

ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМБИНАЦИЙ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ В ЗАДАЧЕ МАНИПУЛИРОВАНИЯ МИКРООБЪЕКТАМИ

Скиданов Р.В.^{1,2}, Ганчевская С.В.²

¹ Институт систем обработки изображений РАН,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Аннотация

Представлены дифракционные оптические элементы для формирования суперпозиции оптических вихрей с разными топологическими зарядами. Представлены результаты математического моделирования дифракции света на таких ДОЭ.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, оптический вихрь, топологический заряд.

Введение

Вихревые световые пучки используются при передаче информации [1], в системах оптического контроля [2], в оптическом микроманипулировании [3, 4]. При этом наличие орбитального углового момента предопределило использование оптических вихревых пучков, прежде всего, для вращения микрообъектов. Большинство используемых вихревых пучков имеют четко выраженную кольцевую структуру. Но существуют световые пучки, имеющие более сложную структуру [5, 6] в виде замкнутых световых линий. В качестве практического использования таких световых пучков чаще всего рассматривается оптический привод для микромеханических систем [7–11], но существует множество других практических задач в области микроманипуляции, в которых используются вихревые пучки [12, 13]. При этом орбитальный угловой момент может появляться даже при сложении пучков, которые изначально не обладают им. Так, в [14] описывается суперпозиция световых пучков Эрмита–Гаусса с орбитальным угловым моментом. В [15] описывается создание суперпозиции вихревых пучков для вращения микрочастиц и бактерий с использованием динамического модулятора света.

Суперпозиция вихревых пучков в общем случае имеет сложную структуру распределения интенсивности [16, 17] (в общем случае некольцевую). В [18, 19] описывается метод формирования суперпозиции вихревых пучков, имеющих некольцевую структуру, и теоретически и экспериментально обосновывается возможность использования таких вихревых полей в задаче оптического вращения микрообъектов.

В данной работе рассматривается новый тип дифракционных оптических элементов, в которых области, отвечающие за формирование вихревых световых пучков с разными топологическими зарядами, не разделены по апертуре, как в [16], а равномерно располагаются по площади апертуры.

1. Формирование суперпозиции вихревых световых полей вихревыми аксиконами

Дифракционный винтовой аксикон описывается функцией комплексного пропускания следующего вида:

$$\tau(r, \phi) = \exp(i2\pi vr) \exp(i n \phi), \quad (1)$$

где r, ϕ – полярные координаты в плоскости ДОЭ, v – пространственная частота линий аксикона, n – номер винтовой составляющей. При прохождении света через такой аксикон формируется пучок Бесселя n -го порядка $J_n(\alpha r)$, где $\alpha = k \cos(v\lambda)$ (k – волновое число).

Известна работа [20], в которой предлагается генерировать пучки Бесселя с помощью ДОЭ с функцией пропускания

$$\tau(r, \phi) = \operatorname{sgn}(J_n(\alpha r)) \exp(i n \phi). \quad (2)$$

Винтовой ДОЭ с пропусканием (1) эффективно формирует световое поле, амплитуда которого пропорциональна функции Бесселя $J_n(\alpha r) \exp(i n \phi)$, вблизи оптической оси на отрезке $0 < z < Rk/\alpha$, где R – радиус аксикона.

Если рассмотреть структуру ДОЭ с функцией пропускания (2) с точки зрения геометрии расположения зон, то можно сказать, что ДОЭ представляет собой набор кольцевых зон примерно равной ширины, в которых фазовая функция повернута на полярный угол $\phi_0 = \pi/n$, если знак функции $J_n(\alpha r)$ отрицательный.

Рассмотрим дифракционный оптический элемент с функцией пропускания

$$\tau(r, \phi) = \frac{1}{2} [\exp(im_1\phi) + \exp(im_2\phi)] + \frac{1}{2} [\exp(im_2\phi) - \exp(im_1\phi)] \operatorname{sgn}[\cos(2\pi vr + n\phi)], \quad (3)$$

где m_1, m_2 – номера дополнительных вихревых составляющих, r, ϕ – полярные координаты, v – пространственная несущая частота, n – топологический заряд бинарного дифракционного аксикона, который является основой структуры этого ДОЭ. С точки зрения геометрии ДОЭ с такой функцией пропускания выглядит как дифракционный бинарный аксикон, у которого в выступах записана вихревая составляющая m_1 , а во впадинах – вихревая составляющая m_2 , при этом расположение этих зон таково, что в ближней зоне также может формироваться световое поле с топологическим зарядом n . Будем в дальнейшем называть топологический заряд n топологическим зарядом структуры. Кроме этого, если в соседних зонах одинаковый топологический заряд, то для структурного разделения таких зон можно добавить к фазе во всей зоне некоторую постоянную величину. Выглядеть это будет как поворот

вихревой фазы на некоторый угол. Будем говорить, например, о смещении фазы на полпериода, если этот угол равен π . Формируемые таким ДОЭ световые поля отличаются большим разнообразием распределений интенсивности и фазы, что позволяет говорить о возможности их использования в оптической микроманипуляции для очень широкого диапазона задач.

2. Основные типы ДОЭ

1. Самый простой вариант такого ДОЭ – это сочетание $n = 0, m_1 = 0, m_2 \neq 0$. Тогда получается два интересных случая.

Рассмотрим $m_2 = 1$. На рис. 1 представлены фаза ДОЭ и распределение интенсивности в дальней зоне.

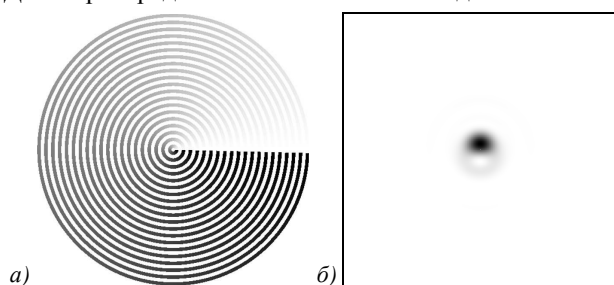


Рис. 1. Фаза ДОЭ (а) и распределение интенсивности при дифракции на ДОЭ в дальней зоне (б)

Получившееся распределение интенсивности по вертикальной координате примерно на 10% меньше размера диска Эйри, полученного для плоской волны на апертуре такого же размера. Как показано в [21, 24], при использовании подобных пучков для оптического захвата биологических микрообъектов перемещение по одной выделенной координате может происходить с большей скоростью, чем при использовании Гауссова пучка. Ещё более сжатый по одной координате пучок получается при $m_2 = 2$. На рис. 2 представлены фаза ДОЭ и распределение интенсивности в дальней зоне.

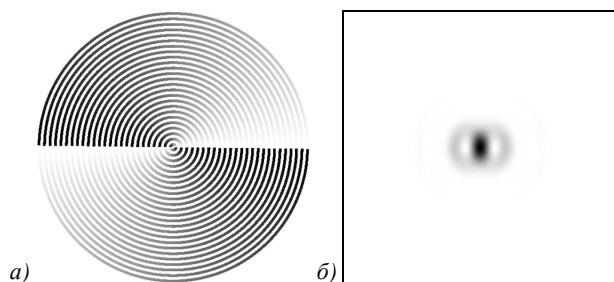


Рис. 2. Фаза ДОЭ (а) и распределение интенсивности при дифракции на ДОЭ в дальней зоне (б)

Ширина пучка по горизонтали почти на 20% меньше размера диска Эйри, полученного при дифракции плоской волны на апертуре такого же размера.

Вихревые пучки в виде полумесяца можно масштабировать. При сохранении разности $m_2 - m_1 = 1$ и росте абсолютного значения m_2 пучок будет увеличиваться. На рис. 3 представлены фаза ДОЭ и распределение интенсивности в дальней зоне для случая $n = 0, m_1 = 1, m_2 = 2$.

При дальнейшем увеличении m_2 размеры пучка будут увеличиваться.

2. Ещё один случай может быть полезен при захвате биологических микрообъектов, который можно наблюдать при соблюдении условия $|m_1 - m_2| = 2$ [21].

На рис. 4 представлен случай $n = 0, m_1 = 2, m_2 = 4$.

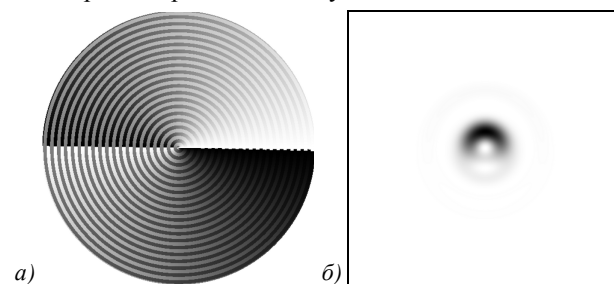


Рис. 3. Фаза ДОЭ (а) и распределение интенсивности при дифракции на ДОЭ в дальней зоне (б)

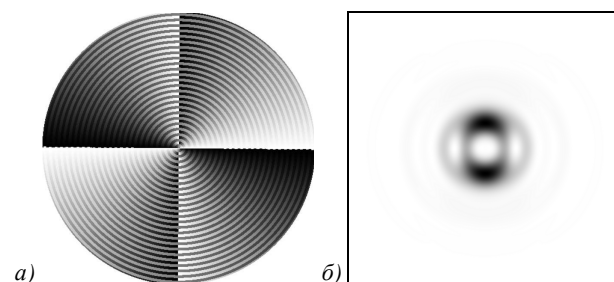


Рис. 4. Фаза ДОЭ ($n = 0, m_1 = 2, m_2 = 4$) (а) и распределение интенсивности при дифракции на ДОЭ в дальней зоне (б)

Как видно из рис. 4, в результате дифракции на таком ДОЭ образуется распределение интенсивности в виде двух полумесяцев с нулевой интенсивностью в центре. Такое распределение удобно для задачи удерживания на месте биологического микрообъекта по одной координате. Это распределение интенсивности за счёт концентрации энергии на одной координате позволяет получить большую силу захвата по сравнению с обычным вихревым пучком такого же масштаба (на 20–25%) (правда, по другой координате сила захвата настолько же меньше). Эти результаты были получены путём моделирования оптического захвата биологического микрообъекта сферической формы методом, описанным в [22, 23].

При увеличении разности $|m_1 - m_2| = 3, |m_1 - m_2| = 4$ получаются вихревые пучки в форме треугольника и квадрата соответственно (рис. 5).

На рис. 5 представлен случай для $n = 0, m_1 = 1, m_2 = 4$ (5а), $n = 0, m_1 = 2, m_2 = 6$ (5б).

Представленные на рис. 5 распределения интенсивности удовлетворяют условию, описанному в [18], при котором такие пучки позволяют вращать микрообъекты. При этом выполняются условия, накладываемые на фазу пучка и на ширину распределения интенсивности по радиусу. Т.е. пучки, представленные на рис. 5, можно использовать в задаче вращения микромеханических элементов [19].

Ещё один интересный случай – это сочетание $n \neq 0, m_1 = m_2 = m \neq 0$. При этом зоны для m_1, m_2 должны быть повернуты на половину полярного угла изменения фазы на 2π .

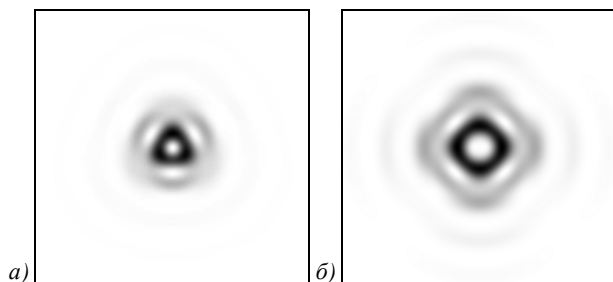


Рис. 5. Распределение интенсивности в фокальной плоскости для $n = 0, m_1 = 1, m_2 = 4$ (а) и распределение интенсивности в фокальной плоскости для $n = 0, m_1 = 2, m_2 = 6$ (б)

В результате в зоне дифракции Френеля топологический заряд структуры n складывается с топологическим зарядом m и формируется пучок, который по амплитудно-фазовому распределению близок к пучку Бесселя $n+m$ -го порядка. Поскольку с точки зрения практического использования такой пучок практически идентичен пучку Бесселя, для краткости эти пучки в дальнейшем будем называть просто пучками Бесселя. На рис. 6а представлен аксикон, в котором $n = 5, m_1 = m_2 = m = 5$, в результате формируется пучок Бесселя 10-го порядка, распределение интенсивности в котором на расстоянии 450 мм от аксикона представлено на рис. 6б. На рис. 6в представлен похожий аксикон, в котором $n = 5, m_1 = m_2 = m = -5$, в результате формируется пучок Бесселя 0-го порядка, распределение интенсивности в котором на расстоянии 450 мм от аксикона представлено на рис. 6г.

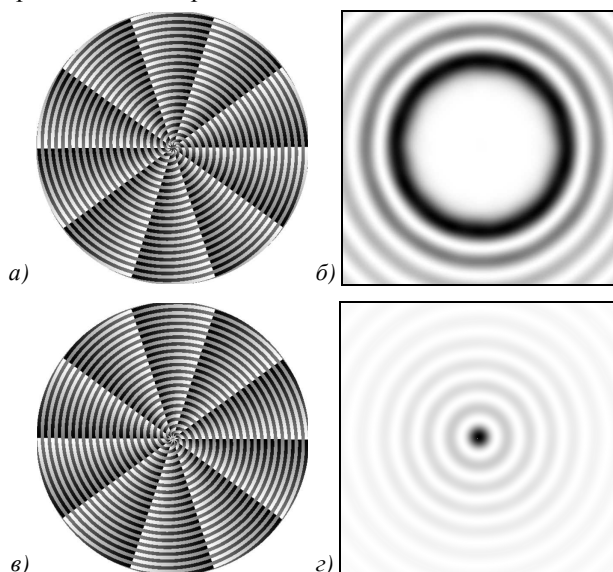


Рис. 6. Фаза вихревого аксикона, в котором $n = 5, m_1 = m_2 = m = 5$ (а), распределение интенсивности на расстоянии 450 мм от аксикона (б), фаза вихревого аксикона, в котором $n = 5, m_1 = m_2 = m = -5$ (в), распределение интенсивности на расстоянии 450 мм от аксикона (г)

Таким образом, пучок Бесселя i -го порядка можно сформировать бесконечно большим количеством способов с помощью вихревых аксиконов, для которых должно выполняться условие

$$i = n + m . \tag{4}$$

На рис. 7 представлены фазы вихревых аксиконов, формирующих пучок Бесселя 1-го порядка.

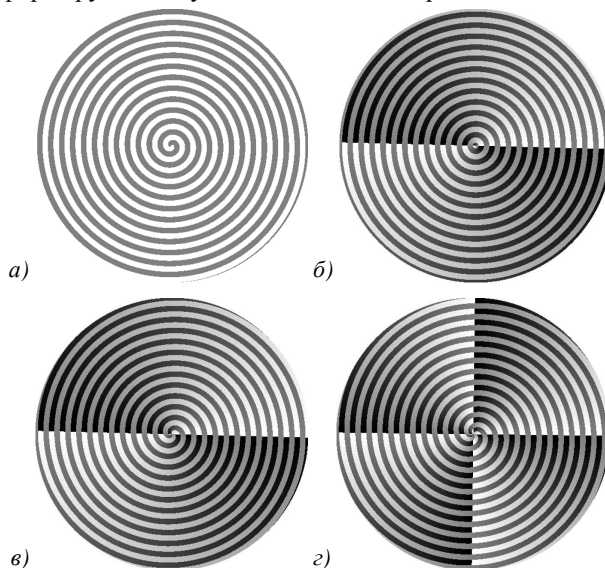


Рис. 7. Фазы вихревых аксиконов, формирующих пучок Бесселя 1-го порядка: $n = 1, m_1 = m_2 = m = 0$ (а), $n = 0, m_1 = m_2 = m = 1$ (б), $n = 2, m_1 = m_2 = m = -1$ (в), $n = 3, m_1 = m_2 = m = -2$ (г)

Каждый из аксиконов, представленных на рис. 7, формирует пучок Бесселя 1-го порядка, при этом ошибка формирования интенсивности не превышает 5% в зависимости от элемента (в качестве эталона был взят пучок Бесселя, рассчитанный аналитически). Это позволяет утверждать, что представленные аксиконы действительно формируют пучок, максимально близкий по свойствам к пучку Бесселя, а все отличия, скорее всего, вызваны ограничением апертуры ДОЭ.

3. Суперпозиция из большего количества вихревых пучков

Чтобы формировать суперпозицию более чем двух вихревых пучков, можно использовать более сложный ДОЭ, основанный на том же принципе. С точки зрения геометрии расположения вихревых зон такой ДОЭ можно представить как многоуровневый аксикон, в каждом уровне которого записана своя винтовая фаза. На рис. 8 представлена фаза такого ДОЭ, который формирует суперпозицию трёх вихревых пучков 2-го порядка, сформированных со смещением на треть периода.

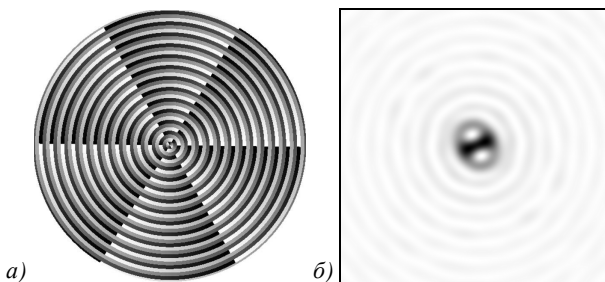


Рис. 8. ДОЭ, формирующий суперпозицию трёх вихревых пучков 2-го порядка, сформированных со смещением на треть периода ($n = 0, m_1 = 2, m_2 = 2, m_3 = 2$)

ДОЭ на рис. 8а формирует двойную световую ловушку, которую можно использовать для захвата непрозрачных микрочастиц. Путём сочетания вихревых пучков с разными топологическими зарядами можно получить практически любое распределение интенсивности, имеющее осевую симметрию. Авторы в

данной статье не претендуют на полноту описания возможных суперпозиций вихревых пучков, рассматриваются только некоторые наиболее интересные сочетания топологических зарядов.

Так, на рис. 9 представлены наиболее интересные случаи для суперпозиций из трёх вихревых пучков.

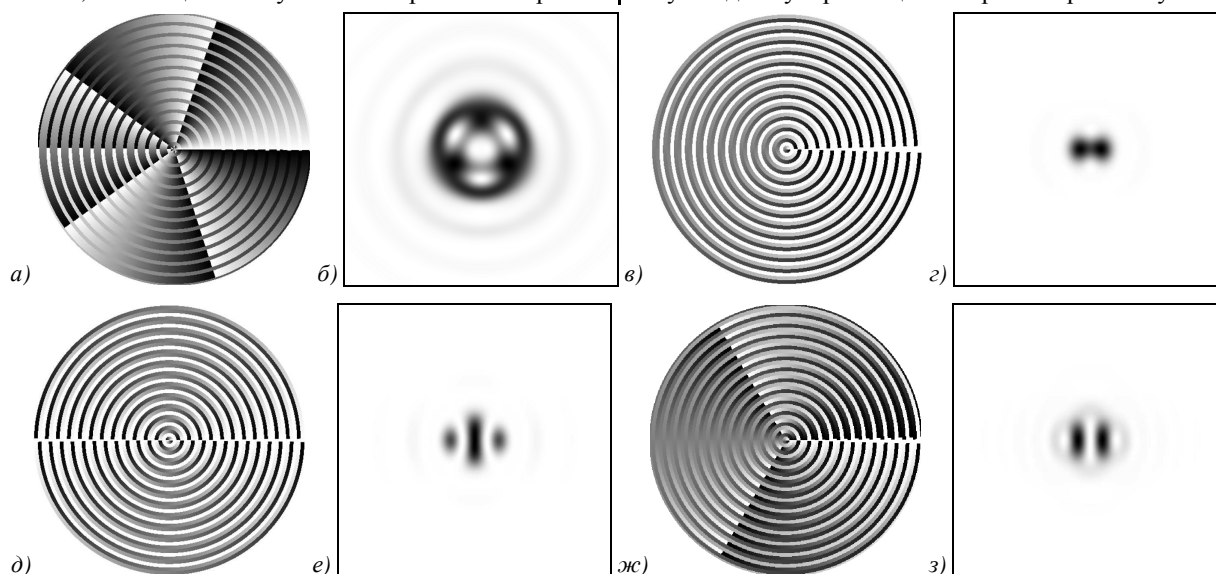


Рис. 9. Фаза ДОЭ для формирования суперпозиции пучков 2-го и 5-го порядков (а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б), фаза ДОЭ для формирования суперпозиции пучков 1-го и -1-го порядков (на третьем уровне фаза постоянная), фаза ДОЭ для формирования суперпозиции пучков 2-го и -2-го порядков (на третьем уровне фаза постоянная), фаза ДОЭ для формирования суперпозиции пучков 1-го, -1-го и -3-го порядков

На рис. 9а представлена фаза ДОЭ, который формирует в дальней зоне световой пучок в форме трёхлопастной турбины (рис. 9б), следовательно, такой пучок может быть использован для неповреждающего захвата непрозрачной микротурбины соответствующей формы. На рис. 9в представлена фаза ДОЭ, который формирует двойную ловушку для прозрачных микрообъектов (рис. 9г), при этом в направлении между пятнами есть градиент фазы. Это означает, что микрообъекты будут прижаты друг к другу с определённой, легко рассчитываемой силой. На рис. 9д представлена фаза ДОЭ, который формирует распределение интенсивности, характеризующееся очень малой шириной по одной из координат. Ширина линии по полуспаду по горизонтальной координате на 50% уже, чем ширина диска Эйри для плоской волны. Такая ловушка будет полезна при захвате прозрачных вытянутых микрообъектов. На рис. 9ж представлена фаза ДОЭ, который формирует распределение интенсивности в дальней зоне, которое, по сути, является «перевернутым» по отношению к распределению интенсивности на рис. 9е. Т.е. получается узкая ловушка для вытянутых непрозрачных микрообъектов.

С помощью ДОЭ, формирующего суперпозицию из четырёх вихревых пучков, можно реализовать все случаи, представленные на рис. 9 (например, можно реализовать ещё более узкую линию, как на рис. 9е), но также можно реализовать несколько распределений интенсивности, которые ранее не встречались (рис. 10).

На рис. 10а представлена фаза ДОЭ, формирующего прямоугольную световую ловушку четырёх-

угольной формы в дальней зоне дифракции (рис. 10б). На рис. 10в представлена фаза ДОЭ, формирующего в ближней зоне дифракции световую ловушку в форме четырёхлопастной турбины (рис. 10г). На рис. 10д представлена фаза ДОЭ, формирующего в ближней зоне дифракции световую ловушку в форме восьмилопастной турбины. В целом можно получить световые ловушки такого рода для захвата микротурбины любой формы за счёт варьирования топологических зарядов. При этом надо заметить, что распределения интенсивности, представленные на рис. 9г, е, примерно сохраняют свою структуру при распространении в пространстве, т.к. для всех компонент пучка действует одно и то же значение α . С помощью ДОЭ, формирующего суперпозицию из восьми вихревых пучков, можно реализовать все случаи, представленные на рис. 10, но естественно, что сочетание из восьми вихревых пучков порождает большое количество возможностей, рассмотреть которые в рамках данной статьи не представляется возможным. Рассмотрим два интересных случая.

На рис. 11а представлена фаза ДОЭ, формирующего световую ловушку в виде линии в дальней зоне дифракции (рис. 11б). При этом градиент фазы направлен поперёк линии в разные стороны выше и ниже оптической оси. Это означает, что сила удержания микрочастицы, движущейся через такую световую ловушку, будет зависеть от точки прохождения частицы через пучок. Таким образом, этот световой пучок может быть использован для сортировки микрочастиц.

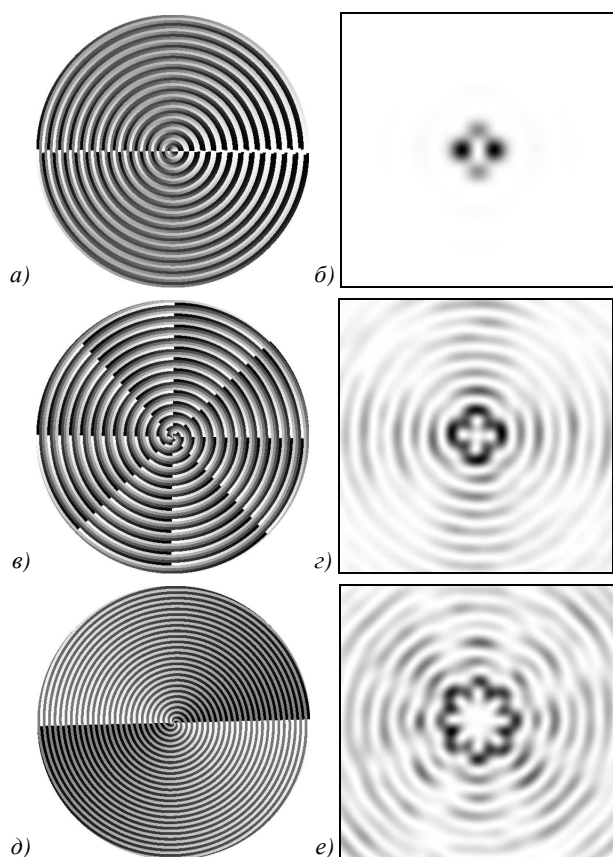


Рис. 10. Фаза ДОЭ для формирования суперпозиции пучков 1-го, 2-го, -1-го, -2-го порядков (а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б), фаза ДОЭ для формирования суперпозиции пучков 2-го, 2-го, 2-го, 2-го порядков со смещением на четверть периода (в), топологический заряд структуры 1, распределение интенсивности в ближней зоне дифракции (г), фаза ДОЭ для формирования суперпозиции пучков -1-го, -1-го, -1-го, -1-го порядков, смещённых на половину периода, топологический заряд структуры 2, распределение интенсивности в ближней зоне дифракции (е)

На рис. 11а представлена фаза ДОЭ, формирующего прямоугольную световую ловушку. При этом градиент фазы внутри ловушки такой, что микрочастица, попавшая в ловушку, будет прижата к одному из её краёв.

Заключение

В статье рассмотрен новый вид ДОЭ, позволяющий формировать световые пучки для оптической микроманипуляции в виде суперпозиции Бесселевых вихревых пучков. В этих ДОЭ вихревые зоны с разными топологическими зарядами равномерно распределены по поверхности. Рассмотрены свойства получившихся пучков и возможность их использования для оптической микроманипуляции.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 г. № 218: договор № 02.Г36.31.0001 от 12.02.2013, Российского фонда

фундаментальных исследований (гранты 13-07-97005p_поволжье_a, 14-07-00177а).

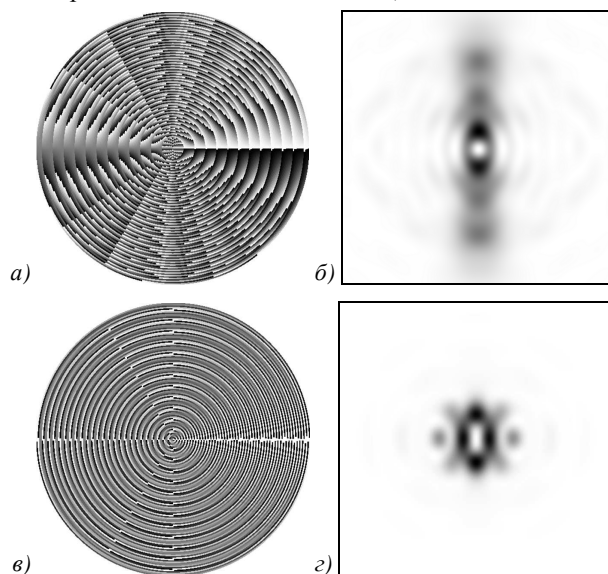


Рис. 11. Фаза ДОЭ для формирования суперпозиции пучков 1-го, 3-го, 5-го, 7-го, 9-го, 11-го, 13-го, 15-го порядков (а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б), фаза ДОЭ для формирования суперпозиции пучков 1-го, -1-го, 2-го, -2-го, 3-го, -3-го, 4-го, -4-го порядков (в), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (г)

Литература

1. **Bai, N.** Mode-division multiplexed transmission with inline few-mode fiber amplifier / N. Bai, Ezra Ip, Y. Hang, E. Mateo, F. Yaman, M. Li, S. Bickham, S. Ten, J. Liñares, C. Montero, V. Moreno, X. Prieto, V. Tse, K. Chung, A.P.T. Lau, H. Tam, C. Lu, Y. Luo, G. Peng, G. Li, T. Wang // *Optic Express*. – 2012. – V. 20(3). – P. 2668-2680.
2. **Котляр, В.В.** Бесконтактное прецизионное измерение линейных смещений с использованием ДОЭ, формирующих моды Бесселя / В.В. Котляр, Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2001. – № 21. – С. 102-104.
3. **Скиданов, Р.В.** Экспериментальное исследование движения диэлектрических шариков в световых пучках с угловыми гармониками высоких порядков / Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика*. – 2007. – Т. 31, № 1. – С. 14-21.
4. **Kotlyar, V.V.** Diffraction of a finite-radius plane wave and a gaussian beam by a helical axicon and a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev, V.A. Soifer // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. – 2007. – V. 24(7). – P. 1955-1964.
5. **Abramochkin, E.G.** Microobject manipulations using laser beams with nonzero orbital angular momentum / E. Abramochkin, S. Kotova, A. Korobtsov, N. Losevsky, A. Mayorova, M. Rakhmatulin and V. Volostnikov // *Laser Phys*. – 2006. – V. 16. – P. 842-848.
6. **Abramochkin, E.G.** Spiral light beams / E.G. Abramochkin and V.G. Volostnikov // *Phys. Usp.* – 2004. – V. 47. – P. 1177.
7. **Ladavac, K.** Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays / K. Ladavac and D. Grier // *Optics Express*. – 2004. – V. 12. – P. 1144-1149.

8. **Lin, X.-F.** A light-driven turbine-like micro-rotor and study on its light-to-mechanical power conversion efficiency Sun / Xiao-Feng Lin, Guo-Qing Hu, Qi-Dai Chen, Li-Gang Niu, Qi-Song Li, AndreasOstendorf, and Hong-Bo // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 101(11). – P. 113901.
9. **Ukita, H.** Rotation rate of a three-wing rotor illuminated by upward-directed focused beam in optical tweezers / Hiroo Ukita [et al.] // *Optical Review*. – 2008. – V. 15. – P. 97-104.
10. **Chaumet, P.C.** Coupled dipole method to compute optical torque: Application to a micropropeller / P.C. Chaumet [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2007. – V. 101. – P. 0231106.
11. **Maruo, S.** Force-controllable, optically driven micromachines fabricated by single-step two-photon microstereolithography / S. Maruo [et al.] // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2003. – V. 12. – P. 533-539.
12. **Burrow, G.M.** Multi-Beam Interference Advances and Applications: Nano-Electronics, Photonic Crystals, Metamaterials, Subwavelength Structures, Optical Trapping, and Biomedical Structures / G.M. Burrow, T.K. Gaylord // *Micromachines*. – 2011. – V. 2. – P. 221-257.
13. **McGloin, D.** 40 years of optical manipulation / D. McGloin and J.P. Reid // *Opt. Photonics News*. – 2010. – V. 21(3). – P. 20-26.
14. **Котляр, В.В.** Орбитальный угловой момент суперпозиции двух обобщённых лазерных пучков Эрмита-Гаусса / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 180-185.
15. **Zhang, P.** Generation and nonlinear self-trapping of optical propelling beams / P. Zhang, S. Huang, Y. Hu, D. Hernandez and Z. Chen // *Opt. Lett.* – 2010. – V. 35(18). – P. 3129-3131.
16. **Khonina, S.N.** Generation of rotating gauss-laguerre modes with binary-phase diffractive optics // S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Lautanen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics*. – 1999. – V. 46(2). – P. 227-238.
17. **Kotlyar, V.V.** Elliptic laguerre-gaussian beams / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.A. Almazov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Turunen // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. – 2006. – V. 23(1). – P. 43-56.
18. **Морозов, А.А.** Сложные вихревые пучки для вращения микромеханических элементов / А.А. Морозов, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 1. – С. 68-75.
19. **Морозов, А.А.** Вращение микротурбин в сложных вихревых пучках / А.А. Морозов, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 203-207.
20. **Fedotowsky, A.** Optimal filter design for annular imaging / A. Fedotowsky, K. Lehovc // *Appl. Opt.* – 1974. – V. 13(12). – P. 2919-2923.
21. **Скиданов, Р.В.** Суперпозиция вихревых световых пучков для захвата и перемещения биологических микрообъектов / Р.В. Скиданов, М.А. Рыков // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 431-435.
22. **Скиданов, Р.В.** Расчёт силы взаимодействия светового пучка с микрочастицами произвольной формы / Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2005. – Т. 28. – С. 18-21.
23. **Скиданов, Р.В.** Моделирование движения биологических микрообъектов в световых пучках / Р.В. Скиданов, М.А. Рыков // *Компьютерная оптика*. – 2010. – Т. 34, № 3. – С. 308-314.
24. **Скиданов, Р.В.** Модификация распределения интенсивности лазерного пучка для оптимизации силовых характеристик оптической ловушки / Р.В. Скиданов, М.А. Рыков, Г.С. Инначионе, С.Г. Кривошлыков // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 377-386.

References

1. **Bai, N.** Mode-division multiplexed transmission with inline few-mode fiber amplifier / N. Bai, Ezra Ip, Y. Hang, E. Mateo, F. Yaman, M. Li, S. Bickham, S. Ten, J. Liñares, C. Montero, V. Moreno, X. Prieto, V. Tse, K. Chung, A.P.T. Lau, H. Tam, C. Lu, Y. Luo, G. Peng, G. Li, T. Wang // *Optic Express*. – 2012. – V. 20(3). – P. 2668-2680.
2. **Kotlyar, V.V.** Contactless precision measurement of linear displacements using DOE forming Bessel Beams / V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, S.N. Khonina // *Computer Optics*. – 2001. – V. 21. – P. 102-104. – (In Russian).
3. **Skidanov, R.V.** Experimental study of the movement of dielectric balls in light beams with angular harmonics of high order / R.V. Skidanov, S.N. Khonina, V.V. Kotkyar, V.A. Soifer // *Computer Optics*. – 2007. – V. 31(1). – P. 14-21. – (In Russian).
4. **Kotlyar, V.V.** Diffraction of a finite-radius plane wave and a gaussian beam by a helical axicon and a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev, V.A. Soifer // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. – 2007. – V. 24(7). – P. 1955-1964.
5. **Abramochkin, E.G.** Microobject manipulations using laser beams with nonzero orbital angular momentum / E. Abramochkin, S. Kotova, A. Korobtsov, N. Losevsky, A. Mayorova, M. Rakhmatulin and V. Volostnikov // *Laser Phys*. – 2006. – V. 16. – P. 842-848.
6. **Abramochkin, E.G.** Spiral light beams / E.G. Abramochkin and V.G. Volostnikov // *Phys. Usp.* – 2004. – V. 47. – P. 1177.
7. **Ladavac, K.** Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays / K. Ladavac and D. Grier // *Optics Express*. – 2004. – V. 12. – P. 1144-1149.
8. **Lin, X.-F.** A light-driven turbine-like micro-rotor and study on its light-to-mechanical power conversion efficiency Sun / Xiao-Feng Lin, Guo-Qing Hu, Qi-Dai Chen, Li-Gang Niu, Qi-Song Li, AndreasOstendorf, and Hong-Bo // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 101(11). – P. 113901.
9. **Ukita, H.** Rotation rate of a three-wing rotor illuminated by upward-directed focused beam in optical tweezers / Hiroo Ukita [et al.] // *Optical Review*. – 2008. – V. 15. – P. 97-104.
10. **Chaumet, P.C.** Coupled dipole method to compute optical torque: Application to a micropropeller / P.C. Chaumet [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2007. – V. 101. – P. 0231106.
11. **Maruo, S.** Force-controllable, optically driven micromachines fabricated by single-step two-photon microstereolithography / S. Maruo [et al.] // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2003. – V. 12. – P. 533-539.
12. **Burrow, G.M.** Multi-Beam Interference Advances and Applications: Nano-Electronics, Photonic Crystals, Metamaterials, Subwavelength Structures, Optical Trapping, and Biomedical Structures / G.M. Burrow, T.K. Gaylord // *Micromachines*. – 2011. – V. 2. – P. 221-257.
13. **McGloin, D.** 40 years of optical manipulation / D. McGloin and J.P. Reid // *Opt. Photonics News*. – 2010. – V. 21(3). – P. 20-26.
14. **Kotlyar, V.V.** Orbital angular momentum of laser beams, generalized Hermite-Gaussian beam / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev // *Computer Optics*. – 2013. – V. 37(2). – P. 180-185.
15. **Zhang, P.** Generation and nonlinear self-trapping of optical propelling beams / P. Zhang, S. Huang, Y. Hu, D. Hernandez and Z. Chen // *Opt. Lett.* – 2010. – V. 35(18). – P. 3129-3131.
16. **Khonina, S.N.** Generation of rotating gauss-laguerre modes with binary-phase diffractive optics // S.N. Khonina, V.V. Kot-

- lyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Lautanen, J. Turunen // Journal of Modern Optics. – 1999. – V. 46(2). – P. 227-238.
17. **Kotlyar, V.V.** Elliptic laguerre-gaussian beams / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.A. Almazov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Turunen // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. – 2006. – V. 23(1). – P. 43-56.
18. **Morozov, A.A.** Complex vortex beams for rotation of micromechanical elements / A.A. Morozov, R.V. Skidanov // Computer Optics. – 2013. – V. 37(1). – P. 68-75.
19. **Morozov, A.A.** Rotation of microturbine in complex vortex beams / A.A. Morozov, R.V. Skidanov // Computer Optics. – 2013. – V. 37(2). – P. 203-207.
20. **Fedotowsky, A.** Optimal filter design for annular imaging / A. Fedotowsky, K. Lehovec // Appl. Opt. – 1974. – V. 13(12). – P. 2919-2923.
21. **Skidanov, R.V.** Superposition of vortex beams of light to capture and movement of biological micro objects / R.V. Skidanov, M.A. Rykov // Computer Optics. – 2013. – V. 37(4). – P. 431-435.
22. **Skidanov, R.V.** The calculation of the force of interaction of the light beam with micro particles of arbitrary form / R.V. Skidanov // Computer Optics. – 2005 – V. 28. – P. 18-21. – (In Russian).
23. **Skidanov, R.V.** Modeling of movement of biological micro objects in the light beams / R.V. Skidanov, M.A. Rykov // Computer Optics. – 2010 – V. 34(3). – P. 308-314. – (In Russian).
24. **Skidanov, R.V.** The modification of laser beam for optimization of optical trap force characteristics / R.V. Skidanov, M.A. Rykov, G.S. Iannacchione, S.G. Krivoslyukov // Computer Optics. – 2012 – V. 36(3). – P. 377-386.

DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS FOR THE FORMATION OF COMBINATIONS OF VORTEX BEAMS IN THE PROBLEM MANIPULATION OF MICROOBJECTS

R.V. Skidanov^{1,2}, S.V. Ganchevskaya²

¹ Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences,

² S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

Presented diffractive optical elements for the formation of a superposition of optical vortex with different topological charges. Presented results of mathematical modeling of diffraction of light on such DOE.

Key words: diffraction optical element, optical vortex, topological charge.

Сведения об авторах



Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает заведующим лаборатории микро и нано технологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Скиданов Р.В. – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 90 статей, 5 монографий.

E-mail: romans@smr.ru.

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973). Graduated with honours (1990) from Samara State University (SSU), majoring in Physic. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State Aerospace University. He is the head of the laboratory of micro and nano technologies of at Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 90 scientific papers, 5 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.



Ганчевская София Владиславовна, 1992 года рождения, в 2013 получила степень бакалавра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Область научных интересов: дифракционная оптика.

Sofiya Vladislavovna Ganchevskaya (b. 1992) She Received her bachelor in Applied Mathematics and Physic (2013) in SSAU. Her research interests are currently diffractive optics.

Поступила в редакцию 17 декабря 2013 г.