

## ВРАЩЕНИЕ ДВУХЛЕПЕСТКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ ВИХРЕВОГО МИКРОАКСИКОНА

С.С. Стафеев<sup>1,2</sup>, Л. О'Фаолейн<sup>3</sup>, М.В. Котляр<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

<sup>3</sup> Технологический институт Корка, Ирландия

### Аннотация

С помощью вихревого микроаксикона с топологическим зарядом 2 и числовой апертурой около 0,6, изготовленного по технологии электронной литографии для длины волны 532 нм, продемонстрировано формирование в ближней зоне (несколько микронов от поверхности микроаксикона) вращающегося двухлепесткового лазерного пучка, расчётная скорость вращения которого линейно зависит от расстояния и равна  $55^\circ/\text{мкм}$  (теоретическая скорость  $53^\circ/\text{мкм}$ ) и экспериментальная скорость вращения только на некотором участке от 1,5 мкм до 3 мкм была линейной и совпадала с расчётной. На начальном участке от 0 до 1,5 мкм скорость была около  $66^\circ/\text{мкм}$ , а на конечном участке трассы от 3 мкм до 4,5 мкм –  $34^\circ/\text{мкм}$ . Достигнутая скорость вращения двухлепесткового пучка больше, чем скорости вращения других известных аналогичных вращающихся двухлепестковых лазерных пучков.

**Ключевые слова:** бинарная оптика, ближнепольная микроскопия, оптический вихрь, вращающиеся пучки.

**Цитирование:** Стафеев, С.С. Вращение двухлепесткового лазерного пучка в ближнем поле вихревого микроаксикона / С.С. Стафеев, Л. О'Фаолейн, М.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 385-391. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-385-391.

### Введение

Вращающиеся световые поля, у которых при распространении в свободном пространстве вращается вокруг оптической оси распределение интенсивности в поперечном сечении, нашли применение в микроскопии при измерении локализации и ориентации отдельных молекул [1], при зондировании атмосферы и в беспроводных системах связи [2], в передаче информации под водой [3], а также в датчиках магнитного поля [4].

Впервые вращающиеся оптические вихри – когерентные световые поля с сингулярной фазой, которые вращаются при распространении в свободном пространстве, рассмотрены в [5]. В [5] было получено условие для номеров линейной комбинации мод Лагерра–Гаусса (ЛГ), интенсивность которой как целое вращается при распространении. В [6] с помощью цифровой голограммы был сформирован вращающийся вихревой пучок, состоящий из суммы двух мод ЛГ с номерами (0, 0) и (4, 2) и имеющий распределение интенсивности в виде двух лепестков. В [6] экспериментально измерена угловая скорость вращения двухлепесткового пучка (ДЛП), которая оказалась непостоянной и на линейном участке была равна  $0,008^\circ/\text{мкм}$ . В [7] с помощью фазового дифракционного элемента были сформированы вращающиеся лазерные пучки, состоящие из двух мод Бесселя с топологическими зарядами  $-1$  и  $-3$ . Скорость вращения ДЛП составила  $0,006^\circ/\text{мкм}$ . В [7] скорость вращения ДЛП, в отличие от [6], была постоянной. В [8] с помощью ДЛП точно (ошибка 1,6%) измерена глубина резкости изображения. В [9] предложено с помощью пространственного модулятора света формировать функцию рассеяния точки в виде двух лепестков, которые вращаются вокруг оптической оси при распространении в пространстве. С помощью оптимизационной процедуры был рассчитан фазовый элемент,

эффективность которого при формировании ДЛП была равна 57%, хотя в эксперименте была достигнута эффективность только 37%. Сформированный ДЛП состоял из линейной комбинации многих мод ЛГ и формировался сферической линзой с числовой апертурой  $NA=0,71$ . При этом скорость вращения ДЛП вблизи фокуса в диапазоне от  $-1,5$  мкм до 1,5 мкм составляла  $50^\circ/\text{мкм}$ . В [10] ДЛП, состоящий из двух пучков Бесселя, был сформирован с помощью жидкокристаллического модулятора. Скорость вращения была постоянная и равна  $0,003^\circ/\text{мкм}$ . В [11] предлагается методика формирования пучков, интенсивность которых вращается вокруг оптической оси с ускорением. В частности, с помощью модулятора сформирован ДЛП, состоящий из двух мод Бесселя с номерами 1 и 3, вращающийся со средней скоростью  $0,0005^\circ/\text{мкм}$ . В [12] теоретически исследуются ДЛП с неоднородной поляризацией. В [13] с помощью многомодового оптического волокна сформированы ДЛП с различным состоянием поляризации. В [14, 15] с помощью жидкокристаллического модулятора света сформированы ДЛП, состоящие из нескольких мод ЛГ. Скорость вращения ДЛП нелинейная, но на линейном участке длиной около 10 мм она была равна  $0,15^\circ/\text{мкм}$ . В этой работе исследуется, как аберрации фокусирующей линзы влияют на вращение ДЛП. В [16] исследуется вращение однолепесткового поля вблизи вихревого аксикона.

В работах [1–4] ДЛП применяются для решения конкретных практически важных задач. Так, в [1] предложена схема флуоресцентного микроскопа (глубина фокуса 2 мкм) с поперечным и продольным разрешением 250 нм и 500 нм соответственно и функцией рассеяния точки в виде двух вращающихся лепестков (скорость вращения около  $50^\circ/\text{мкм}$ ). Предложенная схема позволила определить положение и

ориентацию отдельной молекулы с точностью 34 нм. В [2] показано относительно стабильное распространение ДЛП (длина волны 809 нм) на расстоянии 1,6 км в Ерлангене (Германия). Параметр Фрида турбулентности атмосферы был равен 20 мм. В [3] исследуется распространение оптического вихря (длина волны 450 нм) с несколькими лепестками в канале с турбулентной водой (коэффициент затухания  $cz = 13$ ). Коэффициент корреляции пучка на выходе  $r = 0,98$ . В [4] вращающийся ДЛП пропускали через магнито-оптический кристалл  $\text{Vi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , сам кристалл помещали в магнитное поле, которое приводило к изменению угла поворота ДЛП. Чувствительность этого метода определения магнитного поля равна  $28^\circ/\text{тесла}$ .

Почти во всех перечисленных выше статьях ДЛП формируются с помощью пространственных модуляторов света. Но если не требуется изменять параметры пучка, то для формирования ДЛП более эффективно использовать дифракционный оптический микроэлемент. В данной работе с помощью простого спирального микроаксикона с топологическим зарядом  $m = 2$  и числовой апертурой  $NA = 0,60$  сформирован ДЛП (длина волны 532 нм), интенсивность которого вращается в ближней зоне на расстоянии от 1 мкм до 4 мкм со скоростью  $55^\circ/\text{мкм}$ . Это скорость вращения ДЛП больше, чем во всех приведённых выше работах.

**Теоретические основания**

В [17] показано, что вращающиеся лазерные пучки можно сформировать с помощью любого известного в оптике вихревого модового базиса (моды Лагерра–Гаусса, Бесселя, гипергеометрические моды, моды Бесселя–Гаусса и т.д.). Лазерный пучок будет вращаться, если он состоит из линейной комбинации специально подобранных мод. Причём скорость вращения для разных мод будет разная. Для вращающегося пучка, состоящего из линейной комбинации мод ЛГ, скорость вращения равна [17]:

$$\varphi = -B \arctg(z / z_0), \tag{1}$$

где

$$B = \frac{2(n - n') + |m| - |m'|}{m - m'} = \text{const}, \tag{2}$$

$\varphi$  – полярный угол в поперечной плоскости пучка,  $z$  – продольная координата, направленная вдоль оптической оси,  $z_0 = kw^2/2$  – длина Рэлея,  $k$  – волновое число света,  $w$  – радиус перетяжки Гауссова пучка,  $(n, m)$  – номера моды ЛГ, которые определяют порядок многочлена Лагерра  $L_n^{|m|}(x)$ . В линейную комбинацию могут входить моды ЛГ, у которых номера  $(n, m)$  удовлетворяют условию (2). Из (1) видно, что на расстоянии  $z = z_0$  пучок повернется на угол  $B\pi/4$ , и при больших  $z$  пучок повернется на  $B\pi/2$ . Кроме того, из (1) видно, что скорость вращения пучка не равномерная, а уменьшается с ростом  $z$ .

Аналогично можно сформировать парааксиальный вращающийся световой пучок, состоящий из

мод Бесселя. Комплексная амплитуда такого пучка будет равна:

$$E(r, \varphi, z) = \sum_{n,m} C_{nm} J_m(k\alpha_n z) \exp(-ik\alpha_n^2 z / 2 + im\varphi), \tag{3}$$

где  $C_{nm}$  – произвольные комплексные коэффициенты,  $J_m(x)$  – функция Бесселя  $m$ -го порядка,  $\alpha_n$  – коэффициент, определяющий масштаб функции Бесселя. Скорость вращения пучка с комплексной амплитудой (3) линейно зависит от  $z$  и равна:

$$\varphi = kB_1 z / 2, \tag{4}$$

где

$$B_1 = \frac{\alpha_n^2 - \alpha_{n'}^2}{m - m'} = \text{const}. \tag{5}$$

Из сравнения (2) и (5) видно, что изменять скорость вращения пучка, состоящего из линейной комбинации мод ЛГ, можно дискретным способом, изменяя номера мод  $(n, m)$ . Если вращающийся пучок состоит из суперпозиции мод Бесселя (3), то скорость вращения (4) можно менять непрерывно, изменяя масштабный коэффициент  $\alpha_n$ . Другое преимущество мод Бесселя в том, что угол поворота пучка линейно зависит от пройденного расстояния  $z$ . Поэтому измерительное устройство на основе мод Бесселя легче калибровать.

В [1] предложена схема определения продольных координат объекта с разрешением большим, чем дифракционный предел, с помощью изображающей оптической системы с вращающейся двухлепестковой функцией импульсного отклика. Идея заключается в следующем: если объектная точка смещается вдоль оптической оси, то её изображение в виде двухлепестковой интенсивности будет вращаться вокруг оптической оси. Так как продольное разрешение идеальной оптической системы, определённое по полуспаду интенсивности, равно [18] (DOF, *depth of focus*)

$$\text{DOF} = \frac{\lambda}{2(\text{NA})^2}, \tag{6}$$

а поперечное разрешение (FWHM, *full width at half maximum*) равно

$$\text{FWHM} = \frac{\lambda}{2(\text{NA})}, \tag{7}$$

где  $\lambda$  – длина волны света, то измерять смещение двух лепестков интенсивности по окружности в поперечной плоскости можно с меньшим шагом (с большим разрешением), чем измерять смещение интенсивности в изображении вдоль оптической оси, в число раз:

$$\text{DOF} / \text{FWHM} = 1 / \text{NA}. \tag{8}$$

На практике точность метода ограничивается также шумом фотоприёмника [1] и абберациями оптической системы [14]. Из (8) видно, что преодоление предела разрешения при измерении угла поворота

ДЛП тем больше, чем меньше числовая апертура изображающей оптической системы. Для микроскопов с высокой числовой апертурой ( $NA = 1$ ) данный метод не позволяет преодолеть продольный дифракционный предел.

В данной работе мы с помощью дифракционного оптического изображающего микроэлемента (спирального аксикона [19] с топологическим зарядом  $m=2$ ), изготовленного по технологии электронной литографии и ионного травления в стекле с показателем преломления, близким к 1,5, сформировали ДЛП, который поворачивается на угол 240 градусов на расстоянии от нуля до 4,5 мкм от микроэлемента. Средняя скорость вращения ДЛП – 55 °/мкм.

**Моделирование**

Винтовой (или вихревой) аксикон с топологическим зарядом  $m=1$  был рассмотрен в [16, 19]. Для формирования ДЛП потребуется вихревой аксикон (ВА) с топологическим зарядом  $m=2$ . На рис. 1 показан бинарный шаблон для изготовления такого дифракционного ВА. Период кольцевой решётки (рис. 1) равен  $T_0=0,9$  мкм, радиус ВА  $R=15$  мкм. Микроаксикон имеет 15 периодов. Параметры моделирования: показатель преломления материала аксикона и подложки  $n=1,5$ , длина волны  $\lambda=532$  нм. Числовая апертура ВА  $NA=\lambda/T=0,56$ . Падающая на аксикон волна плоская с круговой поляризацией. Высота рельефа  $H=0,47$  мкм. Область моделирования –  $15 \times 15 \times 5,1$  мкм, шаг сетки –  $\lambda/30$ . Поперечные распределения интенсивности рассчитывались за аксиконом на расстоянии до 4 мкм. Расчёт прохождения света через ВА и далее проводился с помощью известного метода FDTD, реализованного в коммерческой программе Fullwave (фирмы RSoft).

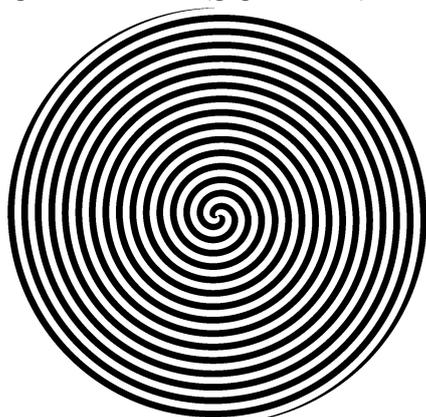


Рис. 1. Шаблон изготавливаемого ВА с топологическим зарядом  $m=2$

На рис. 2 показаны поперечные распределения интенсивности на некоторых плоскостях.

Расстояние между лепестками приблизительно 0,8 мкм. Размеры каждого из лепестков на расстоянии 4 мкм (рис. 2г) по полуспаду интенсивности равны: минимальный  $FWHM=0,438$  мкм ( $0,824\lambda$ ) и максимальный  $FWHM_y=0,57$  мкм ( $1,07\lambda$ ). Рассматриваемый аксикон работоспособен до расстояния 9 мкм. Это

видно из рис. 3, на котором показана зависимость интенсивности вдоль оптической оси аналогичного аксикона, только с топологическим зарядом  $m=0$ . Заметим, что длина, на которой аксикон проявляет свойство «бездифракционности», не зависит от  $m$ , а определяется только радиусом аксикона  $R$  и его числовой апертурой  $NA$ . Глубина фокусного пятна на рис. 3 составила  $DOF=5,96$  мкм по полуспаду интенсивности.

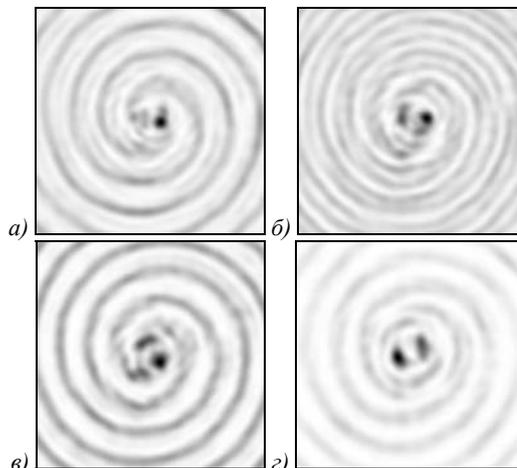


Рис. 2. Распределения интенсивности, рассчитанные на расстояниях от поверхности ВА: 1 мкм (а), 1,5 мкм (б), 2 мкм (в) и 4 мкм (г) (негативные изображения). Размеры кадров – 8×8 мкм

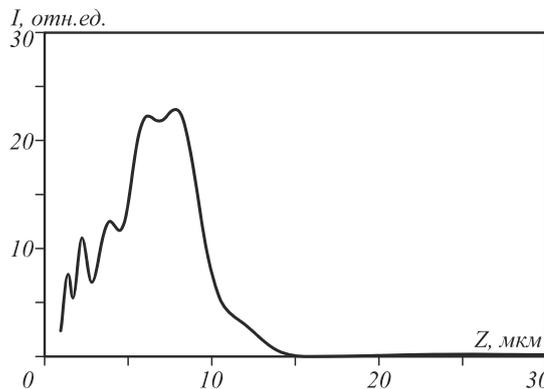


Рис. 3. Зависимость интенсивности на оси от расстояния  $z$  для аксикона с  $m=0$

На рис. 4 приведена зависимость угла поворота лепестков на рис. 2 от расстояния по оси  $z$ .

Из графика на рис. 4 видно, что максимальное отклонение одной точки данных от усредненной линии составляет не более  $\delta=10^\circ$ . Средняя скорость вращения максимумов ДЛП равна 55,43 °/мкм. Теоретическая скорость вращения, полученная на основе (4), равна:

$$\frac{\varphi}{z} = \frac{k\alpha^2}{2m} \tag{9}$$

Для аксикона параметр  $\alpha = \sin \theta = (\lambda/T)$ . В моделировании и эксперименте следующие параметры:  $\lambda=532$  нм,  $m=2$ ,  $T=0,95$  мкм. Поэтому скорость вращения согласно (9) равна 53 °/мкм. Это значение хорошо согласуется со скоростью (55,43 °/мкм), полученной при строгом моделировании векторной дифракции лазерного пучка на ВА.

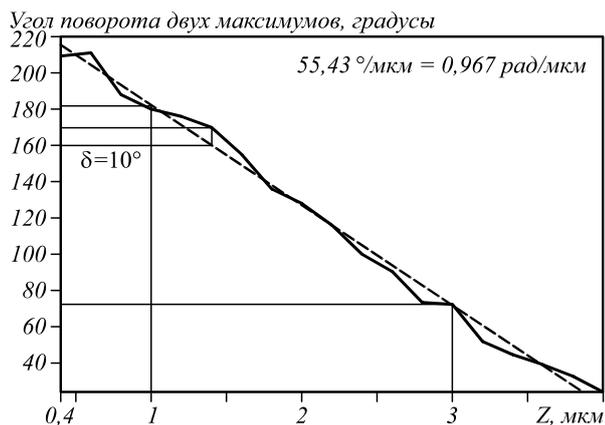


Рис. 4. Скорость вращения ДЛП в диапазоне  $z$  от 0,4 мкм до 4 мкм: сплошная прямая – результаты расчёта с шагом по оси  $z = 0,2$  мкм, а пунктирная прямая получена путём усреднения наклона линейных участков ломаной сплошной кривой

**Изготовление вихревого аксикона**

С помощью шаблона (рис. 1) микроаксикон изготавливался по технологии электронной литографии и ионного травления.

На рис. 5 показан рельеф центральной части ВА, измеренный на атомно-силовом микроскопе. Из рис. 5б видно, что период аксикона равен  $T = 0,95$  мкм, высота рельефа  $H = 470$  нм. Далее с помощью скани-

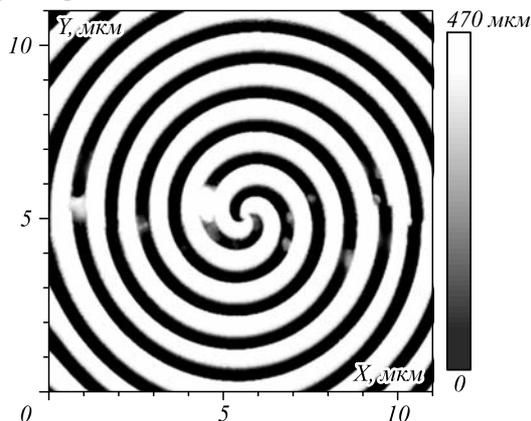


Рис. 5. Рельеф изготовленного ВА с  $m = 2$  (а) и его сечение вдоль оси  $y$  (б), измеренные на атомно-силовом микроскопе

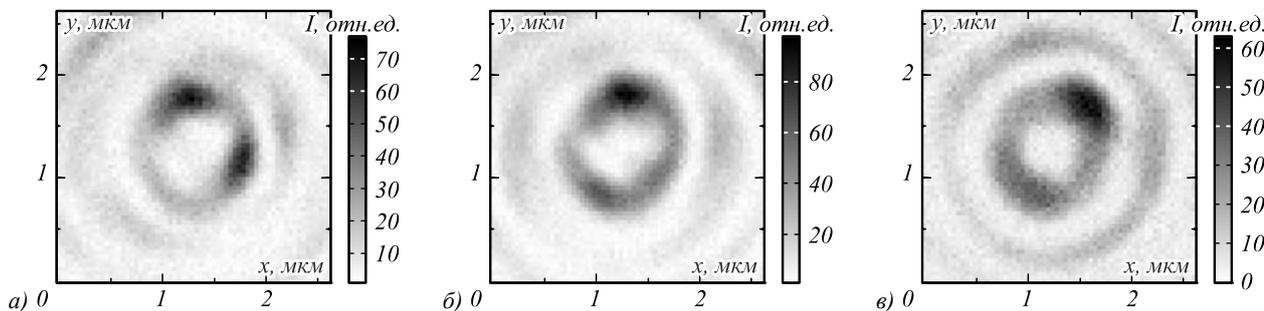


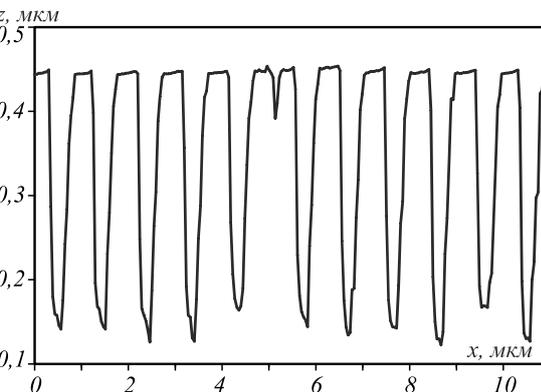
Рис. 6. Распределение интенсивности на расстоянии до поверхности ВА 1 мкм (а), 1,5 мкм (б) и 2 мкм (в) для пучка с правой круговой поляризацией

До расстояния  $z = 1,5$  мкм скорость вращения ( $66^\circ/\text{мкм}$ ) больше, чем рассчитанная (рис. 4), а после расстояния  $z = 3$  мкм скорость вращения меньше ( $34^\circ/\text{мкм}$ ), чем рассчитанная. Заметим,

рующего ближнепольного микроскопа измерялось прохождение света с круговой поляризацией и длиной волны  $\lambda = 532$  нм через ВА с топологическим зарядом  $m = 2$ . Круговая поляризация получалась из линейной после прохождения четвертьволновой пластинки. Поворотом четвертьволновой пластинки обеспечивалась смена направления поляризации с левой на правую. На рис. 6 приведены поперечные распределения интенсивности, измеренные с помощью сканирующего оптического ближнепольного микроскопа на расстояниях от вихревого аксикона 1 мкм (а), 1,5 мкм (б) и 2 мкм (в).

Из рис. 6 видно, что за 1 мкм пучок повернулся почти на 76 градусов. Отличия в распределении интенсивности ДЛП с правой и левой круговой поляризацией незначительное. На рис. 7 показаны сечения интенсивности ДЛП на одном и том же расстоянии от поверхности ВА.

По данным измерения интенсивности ДЛП на разных расстояниях получен график зависимости угла поворота ДЛП от расстояния  $z$  (рис. 8). Моделирование методом FDTD показывает линейный рост угла поворота, в то время как эксперимент демонстрирует нелинейное изменение. Из рис. 8 видно, что скорость вращения не совсем линейная и хорошо совпадает с расчетом ( $55^\circ/\text{мкм}$ ) только в диапазоне расстояний  $z$  от 1,5 мкм до 3 мкм.



что на рис. 8 приведены данные двух экспериментов, проведённые с двумя аксиконами, которые отличались друг от друга только глубиной рельефа (на 10%).

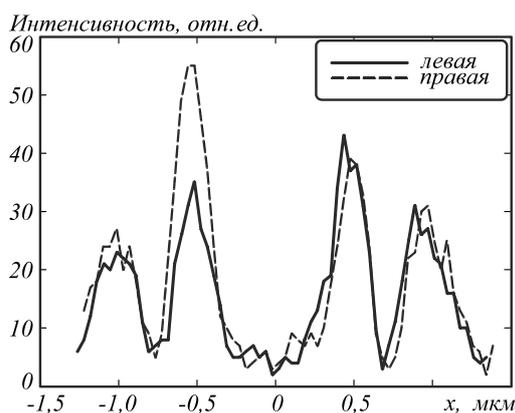


Рис. 7. Сечение интенсивности вдоль оси  $x$  для левой (сплошная кривая) и правой (пунктирная кривая) круговой поляризации на расстоянии 1 мкм от ВА

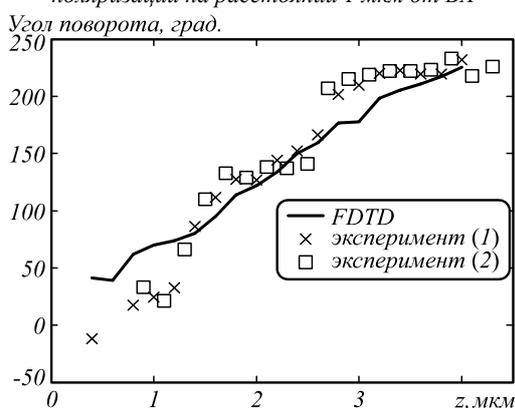


Рис. 8. Зависимость угла поворота максимумов ДЛП от расстояния до поверхности ВА.

Кривая – моделирование методом FDTD, маркеры – измерения для двух разных образцов вихревых аксиконов

### Заключение

В работе теоретически, численно и экспериментально показана возможность с помощью простого и хорошо известного компонента микрооптики (вихревого аксикона) с невысокой числовой апертурой (0,6) формировать вращающиеся двухлепестковые лазерные пучки ( $55^\circ/\text{мкм}$ ) на некотором расстоянии (от 0,5 мкм до 4,5 мкм) вблизи аксикона. По измерению поворотов лепестков интенсивности в поперечной плоскости можно определить продольное смещение исследуемого объекта с преодолением продольного дифракционного предела. И чем меньше числовая апертура оптического элемента, формирующего двухлепестковой вращающийся пучок, тем эффективнее применение данного метода. Изготовленный вихревой аксикон может быть использован в микроскопии при измерении локализации и ориентации отдельных молекул, при зондировании атмосферы и в беспроводных системах связи, в передаче информации под водой, а также в датчиках магнитного поля.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595) в части «Изготовление вихревого аксикона», Федерального агентства на-

учных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) в части «Теоретическое основание» и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-47-630483) в части «Моделирование».

### Литература

1. **Backlund, M.P.** The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and orientation / M.P. Backlund, M.D. Lew, A.S. Backer, S.J. Sahl, G. Grover, A. Agrawal, R. Piestun, W.E. Moerner // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8590. – 85900L. – DOI: 10.1117/12.2001671.
2. **Lavery, M.P.J.** Free-space propagation of high-dimensional structured optical fields in an urban environment / M.P.J. Lavery, C. Peuntinger, K. Gunthner, P. Banzer, D. Elser, R.W. Boyd, M.J. Padgett, C. Marquardt, G. Leuchs // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3, Issue 10. – e1700552. – DOI: 10.1126/sciadv.1700552.
3. **Morgan, K.S.** Free space propagation of concentric vortices through underwater turbid environments / K.S. Morgan, J.K. Miller, B.M. Cochennour, W. Li, Y. Li, R.J. Watkins, E.G. Johnson // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18. – 104004. – DOI: 10.1088/2040-8978/18/10/104004.
4. **Yu, S.** Compositing orbital angular momentum beams in Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> crystal for magnetic field sensing / S. Yu, F. Pung, H. Liu, X. Li, J. Yang, T. Wang // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 111, Issue 9. – 091107. – DOI: 10.1063/1.4989651.
5. **Abramochkin, E.** Spiral-type beams / E. Abramochkin, V. Volostnikov // *Optics Communications*. – 1993. – Vol. 102, Issues 1-3. – P. 336-350. – DOI: 10.1016/0030-4018(93)90406-U.
6. **Schechner, Y.Y.** Wave propagation with rotating intensity distributions / Y.Y. Schechner, R. Piestun, J. Shamir // *Physical Review E*. – 1996. – Vol. 54, Issue 1. – P. R50-R53. – DOI: 10.1103/PhysRevE.54.R50.
7. **Pääkkönen, P.** Rotating optical fields: experimental demonstration with diffractive optics / P. Pääkkönen, J. Lautanen, M. Honkanen, M. Kuittinen, J. Turunen, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, A.T. Friberg // *Journal of Modern Optics*. – 1998. – Vol. 45, Issue 11. – P. 2355-2369. – DOI: 10.1080/09500349808231245.
8. **Greengard, A.** Depth from diffracted rotation / A. Greengard, Y.Y. Schechner, R. Piestun // *Optics Letters*. – 2006. – Vol. 31, Issue 2. – P. 181-183. – DOI: 10.1364/OL.31.000181.
9. **Pavani, S.R.P.** High-efficiency rotating point spread functions / S.R.P. Pavani, R. Piestun // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, Issue 5. – P. 3484-3489. – DOI: 10.1364/OE.16.003484.
10. **Rob, R.** Generation and propagation dynamics of obstructed and unobstructed rotating orbital angular momentum-carrying Helicon beams / R. Rob, I.A. Litvin, A. Forbes // *Journal of Optics*. – 2012. – Vol. 14, Issue 3. – 035702. – DOI: 10.1088/2040-8978/14/3/035702.
11. **Schulze, C.** Accelerated rotation with orbital angular momentum modes / C. Schulze, F.S. Roux, A. Dudley, R. Rop, M. Duparré, A. Forbes // *Physical Review A*. – 2015. – Vol. 91, Issue 4. – 043821. – DOI: 10.1103/PhysRevA.91.043821.
12. **Wang, H.** Dynamic propagation of optical vortices embedded in full Poincaré beams with rotationally polarization symmetry / H. Wang, G. Rui, Q. Zhan // *Optics Communications*. – 2015. – Vol. 351. – P. 15-25. – DOI: 10.1016/j.optcom.2015.04.040.

13. **Khan, S.N.** Polarization and propagation characteristics of switchable first-order azimuthally asymmetric beam generated in dual-mode fiber / S.N. Khan, S.K. Chatterjee, P.R. Chaudhuri // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54, Issue 6. – P. 1528-1536. – DOI: 10.1364/AO.54.001528.
14. **Kotova, S.P.** Aberration influenced generation of rotating two-lobe light fields / S.P. Kotova, N.N. Losevsky, D.P. Prokopova, S.A. Samagin, V.G. Volostnikov, E.N. Vorontsov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 740(1). – 012013. – DOI: 10.1088/1742-6596/740/1/012013.
15. **Volostnikov, V.G.** Generation of two-lobe light fields with a rotating intensity distribution under propagation for single emitter spectroscopy / V.G. Volostnikov, E.N. Vorontsov, S.P. Kotova, N.N. Losevsky, D.V. Prokopova, E.V. Razueva, S.A. Samagin // *EPJ Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 132. – 02012. – DOI: 10.1051/epjconf/201713202012.
16. **Degtyarev, S.A.** Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon / S.A. Degtyarev, A.P. Porfiriev, S.N. Khonina // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, Issue 12. – P. 44-48. – DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
17. **Kotlyar, V.V.** Rotation of laser beams with zero of the orbital angular momentum / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Optics Communications*. – 2007. – Vol. 274, Issue 1. – P. 8-14. – DOI: 10.1016/j.optcom.2007.01.059.
18. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – 2-е изд. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
19. **Khonina, S.N.** Trochoson // S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M.V. Shinkaryev, G.V. Uspleniev // *Optics Communications*. – 1992. – Vol. 91, Issues 3-4. – P. 158-162. – DOI: 10.1016/0030-4018(92)90430-Y.

#### Сведения об авторах

**Стафеев Сергей Сергеевич**, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля.

E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com). ORCID: 0000-0002-7008-8007.

**О'Фаолейн Лиам (Уильям Веллан-Куртин)** из Технологического института Корка, Ирландия. В 2000 году окончил физический факультет Университета города Корк. С 2001 года начал работать в группе микрофотоники Школы физики и астрономии Университета города Сент-Эндрюс (Шотландия) как аспирант по созданию полупроводниковых лазеров. В 2005 году защитил диссертацию и получил степень доктора философии. Область научных интересов: электронная литография для создания фотонных кристаллов. В настоящее время является координатором европейской платформы по наноструктурированию ePIXnet. Соавтор 53 научных статей с высоким индексом цитирования. E-mail: [jww1@st-andrews.ac.uk](mailto:jww1@st-andrews.ac.uk).

**Котляр Мария Викторовна**, 1979 года рождения, доктор философии, научный сотрудник лаборатории НИЛ-35 Самарского национального исследовательского университета. В 2001 году окончила физический факультет Самарского государственного университета, в 2005 году защитила диссертацию в университете Сент-Эндрюса (Великобритания). Область научных интересов: нанофотоника. В Scopus 25 публикаций. E-mail: [ichteos@km.ru](mailto:ichteos@km.ru).

ГРНТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 26 февраля 2018 г. Окончательный вариант – 14 мая 2018 г.

#### ROTATION OF TWO-PETAL LASER BEAMS IN THE NEAR FIELD OF A SPIRAL MICROAXICON

S.S. Stafeev<sup>1,2</sup>, L.O'Faolain<sup>3</sup>, M.V. Kotlyar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,

<sup>2</sup>Samara National Research University, Samara, Russia,

<sup>3</sup>Cork Institute of Technology, Ireland

#### Abstract

Using a spiral microaxicon with the topological charge 2 and NA=0.6 operating at a 532-nm wavelength and fabricated by electron-beam lithography, we experimentally demonstrate the rotation of a two-petal laser beam in the near field (several micrometers away from the axicon surface). The estimated rotation rate is 55°/μm and linearly dependent on the on-axis distance, with the theoretical rotation rate being 53°/μm. The experimentally measured rotation rate is found to be linear and coincident with the simulation results only on the on-axis segment from 1.5 to 3 μm. The experimentally measured rotation rate is 66°/μm on the initial on-axis segment from 0 to 1.5 μm and 34°/μm on the final segment of the beam path from 3 to 4.5 μm. The experimentally achieved rotation rate is higher than rotation rates of similar two-petal laser beams reported to date.

**Keywords:** binary optics, near field microscopy, optical vortex, rotating beams.

**Citation:** Stafeev SS, O'Faolain L, Kotlyar MV. Rotation of two-petal laser beams in the near field of a spiral microaxicon. *Computer Optics* 2018; 42 (3): 385-391. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-385-391.

**Acknowledgements:** The work was partly funded by the Federal Agency for Scientific Organizations under contract No. 007-GZ/Ch3363/26 (Theoretical background), the Russian Foundation

for Basic Research under grant No. 16-47-630483 (Numerical simulation), and the Russian Science Foundation under grant No. 17-19-01186.

### References

- [1] Backlund MP, Lew MD, Backer AS, Sahl SJ, Grover G, Agrawal A, Piestun R, Moerner WE. The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and orientation. *Proc SPIE* 2013; 8590: 85900L. DOI: 10.1117/12.2001671.
- [2] Lavery MPJ, Peuntinger C, Gunthner K, Banzer P, Elser D, Boyd RW, Padgett MJ, Marquardt C, Leuchs G. Free-space propagation of high-dimensional structured optical fields in an urban environment. *Sci Adv* 2017; 3(10): e1700552. DOI: 10.1126/sciadv.1700552.
- [3] Morgan KS, Miller JK, Cochennour BM, Li W, Li Y, Watkins RJ, Johnson EG. Free space propagation of concentric vortices through underwater turbid environments. *J Opt* 2016; 18: 104004. DOI: 10.1088/2040-8978/18/10/104004.
- [4] Yu S, Pung F, Liu H, Li X, Yang J, Wang T. Compositing orbital angular momentum beams in Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> crystal for magnetic field sensing. *Appl Phys Lett* 2017; 111(9): 091107. DOI: 10.1063/1.4989651.
- [5] Abramochkin E, Volostnikov V. Spiral-type beams. *Opt Commun* 1993; 102(1-3): 336-350. DOI: 10.1016/0030-4018(93)90406-U.
- [6] Schechner YY, Piestun R, Shamir J. Wave propagation with rotating intensity distributions. *Phys Rev E* 1996; 54(1): R50-R53. DOI: 10.1103/PhysRevE.54.R50.
- [7] Pääkkönen P, Lautanen J, Honkanen M, Kuittinen M, Turunen J, Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Friberg AT. Rotating optical fields: experimental demonstration with diffractive optics. *J Mod Opt* 1998; 45(11): 2355-2369. DOI: 10.1080/09500349808231245.
- [8] Greengard A, Schechner YY, Piestun R. Depth from diffracted rotation. *Opt Lett* 2006; 31(2): 181-183. DOI: 10.1364/OL.31.000181.
- [9] Pavani SRP, Piestun R. High-efficiency rotating point spread functions. *Opt Express* 2008; 16(5): 3484-3489. DOI: 10.1364/OE.16.003484.
- [10] Rop R, Litvin IA, Forbes A. Generation and propagation dynamics of obstructed and unobstructed rotating orbital angular momentum-carrying Helicon beams. *J Opt* 2012; 14(3): 035702. DOI: 10.1088/2040-8978/14/3/035702.
- [11] Schulze C, Roux FS, Dudley A, Rop R, Duparré M, Forbes A. Accelerated rotation with orbital angular momentum modes. *Phys Rev A* 2015; 91(4): 043821. DOI: 10.1103/PhysRevA.91.043821.
- [12] Wang H, Rui G, Zhan Q. Dynamic propagation of optical vortices embedded in full Poincaré beams with rotationally polarization symmetry. *Opt Commun* 2015; 351: 15-25. DOI: 10.1016/j.optcom.2015.04.040.
- [13] Khan SN, Chatterjee SK, Chaudhuri PR. Polarization and propagation characteristics of switchable first-order azimuthally asymmetric beam generated in dual-mode fiber. *Appl Opt* 2015; 54(6): 1528-1536. DOI: 10.1364/AO.54.001528.
- [14] Kotova SP, Losevsky NN, Prokopova DP, Samagin SA, Volostnikov VG, Vorontsov EN. Aberration influenced generation of rotating two-lobe light fields. *J Phys: Conf Ser* 2016; 740(1): 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/740/1/012013.
- [15] Volostnikov VG, Vorontsov EN, Kotova SP, Losevsky NN, Prokopova DV, Razueva EV, Samagin SA. Generation of two-lobe light fields with a rotating intensity distribution under propagation for single emitter spectroscopy. *EPJ Web of Conf* 2017; 132: 02012. DOI: 10.1051/epjconf/201713202012.
- [16] Degtyarev SA, Porfirev AP, Khonina SN. Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon. *Appl Opt* 2016; 55(12): 44-48. DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
- [17] Kotlyar VV, Khonina SN, Skidanov RV, Soifer VA. Rotation of laser beams with zero of the orbital angular momentum. *Opt Commun* 2007; 274(1): 8-14. DOI: 10.1016/j.optcom.2007.01.059.
- [18] Born M, Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 4th ed. Oxford: Pergamon Press; 1970.
- [19] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Shinkaryev MV, Uspleniev GV. Trochoson. *Opt Commun* 1992; 91(3-4): 158-162. DOI: 10.1016/0030-4018(92)90430-Y.

### Authors' information

**Sergey S. Stafeev** (b. 1985) received Master's degree in Applied Mathematics and Physics in Samara State Aerospace University (2009). He received his PhD in 2012. He is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com). ORCID: 0000-0002-7008-8007.

**Liam O'Faolain (William Whelan-Curtin)** is from Cork Institute of Technology (Republic of Ireland) and studied for a degree in Physics at University College Cork. He joined the Microphotonics Research Group of School of Physics and Astronomy of SUPA, School of Physics and Astronomy of the University of St. Andrews (Scotland) in October 2001 to begin a PhD on Modelocked Semiconductor Lasers. He received the PhD degree in Physics in 2005. His other interests are electron beam lithography for photonic crystals. He also keeps records of the groups Fabrication Processes. He is now working as a PostDoc coordinating the ePIXnet Nanostructuring Platform. He is the author and coauthor of 53 scientific papers with high citation index. E-mail: [jww1@st-andrews.ac.uk](mailto:jww1@st-andrews.ac.uk).

**Maria V. Kotlyar** born in 1979, Ph.D., a researcher at the Laboratory 35 Samara Samara National Research University. In 2001 she graduated from the Physic department of Samara State University, in 2005 defended her thesis at the University of St. Andrews (UK). Research interests: nanophotonics. In the Scopus she has 25 publications. E-mail: [ichteos@km.ru](mailto:ichteos@km.ru).

*Received February 26, 2018. The final version – May 14, 2018.*