

## СЛОЖНЫЕ ВИХРЕВЫЕ ПУЧКИ ДЛЯ ВРАЩЕНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Морозов А.А., Скиданов Р.В.

Институт систем обработки изображений РАН,  
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

### Аннотация

Рассматриваются дифракционные оптические элементы, формирующие сложные вихревые пучки для вращения микромеханических элементов. Представлен эксперимент по формированию таких пучков и эксперимент по вращению агломераций полистироловых микрочастиц в сложных вихревых пучках.

**Ключевые слова:** вихревые пучки, микромеханический элемент, суперпозиция вихревых пучков.

### Введение

Проблема создания вращательного момента в микромеханических системах с помощью специальных пучков имеет долгую историю [1-8]. Основной упор в работах по этой теме делается как на принципиальную возможность вращения элементов микромеханических систем [2-5], так и на саму технологию изготовления таких элементов [7, 8]. Уделяется также внимание теоретическим аспектам процесса вращения микрообъектов в световых пучках [1, 6]. Развитие этой тематики в настоящее время сводится в основном к практическому приложению вращения микрообъектов в световых пучках к конкретным задачам [9-13]. В некоторых работах задача вращения рассматривается в совокупности с другими задачами: сортировки, перемещения, позиционирования и др [9]. Исходя из приведённого обзора, следует заметить, что во всех рассмотренных работах упор делается в первую очередь на технологию изготовления элементов микромеханики и практически нет попыток совершенствования самих световых пучков. В качестве вращающихся пучков выступают либо простые пучки Гаусса [2, 5], либо простейшие вихревые пучки [14]. В то же время, рассчитывая дифракционные оптические элементы, формирующие вихревые световые пучки под определённую форму микромеханического компонента (микротурбины), можно повысить эффективность передачи момента вращения в микромеханические системы.

От всех вышеперечисленных недостатков можно избавиться, если использовать специальные световые пучки с орбитальным угловым моментом [14]. Однако вращение микротурбины требует, как правило, большего усилия, чем простое вращение группы микрообъектов. Следовательно, требуется увеличивать мощность и порядок рабочего вихревого пучка. В силу геометрии вихревого пучка высокого порядка вся его мощность будет сосредоточена в очень узкой области, что может привести к тепловому повреждению микромеханического элемента. Для предотвращения разрушения необходимо формировать вихревые пучки, состоящие из нескольких колец.

### 1. Формирование световых пучков, состоящих из нескольких световых колец

Для получения нескольких колец рассмотрим ДОЭ подобные тем, которые представлены на

рис. 1. Фазовая функция такого ДОЭ представляет собой набор колец, в каждом кольце винтовая фаза повернута по отношению к предыдущему на  $180^\circ$  (добавка к фазовой функции  $\pi/2$ ). При дифракции на таком ДОЭ формируется световой пучок, состоящий из нескольких колец.

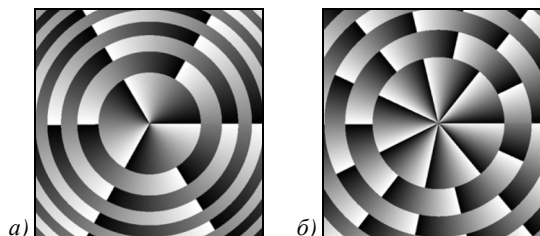


Рис. 1. ДОЭ для формирования вихревого пучка из нескольких световых колец: 3-го порядка (а), 7-го порядка (б)

Ширина колец в ДОЭ на рис. 1 разная. Это связано с тем, что при одинаковой ширине колец в ДОЭ формируемый пучок имеет кольца разной интенсивности, что нежелательно (рис. 2б).

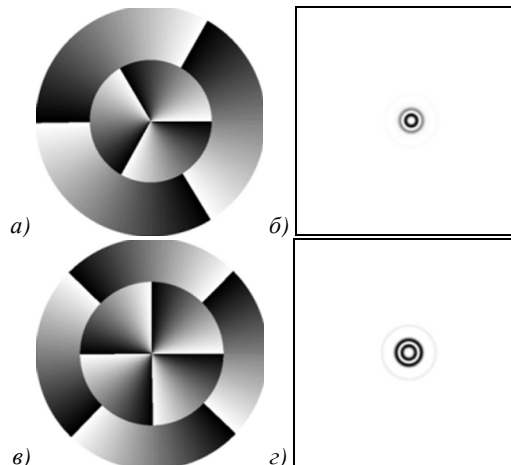


Рис. 2. ДОЭ и соответствующие им световые кольца с равными энергиями (а, б) и равными яркостями (в, г)

К сожалению, во всех кольцах этого пучка одинаковый порядок винтовой фазы. Это означает, что наклон волнового фронта в кольцах разный из-за разного диаметра (рис. 3).

При создании микротурбины с прямыми лопастями (то, что позволяет технология) эффективность передачи момента вращения от разных колец будет

разная. Для увеличения этой эффективности необходимо, чтобы наклон волнового фронта для разных световых колец был одинаковым.

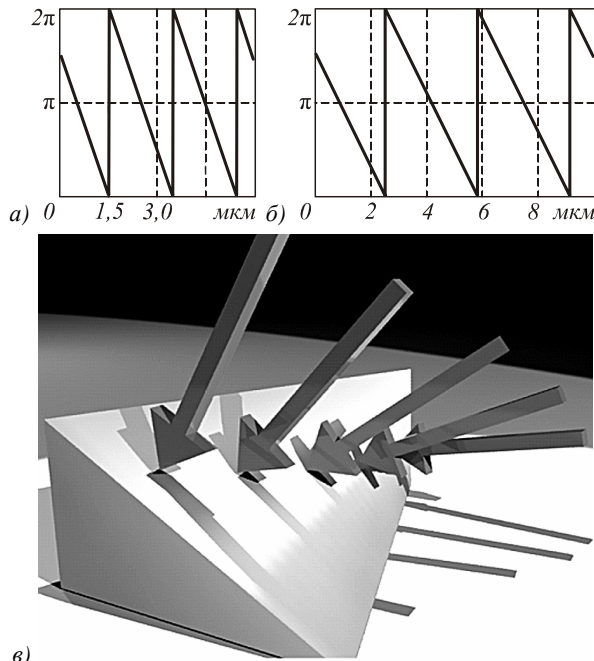


Рис. 3. Сечение фазовой функции вихревого пучка 3-го порядка по радиусу 1 мкм (а), сечение фазовой функции вихревого пучка 3-го порядка по радиусу 1,5 мкм (б), трёхмерная модель фазовой поверхности с изображением направления распространения света в виде стрелок (в)

К сожалению, создать элемент, который позволял бы формировать вихревые пучки кольцеобразной формы с разным номером сингулярности для каждого кольца, невозможно из-за интерференционных эффектов. Но для задачи вращения микротурбины кольцевая форма вихревого пучка не обязательна. Для того чтобы вращающий момент от вихревого пучка передавался микротурбине, должно выполняться условие равенства силы, действующей в целом на лопатку микротурбины при любой её ориентации:

$$I_s(\phi) = \int_0^R I(r, \phi) dr = \text{const}, \quad (1)$$

где  $I(r, \phi)$  – интенсивность вихревого пучка в полярных координатах с центром на оси пучка,  $I_s$  – суммарная интенсивность пучка по выделенному сектору. По сути это означает, что суммарная интенсивность на линии, проведённой из центра пучка, не должна изменяться при любом её повороте. Рассмотрим, можно ли сформировать световые пучки, удовлетворяющие этому условию. Для этого нужно сделать элемент, подобный приведённому на рис. 1, но с разными значениями порядков сингулярности для разных колец. Фазовая функция такого элемента определяется формулой

$$\Phi(r, \phi) = \begin{cases} \exp(in\phi), & r < R, \\ \exp(im\phi), & r \geq R. \end{cases} \quad (2)$$

где  $r, \phi$  – полярные координаты,  $R$  – граничный радиус, подбираемый эмпирическим путём.

Рассмотрим один из таких дифракционных оптических элементов (рис. 4а). Граничная область такого элемента представляет собой фазовый винт 1-го порядка, центральная область – фазовый винт 2-го порядка. На рис. 4б представлено распределение интенсивности в формируемом таким элементом пучке.

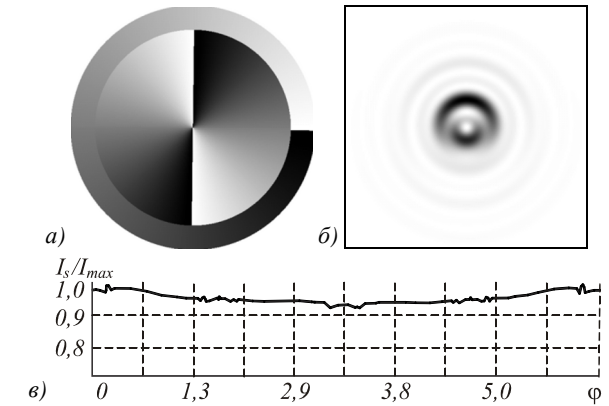


Рис. 4. Фазовая функция ДОО для формирования суперпозиции оптических вихрей 1-го и 2-го порядков (а), распределение интенсивности в суперпозиции оптических вихрей 1-го и 2-го порядков (б), график величины  $I_s$  в суперпозиции оптических вихрей 1-го и 2-го порядков (в)

Как видно из графика на рис. 4в, получившийся пучок удовлетворяет условию (1) (значение  $I_s$  почти не меняется), однако пучок несимметричен, что приведёт к проблемам при центровке микротурбины. Для устранения несимметричности попробуем увеличить порядки сингулярности оптических вихрей в суперпозиции, сохранив при этом разницу номеров порядков. На рис. 5а приведена фазовая функция дифракционного оптического элемента, формирующего суперпозицию оптических вихрей 4-го и 5-го порядков.

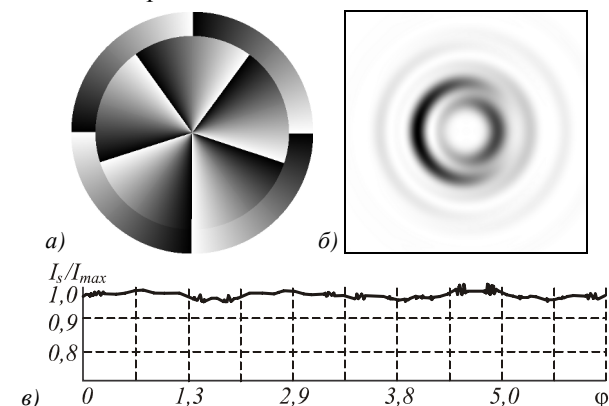


Рис. 5. Фазовая функция ДОО для формирования суперпозиции оптических вихрей 4-го и 5-го порядков (а), распределение интенсивности в суперпозиции оптических вихрей 4-го и 5-го порядков (б), график величины  $I_s$  в суперпозиции оптических вихрей 4-го и 5-го порядков (в)

Как видно из рис. 5, простое увеличение порядка входящих в суперпозицию оптических вихрей не приводит к существенному улучшению. Ещё один путь – увеличить разницу номеров порядков в суперпозиции.

На рис. 6а, в, д приведены фазовые функции дифракционных оптических элементов, формирующих суперпозиции с разницей номеров в 2, 3, 4 соответственно.

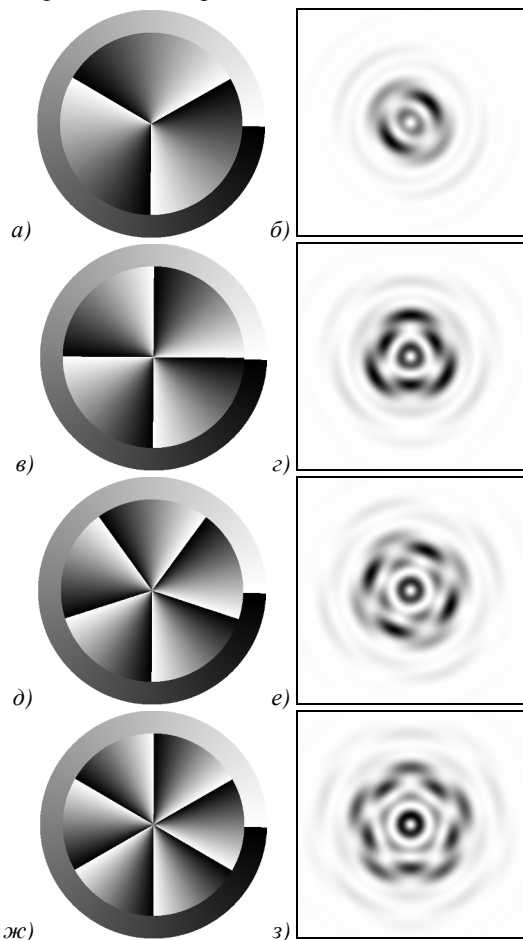


Рис. 6. Фазовые функции ДОО для формирования суперпозиций оптических вихрей с разницей номеров порядков 2, 3, 4, 5 соответственно (а, в, д, ж), распределение интенсивности в сформированных ими пучках (б, г, е, з)

Как видно из рис. 6, начиная с разницы номеров 2, наблюдаются вполне приемлемые распределения интенсивности по критерию симметрии. Также из рис. 6 следует вывод, что увеличение разницы номеров порядков ведёт к уширению вихревой кривой вокруг внутреннего кольца. Существенное расширение этой кривой нежелательно, т.к. в этом случае волновой фронт в крайних областях этой кривой будет иметь неоптимальный угол наклона, что приведёт к потере эффективности при передаче вращающего момента. На рис. 7 на распределения интенсивности в пучке нанесены окружности по радиусу максимальной эффективности передачи момента вращения.

Как видно из рис. 7, окружность максимальной эффективности передачи момента вращения для суперпозиции вихревых пучков 1-го и 4-го порядков проходит почти по внутренней границе вихревой кривой, для суперпозиции вихревых пучков 1-го и 5-го порядков – примерно по центру, а для суперпозиции вихревых пучков 1-го и 6-го – по внешней границе. На

основании этого можно предположить, что вращающий момент наиболее эффективно будет передаваться в суперпозиции вихревых пучков 1-го и 5-го порядков.

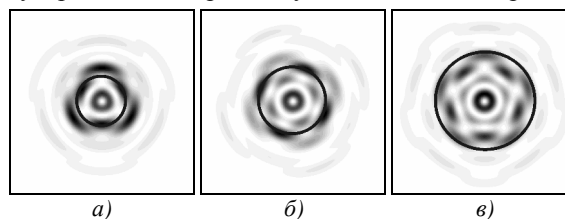


Рис. 7. Распределения интенсивности в суперпозиции вихрей 1-го и 4-го порядков (а), 1-го и 5-го порядков (б), 1-го и 6-го порядков (в) с наложенными окружностями оптимального радиуса

Для проверки этого предположения была построена математическая модель, способная оценивать величину переданного момента вращения от светового пучка к микротурбине заданной формы. На рис. 8 представлены разные сечения лопатки турбины.

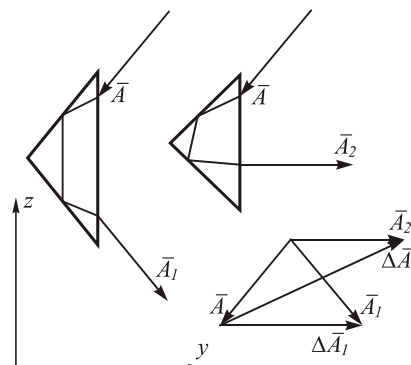


Рис. 8.  $A$  – падающий луч;  $A_1$  – луч, вышедший из лопатки с меньшим углом при основании;  $A_2$  – луч, вышедший из лопатки с большим углом при основании

Так, в случае с лучом  $A_1$  форма лопатки такова, что вихревой пучок, рассчитанный для неё, не оказывает давления, т.е. отсутствует  $z$  составляющая силы. Но при этом величина проекции силы на ось  $y$  не является максимально возможной, этот максимум достигается в сечении с лучом  $A_2$ . Но в этом случае появляется ненулевая компонента силы по оси  $z$ , что приводит к появлению силы трения в микромеханической системе. На основании приведённых сечений были построены трёхмерные модели микротурбин (рис. 9).

На рис. 9 представлены трёхмерные модели микротурбин как для случая отсутствующей  $z$  компоненты силы, так и для максимальной силы по координате  $y$ .

Расчёт сил, действующих на микротурбины, велся по методу, описанному в [15]. Для расчёта сил и момента вращения на основании метода, описанного в [15], была разработана специальная моделирующая программа. Окно работы этой программы представлено на рис. 10. Программа позволяет задавать как параметры вихревого пучка, так и параметры формы лопатки.

Используя разработанную программу, был проведён расчёт вращательного момента, действующего на микротурбину диаметром 20 мкм с формой лопа-

ток, исключая  $z$  компоненту силы в пучках, представленных на рис. 7.

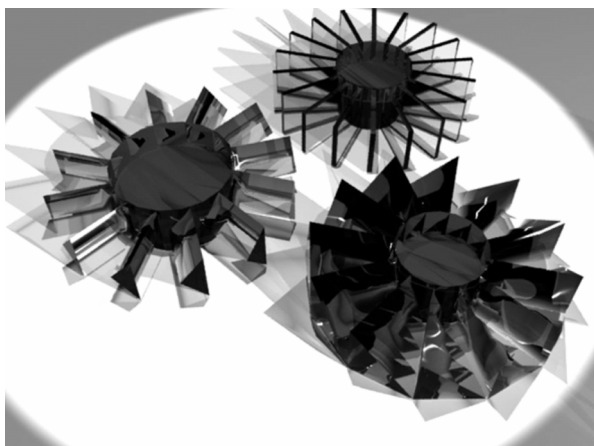


Рис. 9. Трёхмерные модели микротурбин для приёма вращательного момента от вихревых световых пучков

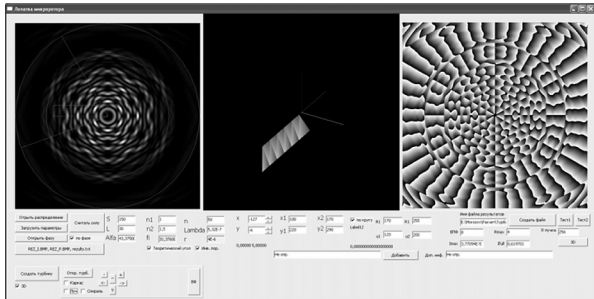


Рис. 10. Окно работы моделирующей программы

Таблица 1. Вращательный момент микротурбины в суперпозициях вихревых пучков

Пучок	Суперпозиция 1-го и 4-го порядков	Суперпозиция 1-го и 5-го порядков	Суперпозиция 1-го и 6-го порядков
Вращательный момент (Н·м)	$1,8 \cdot 10^{-15}$	$2,3 \cdot 10^{-15}$	$1,9 \cdot 10^{-15}$
Относительный вращательный момент	1	1,27	1,05

Как видно из табл. 1, наибольшим моментом обладает суперпозиция оптических вихрей 1-го и 5-го порядков. При фокусировке микрообъективом 90x диаметр сфокусированного пучка из суперпозиции оптических вихрей 1-го и 5-го порядков составляет 12 мкм. Соответственно, это является максимальным размером микротурбины, на которую этот пучок с максимальной эффективностью передаст момент вращения. Если требуется вращать микротурбину большего размера, а возможности технологии таковы, что микротурбина большего размера будет сделана более качественно, то необходимо формировать более широкий пучок.

**2. Формирование суперпозиции оптических вихрей высоких порядков**

Для уширения вихревых пучков из суперпозиций оптических вихрей есть два пути:

1. Сформировать суперпозицию двух оптических вихрей более высокого порядка.

2. Сформировать пучок из суперпозиции трёх и более оптических вихрей.

При формировании суперпозиции из двух вихревых пучков структура дифракционного оптического элемента остаётся прежней: границная область отвечает за формирование внутреннего кольца, а внутренняя область отвечает за формирование внешней кривой. Для выбора пучка нужно определиться с геометрическими параметрами микротурбины. Исходя из возможности технологии изготовления и прочностных свойств материалов, диаметр микротурбины должен быть не менее 20 мкм, но не более 30 мкм (для большего диаметра турбины потребуется слишком большая интенсивность пучка). Под эти размеры были рассчитаны дифракционные оптические элементы, представленные на рис. 11.

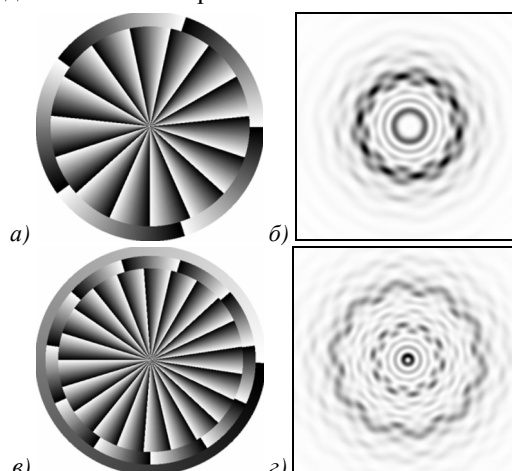


Рис. 11. Фазовые функции ДООЭ для формирования суперпозиций оптических вихрей 5-го и 15-го соответственно (а), суперпозиции 1-го, 11-го и 21-го порядков (в), распределение интенсивности в сформированных ими пучках (б, г)

На рис. 11б пучок – суперпозиция оптических вихрей 5-го и 15-го порядков. Диаметр пучка по внешней границе вихревой кривой – 22 мкм, диаметр внутреннего кольца – 8 мкм. На рис. 11г пучок из суперпозиции вихревых пучков 1-го, 11-го и 21-го порядков. Диаметр этого пучка по внешней границе вихревой кривой – 29 мкм, по внутреннему кольцу – 1,5 мкм. К сожалению, такая конфигурация неудобна с точки зрения изготовления микротурбины. Воспользоваться центральным кольцом в этом случае не представляется возможным, т.к. для этого придётся до предела утончить крепление лопаток к центральной оси (до 0,5 мкм), что недопустимо из соображений прочности. Для окончательного решения рассмотрим график зависимости  $I_s$  от полярного угла (рис. 12).

Как видно из рис. 12, величина  $I_s$  изменяется не более чем на 4% от максимального значения. При этом изменение носит стохастический характер, т.е. скорее связано с погрешностью дискретизации изображения. Это означает, что градиентные силы не будут тормозить вращение турбины и, следовательно



но, такой вихревой пучок можно использовать для вращения микротурбин.

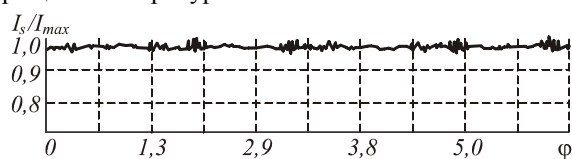


Рис. 12. Зависимость  $I_s$  от полярного угла для распределения интенсивности на рис. 11б

### 3. Экспериментальное формирование суперпозиций вихревых пучков

Для проведения экспериментов по формированию суперпозиций вихревых пучков было изготовлено несколько ДОЭ. Поскольку технология позволяет изготавливать только бинарные ДОЭ, то для экспериментов были рассчитаны закодированные аналоги полутоновых ДОЭ. Причём были изготовлены ДОЭ как для формирования пучков с несколькими кольцами и одинаковым номером сингулярности, так и ДОЭ для формирования суперпозиции вихревых пучков с разными номерами сингулярности ДОЭ. На рис. 13 представлен вид центральной части микрорельефа ДОЭ для формирования пучка, состоящего из оптических вихрей 6-го и 48-го порядков.

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 14. Нами был использован твёрдотельный лазер с длиной волны излучения 532 нм и расходимостью пучка 1,2 мрад. Две линзы, образующие коллиматор, были использованы для расширения пучка.

Апертура обрезала пучок до нужного диаметра. Камера использовалась для съёмки формируемых распределений интенсивности на удалении 1000 мм от ДОЭ.

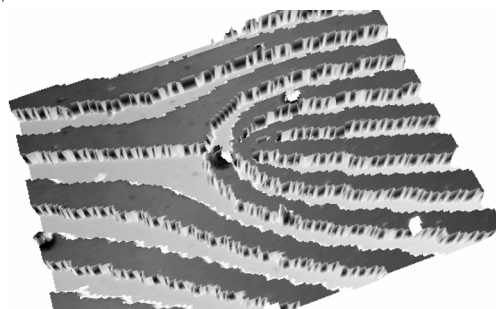


Рис. 13. Вид центральной части микрорельефа ДОЭ для формирования пучка, состоящего из оптических вихрей 6-го и 48-го порядков

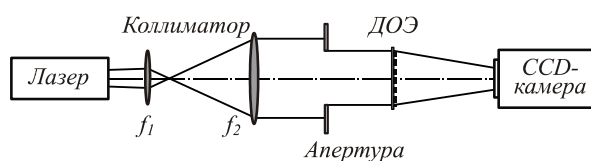


Рис. 14. Оптическая схема эксперимента

На рис. 15 представлены вихревые пучки с двумя и четырьмя кольцами, а также пучок, который является суперпозицией вихря первого порядка и вихря шестого порядка. Как видно из рис. 15, наблюдается качественное соответствие формируемых пучков результатам моделирования.

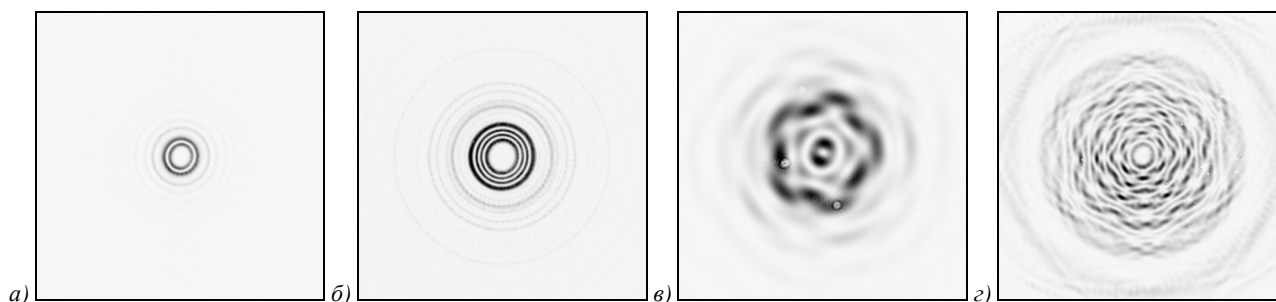


Рис. 15. Многокольцевые вихревые пучки: (а) два кольца, (б) четыре кольца, (в) суперпозиция вихрей первого и шестого порядков, (г) суперпозиция вихрей шестого и сорок восьмого порядков

### 4. Эксперименты по вращению агломераций микрочастиц в сложных вихревых пучках

Для проверки возможности вращения микрообъектов в сложных вихревых пучках был проведён ряд экспериментов. Для проведения эксперимента по вращению микрообъектов в сложных вихревых пучках была использована оптическая установка, схема которой приведена на рис. 16.

Для фокусировки лазерного пучка и формирования изображения для наблюдения использовались микрообъективы 20х. Лазерный пучок с длиной волны 532 нм и мощностью 1,8 Вт заводился вместе с фоновой подсветкой снизу, а наблюдение велось сверху в проходящем свете.

Вся система фокусировалась на верхнюю поверхность капли взвеси микрочастиц полистирола диамет-

ром 5 мкм. В эксперименте использовался бинарный ДОЭ диаметром 4 мм, формирующий сложный вихревой пучок, который освещался лазерным пучком с диаметром немного шире, чем диаметр элемента (5 мм). Вследствие этого в фокусе микрообъектива, помимо 2 порядков вихревого пучка, образовывался достаточно мощный центральный пик. Микрочастицы, находящиеся в растворе и попадающие в этот пик под действием светового давления, выталкивались на поверхность капли, где, сталкиваясь друг с другом, образовывали агломерации, которые вели себя уже как один более крупный микрообъект. Далее проводилось совмещение сложного вихревого пучка с получившейся агломерацией. Вращение агломерации микрочастиц в сложном вихревом пучке устойчиво наблюдалось в момент, когда высыхающая капля взвеси утончалась настолько, что внутренние микротоки жидкости

практически исчезли и не мешали захвату и вращению агломерации в вихревом пучке.

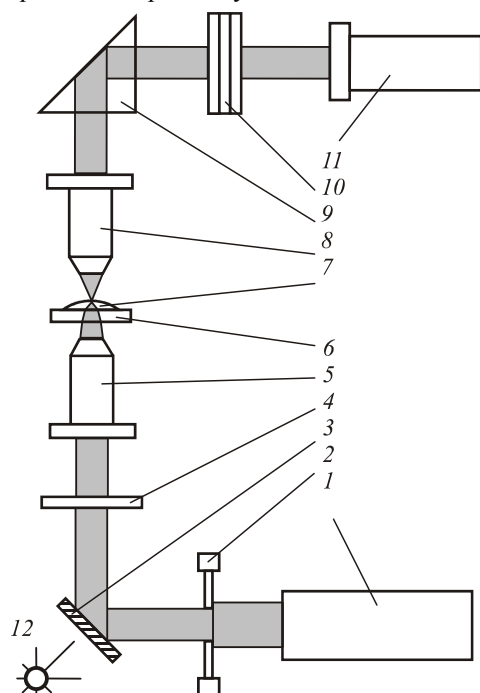


Рис. 16. Оптическая схема установки по вращению агломерации микрочастиц в сложном вихревом пучке: 1 – лазер; 2 – диафрагма; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – ДОЭ; 5 – микрообъектив(x20); 6 – предметное стекло; 7 – раствор; 8 – микрообъектив(x20); 9 – треугольная призма; 10 – набор светофильтров; 11 – CCD камера; 12 – фоновая подсветка.

Были использованы световые пучки, распределения интенсивности в которых представлены на рис. 15б, в, г.

На рис. 17 представлены стадии вращения агломерации полистироловых микрочастиц в пучке, представленном на рис. 15б.

Как видно из рис. 17, световой пучок вращает агломерацию микрочастиц с довольно высокой скоростью (линейная скорость агломерации на краю – 4–6 мкм/с).

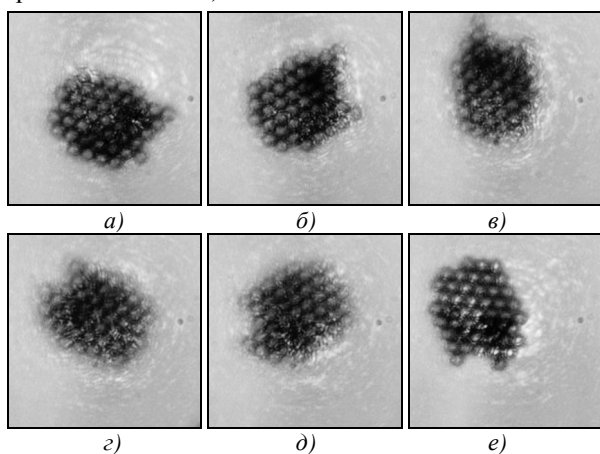


Рис. 17. Стадии движения агломерации полистироловых микрочастиц с интервалом 5 с в пучке, представленном на рис. 15б

На рис. 18 представлен эксперимент по вращению агломерации микрочастиц в пучке, представленном на рис. 15в.

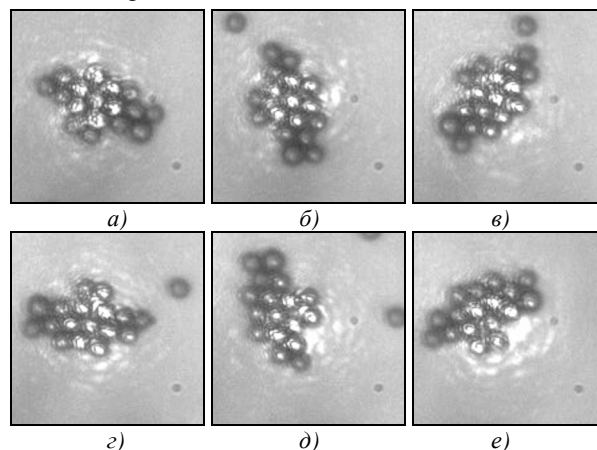


Рис. 18. Стадии движения агломерации полистироловых микрочастиц с интервалом 8 с в пучке, представленном на рис. 15в

Как видно из рис. 18, сложный некольцевой пучок вращает довольно крупную агломерацию микрообъектов, т.е. выполнение условия (1) обеспечивает возможность такого вращения. Следует заметить, что агломерация микрочастиц несимметрична, но наблюдаемое вращение даёт возможность утверждать, что сложные вихревые пучки при соблюдении условия (1) позволяют вращать любой сопоставимый с пучком по размеру микрообъект.

Был также проведён эксперимент для пучка, представленного на рис. 15г. Этот пучок является наиболее широким из трёх пучков, использованных в эксперименте. Поэтому для него была собрана наибольшая из всех агломерация микрочастиц. На рис. 19 представлены стадии движения этой агломерации полистироловых микрочастиц в пучке.

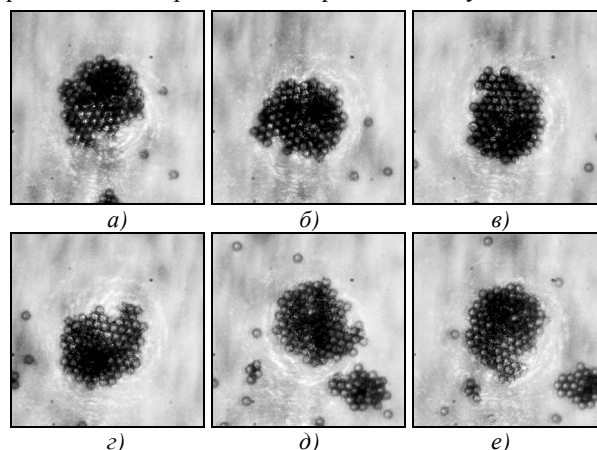


Рис. 19. Стадии движения агломерации полистироловых микрочастиц с интервалом 13 с в пучке, представленном на рис. 15г

Некоторое замедление вращения по сравнению с предыдущим экспериментом объясняется тем, что пучок более широкий и значительная часть энергии просто не попадает на агломерацию микрочастиц. Провести оценку действующих на агломерацию

микрочастиц сил довольно сложно, т.к. она представляет собой микрообъект слишком сложной формы. Поэтому пока в качестве положительного результата всех трёх экспериментов выступает подтверждение самой возможности вращения микрообъектов в таких пучках.

### Заключение

Проведённые в работе исследования подтверждают методом вычислительного и натурального экспериментов возможность формирования вихревых световых пучков, согласованных с микромеханическим элементом. При этом рассматривалась возможность согласования размера вихревого пучка с размером микромеханического элемента, а также формирования оптимального угла наклона волнового фронта в каждой точке микромеханического элемента. Проведённые эксперименты по вращению агломераций микрочастиц подтвердили возможность использования суперпозиций вихревых пучков, распределение интенсивности в которых не обладает осевой симметрией, для задачи вращения микрообъектов.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-4128.2012.9, грантов РФФИ №№ 13-07-97005, 12-07-31075.

### Литература

1. **Gauthier, R.C.** Theoretical model for an improved radiation pressure micromotor / R.C. Gauthier // *Applied Physics Letters*. – 1996. – V. 69. – P. 2015-2017.
2. **Gauthier, R.C.** Radiation-pressure-based cylindrically shaped microactuator capable of smooth, continuous, reversible, and stepped rotation. / R.C. Gauthier, M. Ashman, A. Frangioudakis, H. Mende and S. Ma // *Applied Optics*. – 1999. – V. 38. – P. 4850-4860.
3. **Gauthier, R.C.** Optical selection, manipulation, trapping, and activation of a microgear structure for applications in micro-optical-electromechanical systems / R.C. Gauthier, R.N. Tait, H. Mende and C. Pawlowicz // *Applied Optics*. – 2001. – V. 40. – P. 930-937.
4. **Gauthier, R.C.** Activation of micro components with light for micro-electro-mechanical systems and micro-optical-electro-mechanical systems applications / R.C. Gauthier, R.N. Tait and M. Ubriaco // *Applied Optics*. – 2002. – V. 41. – P. 2361-2367.
5. **Higurashi, E.** Optically induced rotation of anisotropic micro-objects fabricated by surface micromachining / E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka and O. Ohguchi // *Applied Physics Letters*. – 1994. – V. 64. – P. 2209-2210.
6. **Ukita, H.** Theoretical demonstration of a newly designed micro-rotator driven by optical pressure on a light incident surface / H. Ukita and K. Nagatomi // *Optical Review*. – 1997. – V. 4, N 4. – P. 447-449.
7. **Ukita, H.** Micromechanical photonics / H. Ukita // *Optical Review*. – 1997. – V. 4, N 6. – P. 623-633.
8. **Galajda, P.** Complex micromachines produced and driven by light / P. Galajda and P. Ormos // *Applied Physics Letters*. – 2001. – V. 78. – P. 249-251.
9. **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.

- and Biomedical Structures / G.M. Burrow, T.K. Gaylord // *Micromachines*. – 2011. – V. 2. – P. 221-257.
10. **Mohanty, S.K.** Self-rotation of an assembly of two or more cylindrical objects in optical tweezers: A simple approach for realization of optically driven micromotors CURRENT / S.K. Mohanty, P.K. Gupta, R.S. Verma // *SCIENCE*. – 2007. – V. 93, N 5.
11. **Tian, Ye** Solvent response of polymers for micromachine manipulation / Ye Tian, Yong-Lai Zhang, Hong Xia, Li Guo, Jin-Feng Ku, Yan He, Ran Zhang, Bin-Zong Xu, Qi-Dai // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2011. – V. 13. – P. 4835-4838.
12. **Li, L.** Fourkas: Achieving  $\lambda/20$  Resolution by One-Color Initiation and Deactivation of Polymerization / L. Li, R.R. Gattass, E. Gershgoren, H. Hwang // *Science*. – 2009. – V. 324. – P. 910-913.
13. **Maruo, S.** Optically driven micropump with a twin spiral microrotor / S. Maruo, A. Takaura, Y. Saito // *OPTICS EXPRESS*. – 2009. – V. 17, N 21. – P. 18525.
14. **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. Соيفер // *Компьютерная оптика*. – 2007. – Т. 31, № 1. – С. 14-21.
15. **Скиданов, Р.В.** Расчёт силы взаимодействия светового пучка с микрочастицами произвольной формы / Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2005. – Т. 28. – С. 18-21.

### References

1. **Gauthier, R.C.** Theoretical model for an improved radiation pressure micromotor / R.C. Gauthier // *Applied Physics Letters*. – 1996. – V. 69. – P. 2015-2017.
2. **Gauthier, R.C.** Radiation-pressure-based cylindrically shaped microactuator capable of smooth, continuous, reversible, and stepped rotation. / R.C. Gauthier, M. Ashman, A. Frangioudakis, H. Mende and S. Ma // *Applied Optics*. – 1999. – V. 38. – P. 4850-4860.
3. **Gauthier, R.C.** Optical selection, manipulation, trapping, and activation of a microgear structure for applications in micro-optical-electromechanical systems / R.C. Gauthier, R.N. Tait, H. Mende and C. Pawlowicz // *Applied Optics*. – 2001. – V. 40. – P. 930-937.
4. **Gauthier, R.C.** Activation of micro components with light for micro-electro-mechanical systems and micro-optical-electro-mechanical systems applications / R.C. Gauthier, R.N. Tait and M. Ubriaco // *Applied Optics*. – 2002. – V. 41. – P. 2361-2367.
5. **Higurashi, E.** Optically induced rotation of anisotropic micro-objects fabricated by surface micromachining / E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka and O. Ohguchi // *Applied Physics Letters*. – 1994. – V. 64. – P. 2209-2210.
6. **Ukita, H.** Theoretical demonstration of a newly designed micro-rotator driven by optical pressure on a light incident surface / H. Ukita and K. Nagatomi // *Optical Review*. – 1997. – V. 4, N 4. – P. 447-449.
7. **Ukita, H.** Micromechanical photonics / H. Ukita // *Optical Review*. – 1997. – V. 4, N 6. – P. 623-633.
8. **Galajda, P.** Complex micromachines produced and driven by light / P. Galajda and P. Ormos // *Applied Physics Letters*. – 2001. – V. 78. – P. 249-251.
9. **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.
10. **Mohanty, S.K.** Self-rotation of an assembly of two or more cylindrical objects in optical tweezers: A simple ap-

- proach for realization of optically driven micromotors  
CURRENT / S.K. Mohanty, P.K. Gupta, R.S. Verma // SCIENCE. – 2007. – V. 93, N 5.
11. **Tian, Ye** Solvent response of polymers for micromachine manipulation / Ye Tian, Yong-Lai Zhang, Hong Xia, Li Guo, Jin-Feng Ku, Yan He, Ran Zhang, Bin-Zong Xu, Qi-Dai // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2011. – V. 13. – P. 4835-4838.
  12. **Li, L.** Fourkas: Achieving  $\lambda/20$  Resolution by One-Color Initiation and Deactivation of Polymerization / L. Li, R.R. Gattass, E. Gershgoren, H. Hwang // Science. – 2009. – V. 324. – P. 910-913.
  13. **Maruo, S.** Optically driven micropump with a twin spiral microrotor / S. Maruo, A. Takaura, Y. Saito // OPTICS EXPRESS. – 2009. – V. 17, N 21. – P. 18525.
  14. **Skidanov, R.V.** An experimental study of the motion of dielectric spheres in light beams with angular high harmonic / R.V. Skidanov, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // Computer optics. – 2007. – V. 31, N 1. – P. 14-21. – (In Russian).
  15. **Skidanov, R.V.** The calculation of the interaction forces for beam with freeform microparticles / R.V. Skidanov // Computer optics. – 2005. – V. 28. – P. 18-21. – (In Russian).

## COMPLEX VORTEX BEAMS FOR OF ROTATION OF MICROMECHANICAL ELEMENTS

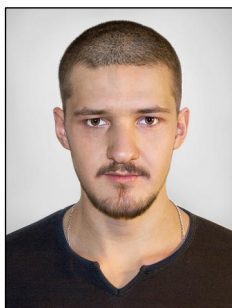
*A.A. Morozov, R.V. Skidanov  
Image Processing Systems Institute of the RAS,  
S.P. Korolyov Samara State Aerospace University  
(National Research University)*

### Abstract

Considered diffractive optical elements that form a complex vortex beams for rotating micromechanical elements. Presented experiment of the formation of the beams and experiment by the rotation of agglomerations of polystyrene microparticles in complex vortex beams.

**Key words:** vortex beams, micromechanical elements, superposition vortex beams.

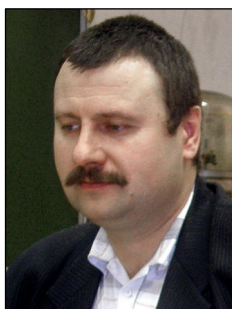
### Сведения об авторах



**Морозов Андрей Андреевич**, 1987 года рождения, в 2008 получил степень бакалавра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В 2010 получил степень магистра в СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». В списке научных работ А.А. Морозова 5 статей. Область научных интересов: дифракционная оптика.

E-mail: [ragefalcon@mail.ru](mailto:ragefalcon@mail.ru).

**Andrey Andreevich Morozov** (b. 1987) He received his bachelor of applied mathematics and physics (2008) in SSAU. He received his master of applied mathematics and physics (2010) in SSAU. He is co-author of 5 scientific papers. His research interests are currently diffractive optics.



**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 старшим научным сотрудником лаборатории лазерных измерений 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](mailto:romans@smr.ru).

**Roman Vasilevich Skidanov** (b. 1973) graduated with honours (1990) from the Samara State University (SSU), majoring in Physic. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State Aerospace University. He is the senior researcher laboratory of laser measurement at the 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 60 scientific papers, 3 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

*Поступила в редакцию 11 декабря 2012 г.*