

## ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МИКРООБЪЕКТА

© 2010 А. А. Морозов

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

Рассматривается расчёт дифракционного оптического элемента (ДОЭ), формирующего изображение полосы с направленным вдоль неё градиентом фазы, на основе оптического «вихря». Показано, что при возрастании порядка оптического «вихря» увеличивается длина полосы, но падает её эффективность. Представлены схемы и результаты экспериментов по формированию изображений, а также захвату и манипулированию частиц с помощью рассчитанных в ходе работы и изготовленных на стекле ДОЭ.

*Микроманипуляция, оптический «вихрь», микрочастица, дифракционный оптический элемент, сингулярность, оптическая схема, амплитудно-фазовое распределение, фокусатор.*

### Введение

В микромеханике есть задача по перемещению и сортировке микрочастиц с помощью дифракционного оптического элемента (ДОЭ), формирующего изображение полосы с градиентом фазы вдоль неё. При сортировке частиц ДОЭ более тяжёлые частицы будут проходить через полосу, а более лёгкие останутся зафиксированными. Существуют различные варианты формирования такого светового поля. Например, ДОЭ, формирующие заданное распределение интенсивности в одной плоскости, они известны довольно давно [1-3]. Есть работы, в которых фокусаторы формировали заданную интенсивность, и при этом световое поле обладало и некоторой заранее известной фазой [4, 5]. В [4] рассматривался метод расчёта фокусаторов, которые позволяют формировать заданное амплитудно-фазовое распределение практически без ограничений на форму этого распределения, но при этом использовалось амплитудное кодирование, снижавшее энергетическую эффективность. В [5] световой пучок имел вихревую фазу с заданным угловым орбитальным моментом, т.е. фактически фокусатор формировал вихревое световое поле с заданной интенсивностью. В данном методе, как отмечают сами авторы, могут быть использованы только многоуровневые ДОЭ, которые гораздо сложнее в изготовлении. Также есть различные рабо-

ты, напрямую связанные с сортировкой микрочастиц [6, 7]. В [7] изображение полосы для сортировки частиц формируется вообще без использования ДОЭ за счёт преломления в оптической системе микрообъектива, но при этом сильно ограничены длина полосы и область её формирования, а также происходят значительные потери энергии. В настоящей работе рассматривается метод расчёта ДОЭ, формирующего световое поле для линейного перемещения микрообъекта. В данной работе вместо расчёта специального фокусатора, рассматривается бинарный элемент, формирующий два световых «вихря» с противоположным направлением вращения. Полоса с направленным вдоль неё градиентом фазы формируется за счёт интерференции этих «вихрей». Также рассматриваются эксперименты по микроманипуляции в световых полях, сформированных такими ДОЭ.

### Расчёт элемента

Расчёт элемента производится на основе добавления несущей частоты в фазу оптического «вихря». После этого осуществляется её приведение к бинарному виду:

$$\varphi_b(x, y) = \arg \left( \varphi(x, y) e^{-i \alpha x} + \varphi(x, y) e^{i \alpha x} \right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – частота несущей,  $\varphi(x, y)$  – исходная фаза,  $\varphi_b(x, y)$  – новая бинарная фаза.

При добавлении несущей частоты в оптический «вихрь» на получаемом изображении вместо одного кольца бинарный элемент формирует два, причём их орбитальные угловые моменты направлены в противоположные стороны. При изменении периода несущей частоты будет меняться расстояние между кольцами (рис. 1). При определённом периоде можно получить изображение, на котором кольца будут соприкасаться, а в месте соприкосновения будет интерференционная картина в форме полосы. При этом то, что орбитальные угловые моменты колец направлены в противоположные стороны,

обеспечивает градиент фазы, направленный вдоль полосы, как показано на рис. 2.

Также следует отметить, что для формирования необходимой полосы подходят оптические «вихри» только с чётным порядком сингулярности, т.к. при нечётном порядке в месте соприкосновения колец вместо одной прямой полосы формируется две дуги (рис. 3).

При увеличении порядка сингулярности увеличивается диаметр колец, а также и длина полосы (рис. 4), но при этом для каждого порядка оптимальный период несущей частоты для формирования полосы будет свой.

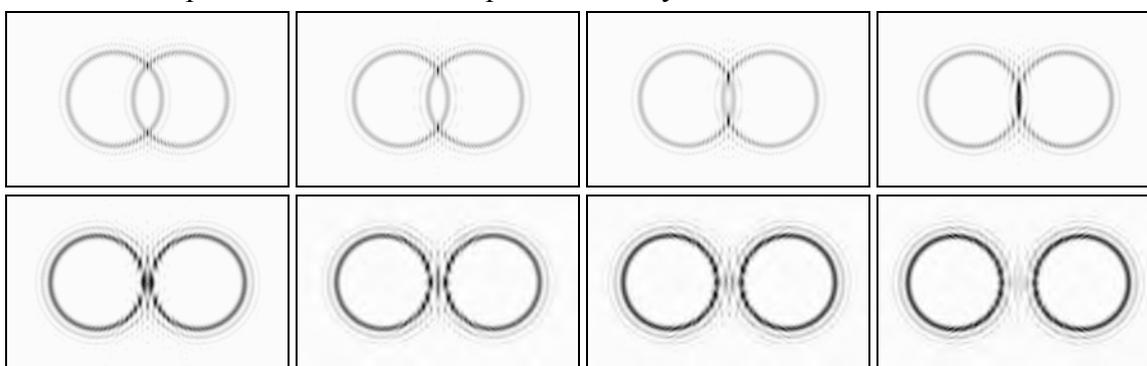


Рис. 1. Изменения дифракционной картины для ДОЭ, формирующего оптический вихрь с  $n=60$  при изменении частоты несущей от 18,5 лин/мм до 36 лин/мм с шагом 2,5 лин/мм (слева направо и сверху вниз частота увеличивается, изображения негативы)

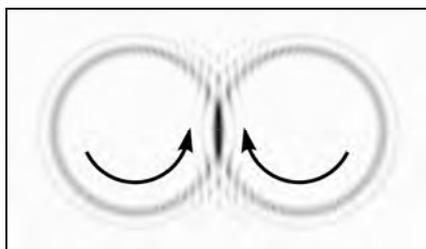


Рис. 2. Направления закрутки колец для ДОЭ, формирующего вихрь с  $n=60$  (негатив)

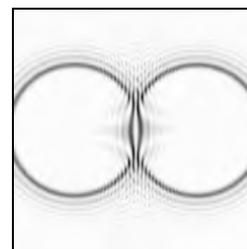


Рис. 3. Картина, возникающая при нечётном порядке сингулярности ( $n=101$ ) (негатив)

Расчёт производился с помощью моделирующей программы, которая позволяла рассчитывать ДОЭ с заданными параметрами кодирования и порядка сингулярности, а также моделировала дифракционную картину, формируемую таким элементом. Для более удобного расчёта в данную программу была добавлена возможность рассчитывать совместно несколько ДОЭ с различной несущей частотой с заданным шагом, получать от них изображения колец и измерять длину и энергетическую

эффективность полосы. Под энергетической эффективностью в данном случае понималось отношение энергии, попадающей в полосу, к энергии, идущей на формирование всей дифракционной картины. По результатам расчётов программы было выбрано пять ДОЭ, формирующих оптические «вихри» с различным порядком сингулярности. Эти ДОЭ имеют оптимальную частоту несущей, при которой образуется наиболее длинная и энергетически эффективная полоса.

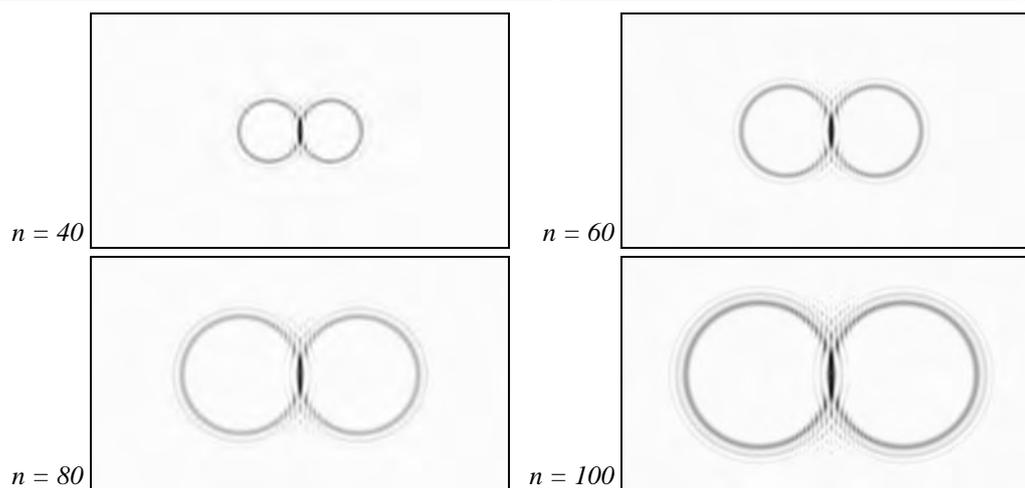


Рис. 4. Дифракционные картины, формирующиеся при разных порядках оптических «вихрей» (негативные изображения)

Из табл. 1 можно отметить, что при возрастании сингулярности, помимо увеличения длины полосы, происходит уменьшение её энергетической эффективности, поэтому в зависимости от условий задачи нужно будет выбирать, что важнее: длина полосы или её энергетическая эффективность.

#### Экспериментальная часть

Все пять ДОЭ, рассчитанные выше, были изготовлены на стекле методом фотолитографии размером  $4 \times 4$  мм, с разрешением 1 мкм. Изготовленные элементы имели глубину травления 0,611 мкм. Для исследования изображений дифракционных картин, на столе была собрана оптическая схема, представленная на

рис. 5. Использовался лазер с длиной волны 532 нм, коллиматор из линз ( $F_1 = 50$  мм и  $F_2 = 100$  мм) расширял пучок, диафрагмой (4 мм) лазерный луч ограничивался до размеров ДОЭ, на матрице камеры формировалось изображение дифракционной картины.

Как видно из рис. 6, данные ДОЭ дают искажённые и зашумлённые изображения, а в середине полосы наблюдается усиление интенсивности. Это может быть связано с погрешностью глубины травления элементов, полученной при изготовлении. Тем не менее, с этими элементами был произведён эксперимент по манипуляции с помощью них микрочастицами.

Таблица 1. Зависимость энергетической эффективности и длины полосы от сингулярности при оптимальной частоте несущей

Сингулярность	Частота несущей, лин/мм	Энергетическая эффективность, %	Длина полосы, pixel
20	9,06	18,244	17
40	17,76	16,004	24
60	26,26	11,386	29
80	34,32	8,457	38
100	42,36	6,552	46

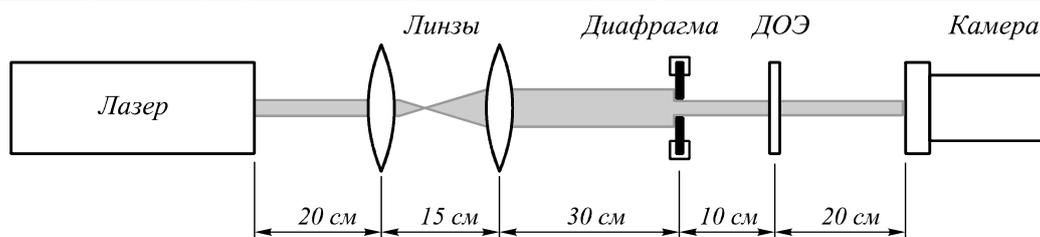


Рис. 5. Общий вид оптической схемы для получения дифракционной картины с помощью ДОЭ, изготовленных на стекле

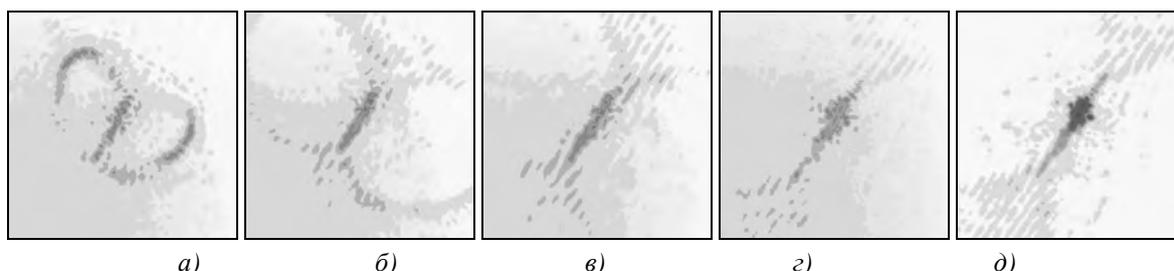


Рис. 6. Изображения, полученные с помощью ДОЭ, изготовленных на стекле и формирующих оптические «вихри» с  $n=20$  (а),  $n=40$  (б),  $n=60$  (в),  $n=80$  (г),  $n=100$  (д) (негативные изображения)

Для этого на оптическом столе была собрана специальная схема (рис. 7). ДОЭ располагался на таком удалении от лазера ( $\lambda = 532$  нм), чтобы выходящий луч успел расшириться и перекрыть весь элемент. После ДОЭ лазерный луч фокусировался микрообъективом ( $40\times$ ) до размеров, подходящих для манипуляции частицами размером 5 мкм. В области фокуса этого микрообъектива находилась стеклянная подложка с нанесённой на неё взвесью микрочастиц, а следом за ней находился ещё один микрообъектив ( $16\times$ ), строящий изображение рабочей области. Далее ла-

зерный луч направлялся в камеру, перед которой стоял набор светофильтров с минимальным коэффициентом пропускания на длине волны используемого лазера, так, чтобы при этом было видно изображение частиц и полосы, сопоставимое по яркости с фоновой подсветкой.

Манипуляция микрочастицами осуществлялась с помощью ДОЭ, формирующего оптический «вихрь» 20-го порядка. Удалось осуществить захват и передвижение частицы вдоль полосы. Момент захвата и перемещения представлен на рис. 8.

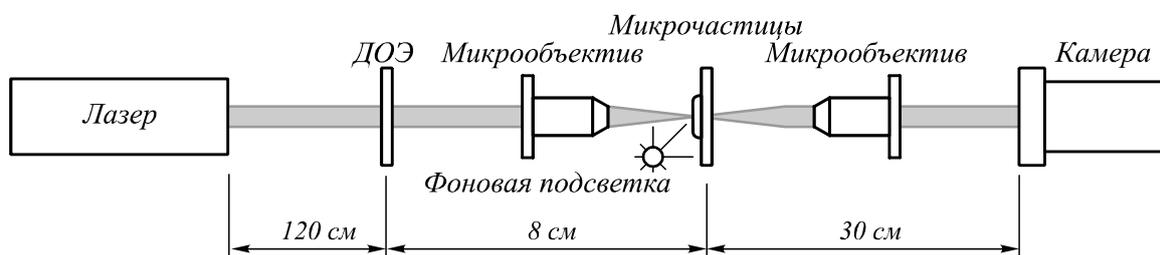


Рис. 7. Общий вид оптической схемы для осуществления микроманипуляции

На рис. 8 видно, как частица захватывается слева в область повышенной интенсивности и движется направо вдоль полосы примерно до её середины. Средняя скорость движения частицы составила 7,6 мкм/с, что является достаточно хоро-

шим результатом, учитывая интенсивность используемого пучка.

### Заключение

Рассчитаны ДОЭ, формирующие полосу с направленным вдоль неё градиен-

том фазы, основанные на суперпозиции оптических «вихрей», закодированной путём наложения несущей частоты. Рассчитанные ДООЭ были изготовлены на стекле и исследованы. С помощью ДООЭ были осуществлены захват и перемещение микрочастиц вдоль формируемой полосы.

Расчёт ДООЭ, формирующих изображение полосы, на основе суперпозиции оптических «вихрей», даёт преимущество в энергетической эффективности в несколько раз по сравнению с элементами, рассчитанными с помощью других алгоритмов [4].

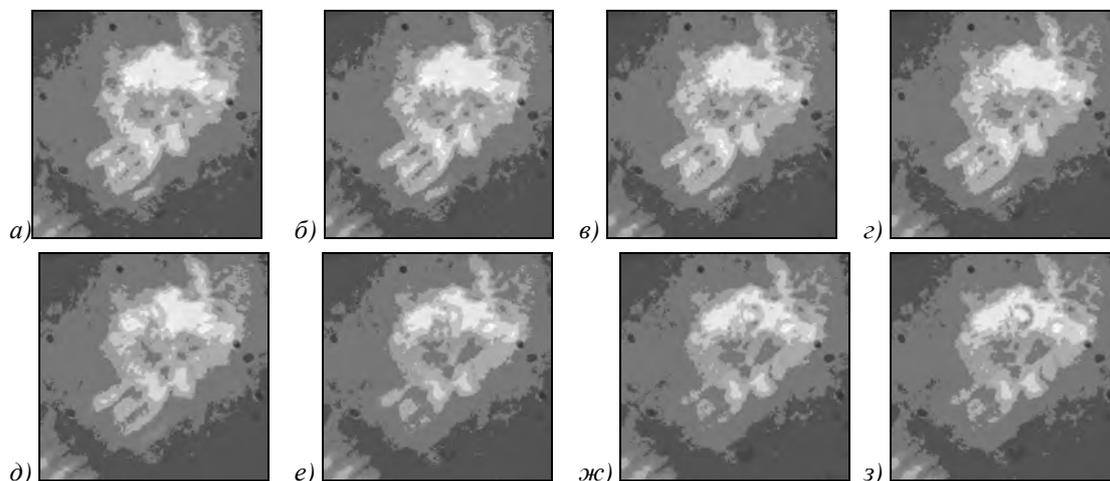


Рис. 8. Моменты захвата и перемещения частицы с промежутком между кадрами 0,25с

#### Библиографический список

1. **Голуб, М.А.** Фокусировка излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм [Текст] / М.А. Голуб [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7, № 10. – С. 618-623.
2. **Гончарский, А.В.** Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в произвольную кривую [Текст] / А.В. Гончарский [и др.] // ДАН СССР. – 1983. – Т. 273, № 3. – С. 605-608.
3. **Воронцов, М.А.** К расчёту фокусаторов лазерного излучения в дифракционном приближении [Текст] / М.А. Воронцов, А.Н. Матвеев, В.П. Сивоконь // Компьютерная оптика. – 1987. – № 1. – С. 74-78.
4. **Скиданов, Р.В.** Оптическая микроманипуляция с использованием бинарных фокусаторов [Текст] / Р.В. Скиданов, А.П. Порфирьев // Компьютерная оптика. – 2010. – Том 34, № 2. – С. 214-218.

5. **Абрамочкин, Е.Г.** Формирование вихревых световых полей с заданной формой интенсивности для задач лазерной манипуляции микрообъектами [Текст] / Е.Г. Абрамочкин – Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии «Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии», Иркутск: Папирус, 2008. – С. 203-207.

6. **Cheng-Shan, G.** Optical sorting using an array of optical vortices with fractional topological charge [Text] / Cheng-Shan Guo, Ya-Nan Yu, Zhengping Hong // Optics Communications. – 2010. – V. 283. – P. 1889-1893.

7. **Marchington, R.F.** Optical deflection and sorting of microparticles in a near-field optical geometry [Text] / R.F. Marchington, M. Mazilu, S. Kuriakose, V. Garcés-Chavez, P.J. Reece, T.F. Krauss, M. Gu, and K. Dholakia // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, N 6. – P. 3712-3726.

#### References

1. **Golub, M.A.** Focusing of radiation in the given area of space with using com-

- puter designed holograms [Text] / M.A. Golub [and other] // Letters in JTP. –

1981. – Vol. 7, N 10. – P. 618-623. – [in Russian].

2. **Goncharskiy, A.V.** Decision of the inverse problem of the focusing of the laser radiation in free curve [Text] / A.V. Goncharskiy [and other] // RAS USSR. – 1983. – Vol. 273, N 3. – P. 605-608. – [in Russian].

3. **Voronzov, M.A.** The calculation focusator of laser radiation in the diffraction theory [Text] / M.A. Voronzov, A.N. Matveev, V.P. Sivokon' // Computer Optics. – 1987. – N 1. – P. 74-78. – [in Russian].

4. **Skidanov, R.V.** Optical micromanipulation with using binary focusator [Text] / R.V. Skidanov, A.P. Porfir'ev // Computer Optics. – 2010. – Vol. 34, N 2. – P. 214-218. – [in Russian].

5. **Abramochkin, E.G.** Forming of Helical-wave-front laser beams by light with

given by form to intensities for problems of the lazer manipulate microobjects [Text] / E.G. Abramochkin – Materials XXVI schools on coherent optics and holographies "Holography: fundamental research, innovative projects and nanotechnologies", Irkutsk: Papirus, 2008. – P. 203-207. – [in Russian].

6. **Cheng-Shan, G.** Optical sorting using an array of optical vortices with fractional topological charge [Text] / Cheng-Shan Guo, Ya-Nan Yu, Zhengping Hong // Optics Communications. – 2010. – Vol. 283. – P. 1889-1893.

7. **Marchington, R.F.** Optical deflection and sorting of microparticles in a near-field optical geometry [Text] / R.F. Marchington, M. Mazilu, S. Kuriakose, V. Garces-Chavez, P.J. Reece, T.F. Krauss, M. Gu and K. Dholakia // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, No. 6. – P. 3712-3726.

## FORMATION OF THE LIGHT FIELD FOR LINEAR MOVEMENT OF A MICROOBJECT

© 2010 A.A. Morozov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The calculation of the DOE, which forms an image of the strip with a directional phase gradient along it, based on optical vortex is considered. It is shown, that the increase of the singularity of the optical vortex increases the length of the strip, but decreases it's effectiveness. The schemes and the results of experiments on the formation of images, as well as trapping and manipulating particles computed in progress and manufactured on the glass DOE, are presented.

*Micromanipulation, optical vortex, microparticles, diffractive optical element, singularity, optical scheme, amplitude-phase distribution, focuser.*

### Информация об авторах

**Морозов Андрей Андреевич**, аспирант кафедры технической кибернетики. Самарский государственный аэрокосмический университет. Область научных интересов: дифракционная оптика, микромеханика. E-mail: [ragefalcon@mail.ru](mailto:ragefalcon@mail.ru).

**Morozov Andrey Andreevich**, post-graduate student of technical cybernetics department. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: diffractive optics, micromechanics. E-mail: [ragefalcon@mail.ru](mailto:ragefalcon@mail.ru).