изобретения

Способ создания оптического пинцета с конфигурируемым массивом вихревых лазерных пучков, включающий взаимодействие лазерного луча с пространственным модулятором света, на который загружена фазовая маска, проектируемая с помощью компьютера, при этом лазерный луч приобретает желаемое распределение светового поля, тем самым формируя оптический пинцет с возможностью изменения конфигурации массива вихревых лазерных пучков путем перестройки и загрузки на пространственный модулятор света другой фазовой маски, при дифракции на которой формируется оптический пинцет с заданными положениями вихревых лазерных пучков и их орбитальными угловыми моментами, отличающийся тем, что вид фазовой маски проектируется на основе следующей формулы:

$$\Phi(x, y) = \Phi_0 + \Delta\Phi \cdot \text{sign}\left(\sum_n a_n \cos[G_n x + l_n \arctan(y/x)]\right),$$

где Φ_0 – среднее значение фазы, $\Delta\Phi$ – максимальное отклонение фазы от её среднего значения, a_n, G_n, l_n – амплитуда, вектор обратной решетки и топологический заряд n-й пространственной гармоники, $\text{sign}(\psi)=|\psi|/\psi$ – функция знака от аргумента ψ , при этом
5 для проектирования фазовой маски, формирующей оптический пинцет с измененной конфигурацией вихревых лазерных пучков, достаточно изменить значения векторов обратной решетки G_n для изменения положений соответствующих вихревых пучков и значения топологических зарядов l_n для изменения их орбитальных угловых моментов.

10

15

20

25

30

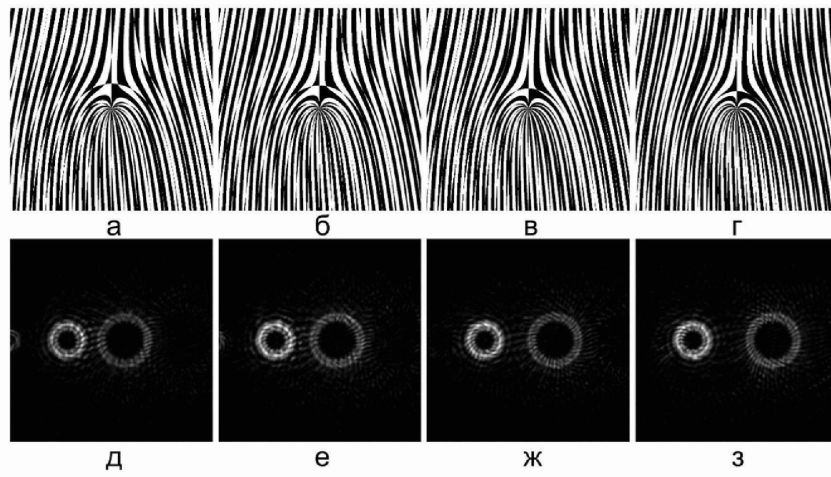
35

40

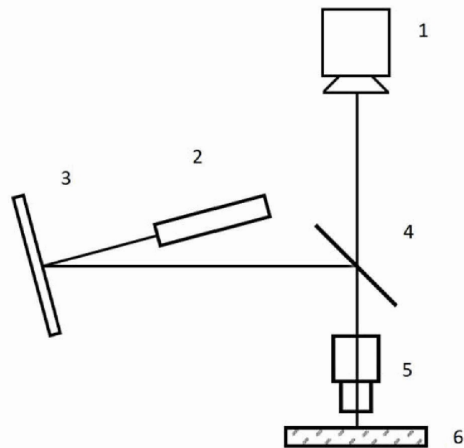
45

1

1/2

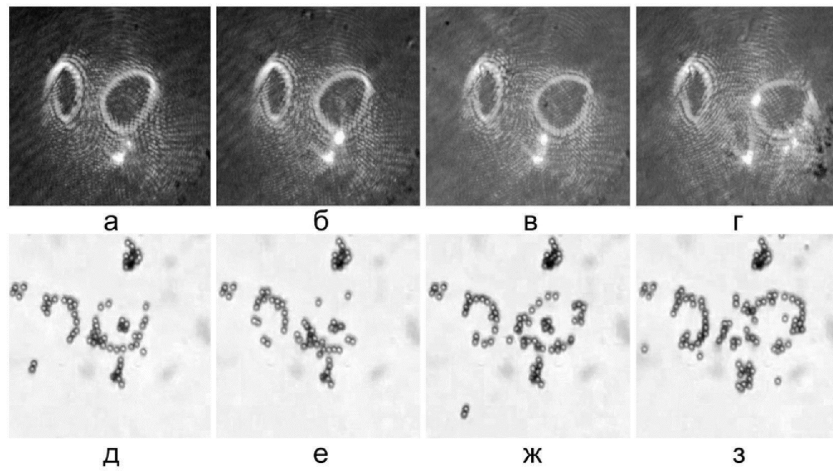


Фиг. 1



Фиг. 2

2



Фиг. 3