

## ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

### Экспериментальное исследование обратного потока энергии в фокусе

В.В. Котляр<sup>1,2</sup>, С.С. Стафеев<sup>1,2</sup>, А.Г. Налимов<sup>1,2</sup>, А.А. Ковалев<sup>1,2</sup>, А.П. Порфирьев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

#### Аннотация

С помощью двух одинаковых микрообъективов с числовой апертурой 0,95 было экспериментально показано, что интенсивность на оптической оси в плоскости фокуса оптического вихря с топологическим зарядом 2 равна нулю для света с правой круговой поляризацией и ненулевая для света с левой круговой поляризацией. Подтверждением того, что в последнем случае на оптической оси существует обратный поток энергии, является наличие в центре измеренного потока энергии слабого локального максимума (пятна Араго), объясняемого дифракцией прямого потока энергии на круге диаметром 300 нм (соответствует диаметру трубки обратного потока энергии). Сравнивая численные и экспериментальные распределения интенсивности, возможно определить диаметр трубки обратного потока – он равен расстоянию между нулями интенсивности. Для числовой апертуры 0,95 и длины волны 532 нм диаметр трубки обратного потока равен 300 нм. Также экспериментально показано, что при фокусировке цилиндрического векторного пучка второго порядка линзой с числовой апертурой 0,95 возникает осесимметричный поток энергии с очень слабым максимумом в центре (пятно Араго). Такое распределение объясняется дифракцией прямого потока энергии на круглой области диаметром 300 нм, в которой поток энергии обратный. Это также является подтверждением присутствия обратного потока энергии на оптической оси.

**Ключевые слова:** обратный поток энергии, острая фокусировка, оптический эксперимент, формулы Ричардса–Вольфа, FDTD-метод, оптический вихрь, цилиндрический векторный пучок.

**Цитирование:** Котляр, В.В. Экспериментальное исследование обратного потока энергии в фокусе / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.Г. Налимов, А.А. Ковалев, А.П. Порфирьев // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 863-870. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-763.

**Citation:** Kotlyar VV, Stafeyev SS, Nalimov AG, Kovalev AA, Porfirev AP. Experimental investigation of the energy backflow in the tight focal spot. Computer Optics 2020; 44(6): 863-870. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-763.

#### Введение

Оптические вихревые пучки известны давно [1]. Такие пучки имеют спиральную фазу, что влияет на свойства распространения этих пучков [2]. Интерес к ним обуславливается их широким применением. Вихревые лазерные пучки используются в телескопах для обнаружения экзопланет [3], захвата и управления движением микрочастиц в оптическом пинцете [4, 5], вращения частиц оптическим гаечным ключом [6], передачи микрочастице углового момента [7], увеличения объёма передачи информации в системах оптической связи [8], в квантовой информатике [9, 10] и высокоразрешающей электронной микроскопии [11]. Еще одна возможность использования оптических вихрей – создание пучков с областью, где направление распространения энергии противоположно направлению распространения пучка [12–15]. Ранее мы продемонстрировали, что в остром фокусе оптического вихря с целым топологическим зарядом

больше единицы и круговой поляризацией возникает обратный поток энергии [12], и если топологический заряд равен двум, то обратный поток возникает на оптической оси [13]. Аналогичным образом обратный поток формируется в остром фокусе поляризационного вихря [14]. В [15] показано, что обратный поток можно сформировать с помощью металинзы.

Ранее эффект обратного распространения световой энергии изучался и другими исследователями, например, в работах [16–24], однако ранее демонстрировавшийся обратный поток был мал по величине по сравнению с прямым потоком и наблюдался в областях, отдаленных от точки фокуса. В [16, 17] демонстрировалось, что обратные потоки энергии наблюдаются даже в достаточно простых случаях: в классической работе Ричардса и Вольфа [16] обратный поток энергии возникал в остром фокусе при фокусировке плоской волны с линейной поляризацией, в [17] – в интерференционной картине четырех плоских волн (при этом автор посчитал, что такой резуль-

тат не имеет физического смысла). Круговые потоки энергии, возникающие в плоскости вдоль оси распространения пучка и содержащие обратные потоки энергии, наблюдались в работах [19–21]. В [22] теоретически получены выражения для плотности вектора Пойнтинга X-пучков и получены необходимые условия для появления обратного потока энергии. Существование обратного потока энергии численно демонстрировалось для непараксиальных ускоряющихся пучков Эйри и непараксиальных параболических пучков Вебера [23, 24].

В работе [25] было показано, что обратный поток энергии должен воздействовать на электрически нейтральные частицы, обладающие проводимостью. При этом размер таких частиц должен быть значительно меньше длины волны. В качестве примера таких частиц можно назвать частицы ZnO, в последнее время отмечается рост применения частиц из оксида цинка с размерами порядка десятков и сотен нанометров в медицинских приложениях [26–28], для задач детектирования [29], создания метаматериалов [30], использования в солнечных батареях [31–32] и т.д.

В данной работе с помощью двух одинаковых микрообъективов с числовой апертурой 0,95 мы измерили распределение потока энергии в остром фокусе оптического вихря с топологическим зарядом 2 и круговой поляризацией, а также цилиндрического векторного пучка второго порядка. В обоих случаях было получено схожее распределение потока энергии со слабым локальным максимумом (точнее седловой точкой) в центре фокуса, обусловленным дифракцией прямого потока энергии на круге (с диаметром примерно 300 нм), ограничивающем трубку обратного потока энергии. Это первое доказательство существования и реальности обратного потока энергии.

Также мы показали, что рэлеевская частица, помещенная в область обратного потока энергии, должна двигаться в сторону, противоположную направлению распространения пучка. Таким образом, обратный поток энергии в остром фокусе оптического вихря в [14] достаточен для создания диссипативной силы, тянущей микрочастицу назад – в сторону источника излучения.

### 1. Эксперимент по обнаружению обратного потока в фокусе оптического вихря с круговой поляризацией

На рис. 1 изображена оптическая схема проведенного эксперимента. Линейно-поляризованный свет от твердотельного лазера (длина волны  $\lambda = 532$  нм) пространственно фильтровался пинхолом PH с диаметром 40 мкм и коллимировался сферической линзой  $L_1$  ( $f_1 = 250$  мм). Затем лазерный пучок проходил через пространственный модулятор света (HOLOEYE LC 2012, количество ячеек –  $1024 \times 768$ , размер отдельной ячейки – 36 мкм) с фазой голограммы «вилки», которая формировала в первом порядке дифракции оптический вихрь с топологическим зарядом +2 или -2. Линзы  $L_2$  ( $f_2 = 150$  мм),  $L_3$  ( $f_3 = 150$  мм) и диафрагма D образовывали 4-f систему, которая формировала изображение в плоскости входного зрачка микрообъектива  $MO_1$  ( $100\times$ ,  $NA = 0,95$ ). Поляризатор P и четвертьволновая пластинка Q использовались для преобразования линейно-поляризованного пучка в пучок с левой круговой поляризацией. С помощью второго микрообъектива  $MO_2$  ( $100\times$ ,  $NA = 0,95$ ) распределение интенсивности оптического вихря, сфокусированного первым микрообъективом, изображалось на матрицу CMOS-камеры TourCam UCMOS08000KPB (размер матрицы –  $3264 \times 2448$ , размер пикселя – 1,67 мкм). Разрешение линзы с числовой апертурой 0,95 примерно равно 280 нм ( $0,5\lambda/NA$ ).

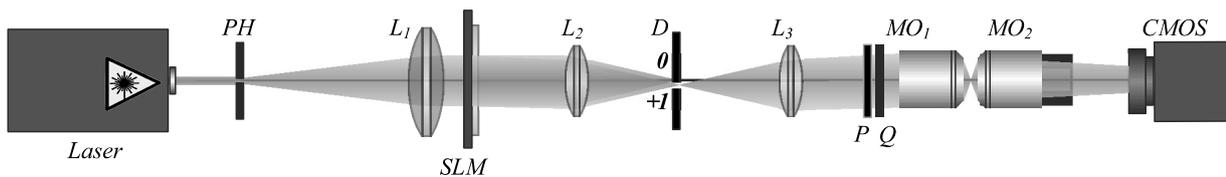


Рис. 1. Схема эксперимента: Laser – твердотельный лазер, излучающий линейно-поляризованный Гауссов пучок, PH – пинхол (диаметр 40 мкм),  $L_1, L_2, L_3$  – сферические линзы ( $f_1 = 250$  мм,  $f_2 = 150$  мм,  $f_3 = 150$  мм), SLM – пространственный модулятор света (HOLOEYE LC 2012), D – диафрагма для блокирования нулевого порядка дифракции, P – поляризатор, Q – четвертьволновая пластинка,  $MO_1, MO_2$  – микрообъективы (Nikon 100X/0.95 OFN25 WD0.3 CF Plan100 $\times$ ,  $NA = 0,95$ ), CMOS – камера (TourCam UCMOS08000KPB)

Два одинаковых микрообъектива нужны, чтобы собрать всю энергию, которая прошла через первый микрообъектив, и скомпенсировать aberrации. На рис. 2 показано поперечное распределение интенсивности, измеренное с помощью оптической схемы на рис. 1, в фокусе оптического вихря с топологическим зарядом  $m = 2$  и правой круговой (рис. 2а) или левой круговой (рис. 2б) поляризацией. Сечения интенсивности показаны на рис. 2в, г. Как видно из рис. 2, интенсивность на оптической оси ( $x = 0$ ) равна нулю для света с правой круговой поляризацией (рис. 2в), в то

время как для левой круговой поляризации (рис. 2г) она ненулевая. Распределения интенсивности на рис. 2 были переэкспонированы, чтобы сделать ненулевую интенсивность вблизи оптической оси на рис. 2г более заметной.

Оптический вихрь с топологическим зарядом  $m = 2$  и круговой поляризацией имеет вид:

$$\mathbf{E} = \frac{A(\theta)e^{i2\varphi}}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i\sigma \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \frac{A(\theta)e^{i2\varphi}}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -i\sigma \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\sigma=1$  для света с правой круговой поляризацией и  $\sigma=-1$  для света с левой круговой поляризацией,  $A(\theta)$  – действительная функция распределения ампли-

туды в плоскости входного зрачка апланатической системы. Описание поля (1) в остром фокусе дано в [33].

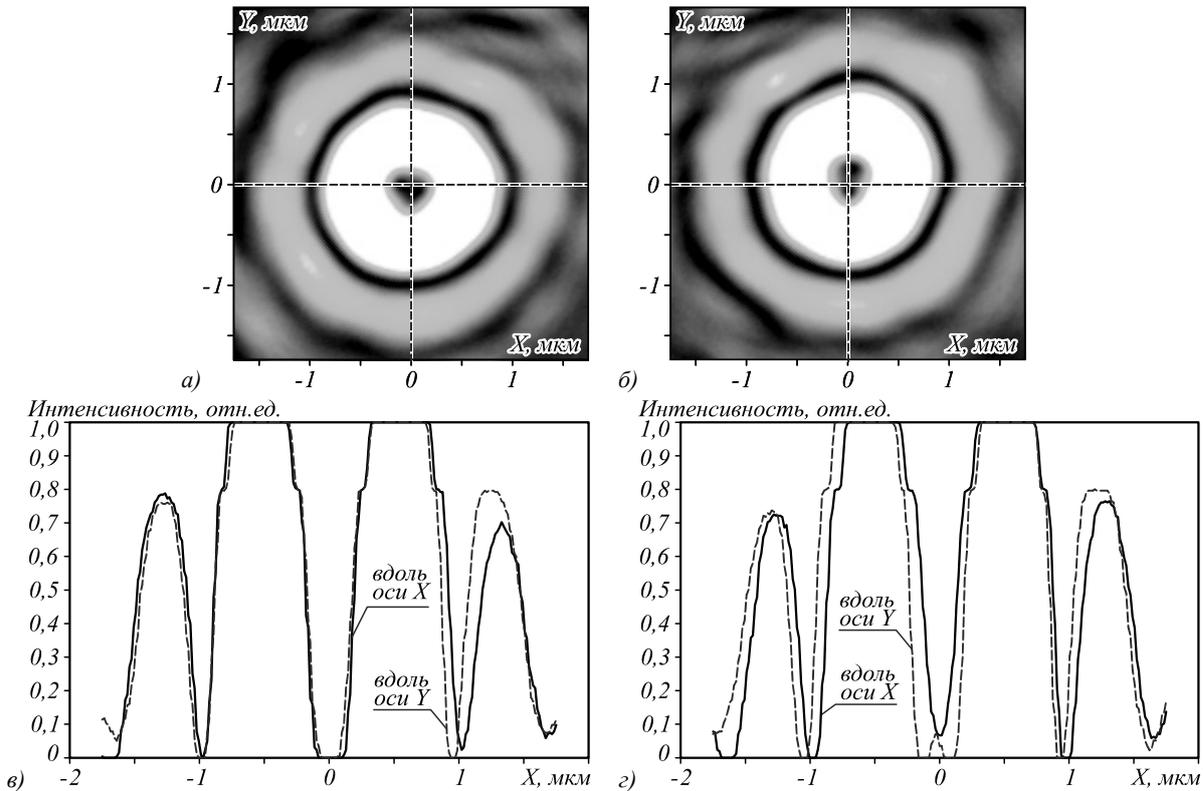


Рис. 2. Распределение интенсивности, измеренное в фокусе оптического вихря с топологическим зарядом  $m = 2$  и правой круговой (а) или левой круговой (б) поляризацией. Соответствующие сечения интенсивности вдоль декартовых осей (кривая 1 – вдоль оси  $x$ , кривая 2 – вдоль оси  $y$ ) для правой круговой (в) и левой круговой (г) поляризации. Размер картинка для 2D - распределения (а, б) –  $3,5 \times 3,5$  мкм

На рис. 3 изображено сечение поперечной составляющей интенсивности  $|E_x|^2 + |E_y|^2$ , рассчитанное методом FDTD в фокусной плоскости оптического вихря (1) с правой и левой круговой поляризацией. Фокусировка осуществлялась бинарной зонной пластинкой Френеля с числовой апертурой  $NA = 0,95$ , радиусом  $R = 4$  мкм и фокусным расстоянием  $f = 1,31$  мкм. Длина волны  $\lambda = 532$  нм, размер сетки FDTD –  $\lambda/30$ .

Разница между моделированием и экспериментом (большие боковые пики и меньшая интенсивность на оси) может быть объяснена тем, что FDTD-моделирование проводилось для дифракционной линзы (рис. 3, 4), в то время как в эксперименте использовался рефракционный объектив (рис. 1). Из рис. 2г видно, что интенсивность вблизи оптической оси не симметрична. Причина в том, что оптический вихрь с топологическим зарядом 2 нестабилен и разделяется на два оптических вихря с топологическим зарядом 1 (на рис. 2б), два изолированных нуля интенсивности расположены вблизи вертикальной оси в центре.

На рис. 4 показано сечение продольной компоненты вектора Пойнтинга  $S_z$ , полученное при моделировании FDTD-методом фокусировки оптического

вихря (1) с правой круговой или левой круговой поляризацией. Параметры моделирования такие же, как у моделирования, результаты которого изображены на рис. 3.

Обратный поток энергии не может быть напрямую измерен экспериментально, так как может быть измерена лишь та часть интенсивности или потока энергии, которая прошла через микробъектив  $MO_2$  на рис. 1. Можно только утверждать, согласованы ли распределения, изображенные на рис. 2–4.

Распределение интенсивности вблизи оптической оси на рис. 2г аналогично распределению потока энергии оптического вихря (рис. 4). Интересно, что координаты нулей интенсивности на рис. 2г определяют диаметр (расстояние между нулями) обратного потока – окружности диаметром примерно 300 нм, на которой поток нулевой. Похожая ситуация будет возникать и для поляризационного вихря. Тот факт, что интенсивность отлична от нуля в точках с нулевым обратным потоком, не должен вызывать удивление. Этот эффект проявляется для стоячей волны, поток которой равен нулю, но интенсивность нулю не равна. Энергия на оптической оси на рис. 2г появляется из-за того, что свет в прямом потоке энергии, идущий к наблюдателю, отклоняется из-за ди-

фракции в область обратного потока энергии (к оптической оси) и формирует субволновое пятно Пуассона (или Араго).

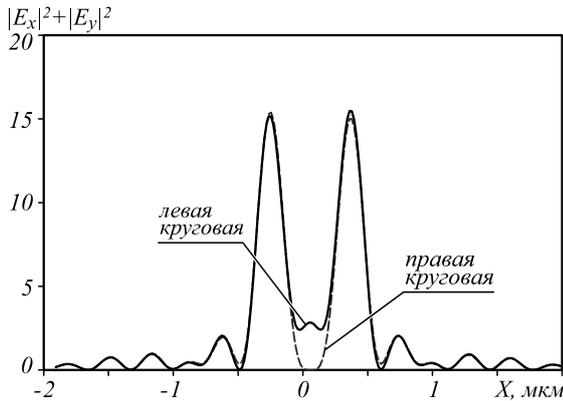


Рис. 3. Сечение интенсивности, рассчитанное методом FDTD в фокусе оптического вихря с топологическим зарядом  $m = 2$  и правой/левой круговой поляризацией

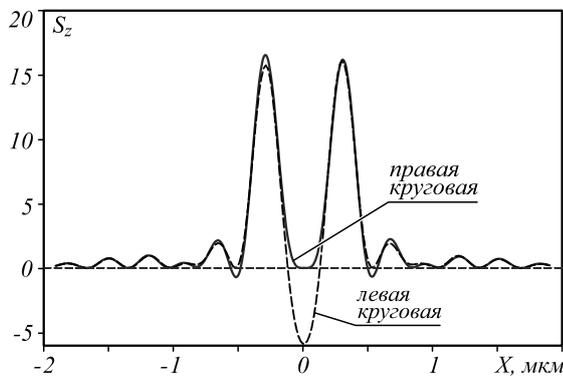


Рис. 4. Сечение продольной компоненты вектора Пойнтинга, рассчитанное методом FDTD в фокусе оптического вихря с топологическим зарядом  $m = 2$  и правой /левой круговой поляризацией

На рис. 5 показано рассчитанное распределение интенсивности  $|E_x|^2 + |E_y|^2$  и продольной компоненты вектора Пойнтинга  $S_z$  в фокальной плоскости при фокусировке оптического вихря с топологическим зарядом  $m = 2$  и левой круговой поляризацией. Из рис. 5 можно видеть, что диаметр круга с нулевым потоком ( $S_z = 0$ ) примерно совпадает с расстоянием между двумя локальными минимумами интенсивности. На рис. 5 этот диаметр примерно равен 300 нм. Расстояние между нулями интенсивности на экспериментальной картинке (рис. 2г) также примерно 300 нм.

## 2. Эксперимент по обнаружению обратного потока в фокусе поляризационного вихря второго порядка

Острая фокусировка поляризационного вихря исследовалась ранее в [33]. Вектор Джонса таких пучков имеет вид

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} -\sin 2\varphi \\ \cos 2\varphi \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} -\cos 2\varphi \\ -\sin 2\varphi \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – азимутальный угол в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$ .

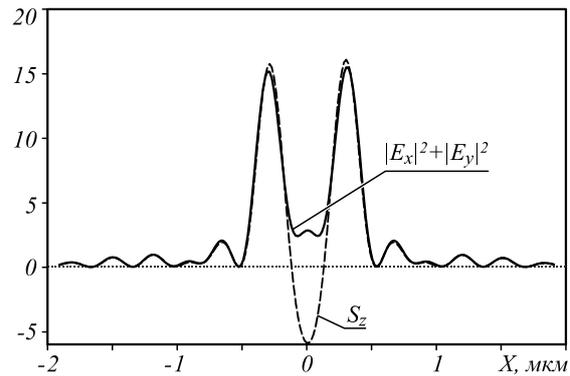


Рис. 5. Рассчитанное распределение интенсивности  $|E_x|^2 + |E_y|^2$  и продольной компоненты вектора Пойнтинга  $S_z$  в фокальной плоскости оптического вихря с топологическим зарядом  $m = 2$  и левой круговой поляризацией. Все параметры моделирования аналогичны параметрам моделирования с результатами, изображенными на рис. 3 и 4

На рис. 6 показан результат другого эксперимента, в котором пространственный модулятор света на рис. 1 был заменен на q-пластинку (поляризатор P и четвертьволновая пластинка Q при этом отсутствовали), которая преобразует линейную поляризацию в цилиндрический векторный пучок второго порядка. На рис. 6а – в распределение интенсивности показано при разных степенях экспонирования с целью визуализации слабой интенсивности в центре картинке. На рис. 6б показаны сечения вдоль декартовых осей переэкспонированной интенсивности с рис. 6б. Из рис. 6в видно, что в соответствии с теорией (рис. 7д, е) наблюдаются два локальных минимума интенсивности (два нуля интенсивности) вблизи оптической оси в фокальной плоскости цилиндрического векторного пучка второго порядка. Эти нули интенсивности (аналогично рис. 2г) обозначают границу обратного потока энергии, и расстояние между ними равно диаметру трубки обратного потока – 300 нм.

На рис. 7а показано направление поляризации в поперечном сечении пучка ( $\lambda = 532$  нм) со вторым порядком поляризационной сингулярности, который затем был сфокусирован апланатическим объективом с числовой апертурой  $NA = 0,95$ . На рис. 7б показано распределение интенсивности вблизи фокуса в плоскости YZ. Стрелки указывают направление потока энергии S. В соответствии с рис. 7д два нуля интенсивности совпадают с точкам нулей потока энергии. Следовательно, трубка обратного потока энергии вдоль оптической оси имеет диаметр около 300 нм (рис. 7д).

В эксперименте (рис. 2) была отмечена интересная особенность. Важно четко понимать, что конкретно зарегистрировано на экспериментальной картинке на рис. 2. Все распределения на рис. 2–4 имеют примерно одинаковый размер и круговую симметрию. В этом случае невозможно точно определить, было ли

измерено поперечное распределение интенсивности или поток энергии. Эта неопределенность устраняется во втором эксперименте. Экспериментальная картина на рис. 6 является осесимметричной в фокусе, подобно картине потока энергии (рис. 7в), и отлича-

ется от поперечного распределения интенсивности (рис. 7г). Таким образом, второй эксперимент (рис. 6) однозначно демонстрирует, что измеренная величина является распределением потока энергии (его продольной составляющей).

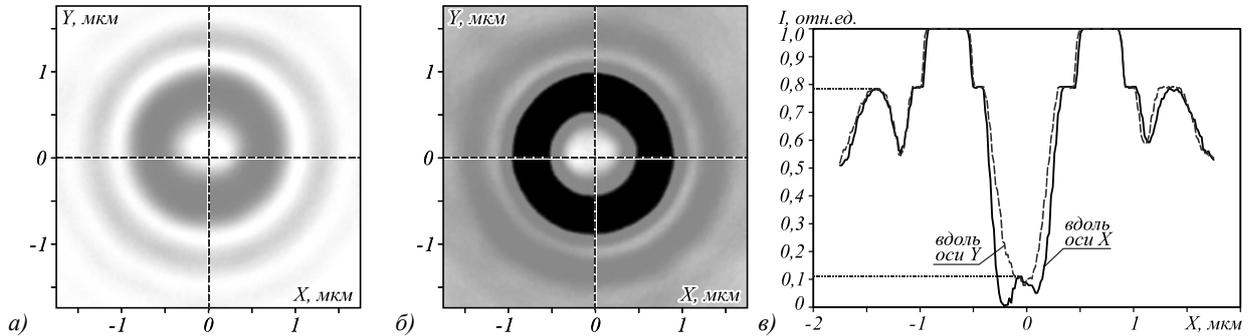


Рис. 6. Распределение потока энергии (а), (б), измеренное с помощью оптической схемы с рис. 1 с q-пластинкой, преобразующей линейно-поляризованный свет в цилиндрический векторный пучок второго порядка, вместо пространственного модулятора света SLM. Рисунки (а) и (б) были в разной степени переэкспонированы для детектирования ненулевого потока в центре картины. Размер всех изображений – 3,5 × 3,5 мкм. На рисунке (в) показано сечение интенсивности вдоль осей x и y

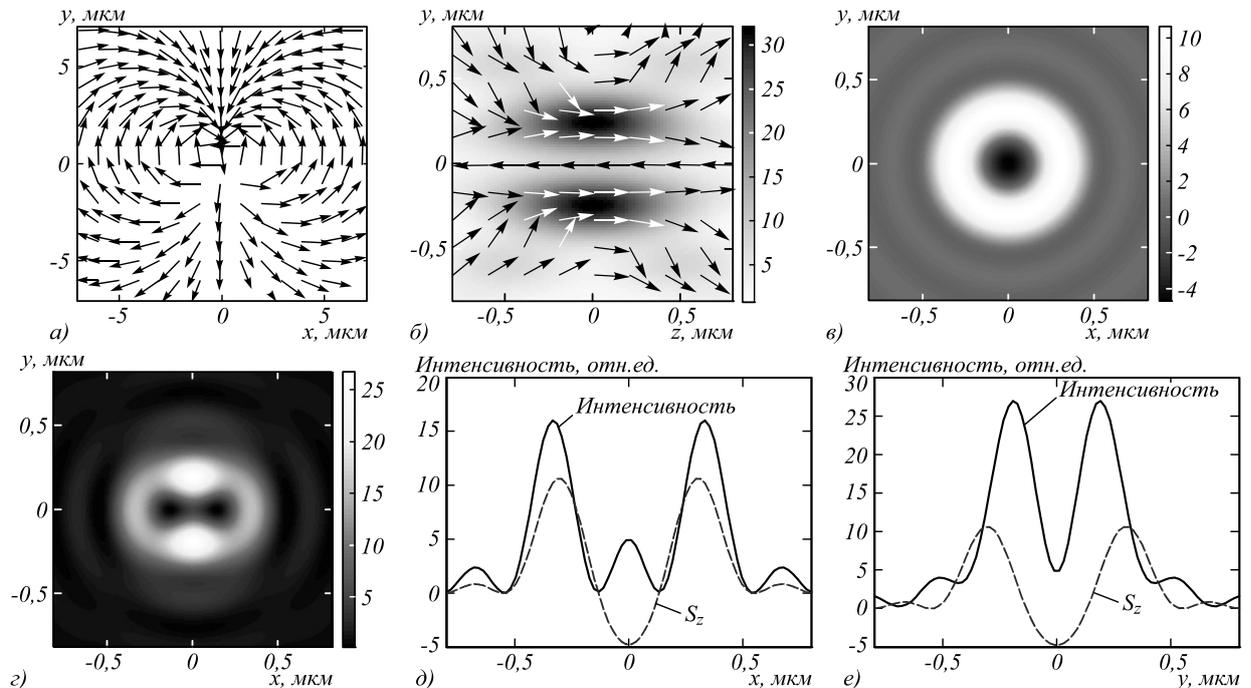


Рис. 7. Направление поляризации в поляризационном вихре второго порядка (а); распределение интенсивности в плоскости (y, z), стрелки на рисунке (б) показывают направление потока энергии  $S$  (б); распределение продольной компоненты вектора Пойнтинга  $S_z$  (в); интенсивность в фокальной плоскости (г) и его сечения вдоль осей x (д) и y (е). Интенсивность и продольная компонента вектора Пойнтинга показаны сплошной и пунктирной кривой соответственно

Если в фокусе имеется обратный поток энергии вблизи оптической оси, то в центре измеренного распределения энергии должны быть нулевые значения, поскольку обратный поток в фокусе не входит во второй микрообъектив и, следовательно, не может быть измерен.

Однако в центре рис. 6в имеется очень небольшое количество энергии (приблизительно 1/8 от бокового лепестка). Эта часть энергии не может рассматриваться как интенсивность, поскольку, как видно из

рис. 7г, д, интенсивность в центре должна быть примерно в 2 раза выше, чем интенсивность второго бокового лепестка. Эту энергию также нельзя рассматривать как усиленный шум камеры, поскольку в центре рис. 2в нет такого шума, хотя он тоже переэкспонирован. Итак, нам нужно точно знать, какая физическая величина измеряется в центре распределения потока энергии на рис. 2г и 6в.

Дело в том, что второй микрообъектив  $MO_2$  на рис. 1 создает в фокусе только изображение прямого

потока. Следовательно, в центре этого изображения должна быть область (диаметром около 300 нм) с нулевым потоком. Однако из-за дифракции прямого потока на этом круге (аналогично дифракции на непрозрачном диске и возникновению пятна Араго), в центре распределения прямого потока появляется локальный максимум, как на рис. 6в. Таким образом, измеренные распределения продольной составляющей вектора Пойнтинга (рис. 2 и 6) доказывают наличие обратного потока энергии на оптической оси вблизи фокуса.

### 3. Силы, действующие на наночастицу в обратном потоке энергии

При размещении частицы в световом поле на нее действует сила. Для рэлеевской частицы эта сила складывается из рассеивающей и градиентной сил. Для рэлеевских частиц с радиусом  $a < \lambda/20$ , помещённых в световое поле, сила рассеяния  $\mathbf{F}_s$  и градиентная сила  $\mathbf{F}_g$  рассчитываются по известным формулам [34, 35]:

$$\mathbf{F}_s = \left( \frac{8\pi n_2}{3c} \right) k^4 a^6 \left( \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + 2n_2^2} \right)^2 S_{or,z} \mathbf{e}_z, \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_g = \left( \frac{2\pi n_2}{c} \right) a^3 \left( \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + 2n_2^2} \right) \nabla |\mathbf{E}|^2, \quad (4)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $a$  – радиус сферической рэлеевской частицы,  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления частицы и среды. В уравнении (3)  $S_{or,z}$  – это осевая компонента орбитального потока энергии.

Уравнение (3) демонстрирует, что сила рассеяния, действующая на диэлектрическую частицу, расположенную на оптической оси в области обратного потока энергии, направлена в сторону распространения света. Это означает, что спиновый поток  $S_{sp}$ , который направлен назад в области обратного потока, не влияет на частицу.

Известно [36], что поток энергии  $\mathbf{S}$  состоит из орбитального потока  $\mathbf{S}_{or}$  и спинового потока  $\mathbf{S}_{sp}$ :

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = \frac{1}{2k} \text{Im}[\mathbf{E}^* (\nabla) \mathbf{E}] + \frac{1}{4k} [\nabla \times \text{Im}[\mathbf{E}^* \times \mathbf{E}]] = \mathbf{S}_{or} + \mathbf{S}_{sp}. \quad (5)$$

В [25] приведено выражение для расчета оптической силы, действующей на маленькую частицу с проводимостью  $\sigma$ :

$$\mathbf{F} = \frac{\sigma}{2} \text{Re}[\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}]. \quad (6)$$

В данном случае на частицу действуют как орбитальный  $\mathbf{S}_{or}$ , так и спиновый  $\mathbf{S}_{sp}$  потоки энергии (5). На рис. 8 показана продольная компонента силы, действующей вдоль оптической оси ( $r = 0$ ) на сере-

бряную частицу (радиус  $a = 10$  нм, длина волны  $\lambda = 532$  нм), расположенную в фокусе поляризационного вихря (рис. 7б). Мощность фокусируемого пучка составляла 100 мВт, фокусировка осуществлялась линзой с числовой апертурой  $NA = 0,95$ . Проводимость частицы считалось равной  $\sigma = 6,3 \times 10^7$  (Ом)<sup>-1</sup>.

Мы рассчитали продольную компоненту вектора Пойнтинга  $S_z$  вблизи фокуса поляризационного вихря [33]. Затем, используя выражение (6), мы определили силу, действующую на наночастицу (рис. 8). Сила (6) должна тянуть наночастицу в направлении, противоположном направлению оси  $z$ .

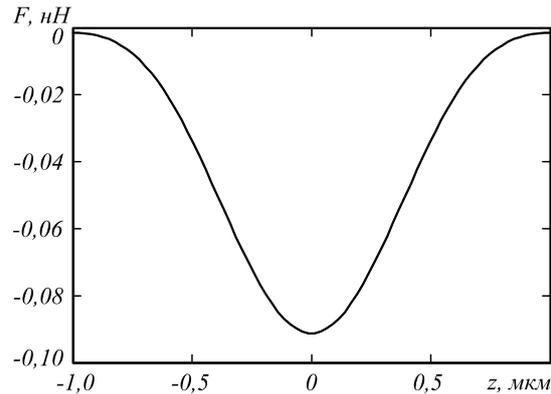


Рис. 8. Продольная компонента силы, действующей вдоль оптической оси ( $r = 0$ ) на серебряную наночастицу, расположенную вблизи фокуса поляризационного вихря (рис. 7б)

### Заключение

С помощью двух одинаковых микрообъективов с числовой апертурой 0,95 было экспериментально показано, что интенсивность на оптической оси в плоскости фокуса оптического вихря с топологическим зарядом 2 равна нулю для света с правой круговой поляризацией и ненулевая для света с левой круговой поляризацией. Это подтверждает, что в последнем случае на оптической оси существует обратный поток энергии, потому что в центре измеренного потока энергии есть очень слабый локальный максимум (пятно Араго или пятно Пуассона), объясняемый дифракцией прямого потока энергии на круге диаметром 300 нм (диаметр трубки обратного потока энергии). Сравнивая численные и экспериментальные распределения интенсивности, представляется возможным определить диаметр трубки обратного потока. Он равен расстоянию между нулями интенсивности. Для числовой апертуры 0,95 и длины волны 532 нм диаметр трубки обратного потока равен 300 нм.

Поток энергии равен [25, 36] сумме орбитального потока и потока спина. Орбитальный поток энергии всегда положительный (и для левой, и для правой круговой поляризации), а поток спина меняет знак (для левой круговой поляризации поток спина отрицательный, для правой круговой поляризации поло-

жительный). И если отрицательный поток спина по модулю больше всегда положительного орбитального потока энергии, то суммарный поток (вектор Пойнтинга) становится отрицательным. При этом условии формируется обратный поток энергии в фокусе.

Также было показано, что сферическая проводящая наночастица, помещенная в область обратного потока энергии, испытывает на себе действие силы, которая тянет ее в направлении, противоположном направлению пучка.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595) в части «Эксперимент по обнаружению обратного потока в фокусе оптического вихря с круговой поляризацией», Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20003) в части «Эксперимент по обнаружению обратного потока в фокусе поляризационного вихря второго порядка» и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение 007-ГЗ/Ч3363/26) в части «Силы, действующие на наночастицу в обратном потоке энергии».

### Литература

- Nye, J.F. Dislocations in wave trains / J.F. Nye, M.V. Berry // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* – 1974. – Vol. 336, Issue 1605. – P. 165-190.
- Soskin, M. Singular optics / M. Soskin, M. Vasnetsov. – In Book: *Progress in optics* / ed. by E. Wolf. – Elsevier, 2001. – P. 219-276.
- Swartzlander, G.A., Jr. The optical vortex coronagraph / G.A. Swartzlander Jr // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics.* – 2009. – Vol. 11, Issue 9. – 094022.
- Gahagan, K.T. Optical vortex trapping of particles / K.T. Gahagan, G.A. Swartzlander // *Optics Letters.* – 1996. – Vol. 21, Issue 11. – P. 827-829.
- Gecevičius, M. Single beam optical vortex tweezers with tunable orbital angular momentum / M. Gecevičius, R. Drevinskas, M. Beresna, P.G. Kazansky // *Applied Physics Letters.* – 2014. – Vol. 104, Issue 23. – 231110.
- Simpson, N.B. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner / N.B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen, M.J. Padgett // *Optics Letters.* – 1997. – Vol. 22, Issue 1. – P. 52-54.
- Volke-Sepulveda, K. Orbital angular momentum of a high-order Bessel light beam / K. Volke-Sepulveda, V. Garcés-Chávez, S. Chávez-Cerda, J. Arlt, K. Dholakia // *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics.* – 2002. – Vol. 4, Issue 2. – P. S82-S89.
- Thidé, B. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain / B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm, K. Palmer, J. Bergman, T.D. Carozzi, Y.N. Istomin, N.H. Ibragimov, R. Khamitova // *Physical Review Letters.* – 2007. – Vol. 99, Issue 8. – 087701.
- Bandyopadhyay, A. Wigner distribution of elliptical quantum optical vortex / A. Bandyopadhyay, R.P. Singh // *Optics Communications.* – 2011. – Vol. 284, Issue 1. – P. 256-261.
- Bandyopadhyay, A. Entanglement of a quantum optical elliptical vortex / A. Bandyopadhyay, S. Prabhakar, R.P. Singh // *Physics Letters A.* – 2011. – Vol. 375, Issue 19. – P. 1926-1929.
- McMorran, B.J. Electron vortex beams with high quanta of orbital angular momentum / B.J. McMorran, A. Agrawal, I.M. Anderson, A.A. Herzing, H.J. Lezec, J.J. McClelland, J. Unguris // *Science.* – 2011. – Vol. 331, Issue 6014. – P. 192-195.
- Kotlyar, V. Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy / V. Kotlyar, A. Kovalev, A. Nalimov // *Optics Letters.* – 2018. – Vol. 43, Issue 12. – P. 2921-2924. – DOI: 10.1364/OL.43.002921.
- Kotlyar, V.V. Helical reverse flux of light of a focused optical vortex / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, A.A. Kovalev // *Journal of Optics.* – 2018. – Vol. 20, Issue 9. – 095603. – DOI: 10.1088/2040-8986/aad606.
- Kotlyar, V.V. Energy backflow in the focus of an optical vortex / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev // *Laser Physics.* – 2018. – Vol. 28, Issue 12. – 126203. – DOI: 10.1088/1555-6611/aae02f.
- Kotlyar, V.V. Sharp focusing of vector optical vortices using a metalens / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov // *Journal of Optics.* – 2018. – Vol. 20, Issue 7. – 075101. – DOI: 10.1088/2040-8986/aac4b3.
- Richards, B. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards, E. Wolf // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* – 1959. – Vol. 253, Issue 1274. – P. 358-379.
- Katsenelenbaum, B.Z. What is the direction of the Poynting vector? / B.Z. Katsenelenbaum // *Journal of Communications Technology and Electronics.* – 1997. – Vol. 42, Issue 2. – P. 119-120.
- Karman, G.P. Creation and annihilation of phase singularities in a focal field / G.P. Karman, M.W. Beijersbergen, A. van Duijl, J.P. Woerdman // *Optics Letters.* – 1997. – Vol. 22, Issue 9. – P. 1503-1505.
- Berry, M.V. Wave dislocation reactions in non-paraxial Gaussian beams / M.V. Berry // *Journal of Modern Optics.* – 1998. – Vol. 45, Issue 9. – P. 1845-1858.
- Volyar, A.V. Nonparaxial Gaussian beams: 1. Vector fields / A.V. Volyar // *Technical Physics Letters.* – 2000. – Vol. 26, Issue 7. – P. 573-575.
- Volyar, A.V. The structure of a nonparaxial Gaussian beam near the focus: II. Optical vortices / A.V. Volyar, V.G. Shvedov, T.A. Fadeeva // *Optics and Spectroscopy.* – 2001. – Vol. 90, Issue 1. – P. 93-100.
- Salem, M.A. Energy flow characteristics of vector X-Waves / M.A. Salem, H. Bağcı // *Optics Express.* – 2011. – Vol. 19, Issue 9. – P. 8526-8532.
- Vaveliuk, P. Negative propagation effect in nonparaxial Airy beams / P. Vaveliuk, O. Martinez-Matos // *Optics Express.* – 2012. – Vol. 20, Issue 24. – P. 26913-26921.
- Rondón-Ojeda, I. Properties of the Poynting vector for invariant beams: Negative propagation in Weber beams / I. Rondón-Ojeda, F. Soto-Eguibar // *Wave Motion.* – 2018. – Vol. 78. – P. 176-184.
- Berry, M.V. Optical currents / M.V. Berry // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics.* – 2009. – Vol. 11, Issue 9. – 094001.
- Song, Z. Characterization of optical properties of ZnO nanoparticles for quantitative imaging of transdermal transport / Z. Song, T.A. Kelf, W.H. Sanchez, M.S. Roberts, J. Rička, M. Frenz, A.V. Zvyagin // *Biomedical Optics Express.* – 2011. – Vol. 2, Issue 12. – P. 3321-3333.

27. **Zhang, L.** Investigation into the antibacterial behaviour of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids) / L. Zhang, Y. Jiang, Y. Ding, M. Povey, D. York // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2007. – Vol. 9, Issue 3. – P. 479-489.
28. **Sirelkhatim, A.** Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism / A. Sirelkhatim, S. Mahmud, A. Seeni, N.H.M. Kaus, L.C. Ann, S.K.M. Bakhori, H. Hasan, D. Mohamad // *Nano-Micro Letters*. – 2015. – Vol. 7, Issue 3. – P. 219-242.
29. **Omidvar, A.** Indium-doped and positively charged ZnO nanoclusters: Versatile materials for CO detection / A. Omidvar // *Vacuum*. – 2018. – Vol. 147. – P. 126-133.
30. **Alisafae, H.** Polarization insensitivity in epsilon-near-zero metamaterial from plasmonic aluminum-doped zinc oxide nanoparticles / H. Alisafae, M.A. Fiddy // *Journal of Nanophotonics*. – 2014. – Vol. 8, Issue 1. – 083898.
31. **Beek, W.J.E.** Efficient hybrid solar cells from zinc oxide nanoparticles and a conjugated polymer / W.J.E. Beek, M.M. Wienk, R.A.J. Janssen // *Advanced Materials*. – 2004. – Vol. 16, Issue 12. – P. 1009-1013.
32. **Hau, S.K.** Air-stable inverted flexible polymer solar cells using zinc oxide nanoparticles as an electron selective layer / S.K. Hau, H.-L. Yip, N.S. Baek, J. Zou, K. O'Malley, A.K.Y. Jen // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92, Issue 25. – 253301.
33. **Stafeev, S.S.** The non-vortex inverse propagation of energy in a tightly focused high-order cylindrical vector beam / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, E.S. Kozlova // *IEEE Photonics Journal*. – 2019. – Vol. 11, Issue 4. – 4500810. – DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2921669.
34. **Kotlyar, V.V.** Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov // *Physical Review A*. – 2019. – Vol. 99, Issue 3. – 033840. – DOI: 10.1103/PhysRevA.99.033840.
35. **Harada, Y.** Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime / Y. Harada, T. Asakura // *Optics Communications*. – 1996. – Vol. 124, Issue 5-6. – P. 529-541.
- Bekshaev, A.Y.** Subwavelength particles in an inhomogeneous light field: Optical forces associated with the spin and orbital energy flows / A.Y. Bekshaev // *Journal of Optics*. – 2013. – Vol. 15, Issue 4. – 044004.

### Сведения об авторах

**Котляр Виктор Викторович**, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета. В 1979 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете, а в 1992 году – докторскую диссертацию в Центральном конструкторском бюро Уникального приборостроения РАН (г. Москва). Область научных интересов: нанофотоника, дифракционная компьютерная оптика. Публикации: 300 научных трудов, 5 монографий, 7 авторских свидетельств. E-mail: [kotlyar@smr.ru](mailto:kotlyar@smr.ru).

**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 – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» 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.

**Налимов Антон Геннадьевич**, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики в Самарском университете в должности доцента, в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 130 работ и 3 патентов. E-mail: [anton@smr.ru](mailto:anton@smr.ru).

**Ковалёв Алексей Андреевич**, 1979 года рождения, в 2002 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2012 год), работает старшим научным сотрудником лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. В списке научных работ более 150 статей. Область научных интересов: математическая теория дифракции, фотонно-кристаллические устройства. E-mail: [alanko@smr.ru](mailto:alanko@smr.ru).

**Порфирьев Алексей Петрович**, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год). Доцент кафедры технической кибернетики Самарского университета, и.о. старшего научного сотрудника лаборатории интеллектуального анализа видеоданных ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическое манипулирование, структурированные лазерные пучки. E-mail: [porfirev.alexey@smr.ru](mailto:porfirev.alexey@smr.ru).

ГРНТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 03 июня 2020 г. Окончательный вариант – 13 июля 2020 г.

---

# Experimental investigation of the energy backflow in the tight focal spot

V.V. Kotlyar<sup>1,2</sup>, S.S. Stafeev<sup>1,2</sup>, A.G. Nalimov<sup>1,2</sup>, A.A. Kovalev<sup>1,2</sup>, A.P. Porfirev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,  
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

<sup>2</sup>Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

## Abstract

Using two identical microobjectives with a numerical aperture  $NA=0.95$ , we experimentally demonstrate that the on-axis intensity near the tight focal spot of an optical vortex with a topological charge 2 is zero for right-handed circular polarization and nonzero for left-handed circular polarization. This serves to confirm that in the latter case there is a reverse energy flow on the optical axis, as testified by a very weak local maximum (the Arago spot) detected at the center of the measured energy flow distribution, caused by diffraction of the direct energy flow by a 300 nm circle (the diameter of a reverse energy flow tube). The comparison of numerical and experimental intensity distributions shows that it is possible to determine the diameter of the reverse energy flow "tube", which is equal to the distance between the adjacent intensity nulls. For  $NA=0.95$  and a 532 nm incident wavelength, the diameter of the on-axis reverse energy flow "tube" is measured to be 300 nm. It is also experimentally shown that when an optical beam with second-order cylindrical polarization is focused with a lens with  $NA=0.95$ , there is a circularly symmetric energy flow in the focus with a very weak maximum in the center (the Arago spot), whose distribution is determined by diffraction of the direct energy flow by a 300 nm circular region, where the energy flow is reverse. This also confirms that in this case, there is a reverse energy flow on the optical axis.

**Keywords:** energy backflow, tight focusing, optical experiment, Richards-Wolf formulae, FDTD-method, optical vortex, cylindrical vector beam.

**Citation:** Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, Kovalev AA, Porfirev AP. Experimental investigation of the energy backflow in the tight focal spot. *Computer Optics* 2020; 44(6): 863-870. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-763.

**Acknowledgements:** The work was partly funded by the Russian Science Foundation under project # 18-19-00595 (Section "An experimental detection of the reverse energy flow in the tight focus of a circularly polarized optical vortex"), the Russian Foundation for Basic Research under project # 18-29-20003 (Section "An experimental detection of the reverse on-axis energy flow in the focus of a second-order polarization vortex"), and the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education within a state contract with the "Crystallography and Photonics" Research Center of the RAS under agreement 007-Г3/Ч3363/26 (section "Forces exerted upon a nanoparticle in the reverse energy flow").

## References

- [1] Nye JF, Berry MV. Dislocations in wave trains. *Proc Math Phys Eng Sci* 1974; 336(1605): 165-190.
  - [2] Soskin M, Vasnetsov M. Singular optics. In: Wolf E, ed. *Progress in optics*. Elsevier; 2001: 219-276.
  - [3] Swartzlander Jr GA. The optical vortex coronagraph. *J Opt A* 2009; 11(9): 094022.
  - [4] Gahagan KT, Swartzlander GA. Optical vortex trapping of particles. *Opt Lett* 1996; 21(11): 827-829.
  - [5] Gecevičius M, Drevinskas R, Beresna M, Kazansky PG. Single beam optical vortex tweezers with tunable orbital angular momentum. *Appl Phys Lett* 2014; 104(23): 231110.
  - [6] Simpson NB, Dholakia K, Allen L, Padgett MJ. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner. *Opt Lett* 1997; 22(1): 52-54.
  - [7] Volke-Sepulveda K, Garcés-Chávez V, Chávez-Cerda S, Arlt J, Dholakia K. Orbital angular momentum of a high-order Bessel light beam. *J Opt B Quantum Semiclassical Opt* 2002; 4(2): S82-S89.
  - [8] Thidé B, Then H, Sjöholm J, Palmer K, Bergman J, Carozzi TD, Istomin YN, Ibragimov NH, Khamitova R. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain. *Phys Rev Lett* 2007; 99(8): 087701.
  - [9] Bandyopadhyay A, Singh RP. Wigner distribution of elliptical quantum optical vortex. *Opt Commun* 2011; 284(1): 256-261.
  - [10] Bandyopadhyay A, Prabhakar S, Singh RP. Entanglement of a quantum optical elliptic vortex. *Phys Lett A* 2011; 375(19): 1926-1929.
  - [11] McMorran BJ, Agrawal A, Anderson IM, Herzing AA, Lezec HJ, McClelland JJ, Unguris J. Electron vortex beams with high quanta of orbital angular momentum. *Science* 2011; 331(6014): 192-195.
  - [12] Kotlyar V, Kovalev A, Nalimov A. Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy. *Opt Lett* 2018; 43(12): 2921-2924. DOI: 10.1364/OL.43.002921.
  - [13] Kotlyar VV, Nalimov AG, Kovalev AA. Helical reverse flux of light of a focused optical vortex. *J Opt* 2018; 20(9): 095603. DOI: 10.1088/2040-8986/aad606.
  - [14] Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS. Energy backflow in the focus of an optical vortex. *Laser Phys* 2018; 28(12): 126203. DOI: 10.1088/1555-6611/aae02f.
-

- [15] Kotlyar VV, Nalimov AG. Sharp focusing of vector optical vortices using a metalens. *J Opt* 2018; 20(7): 075101. DOI: 10.1088/2040-8986/aac4b3.
- [16] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system. *Proc Math Phys Eng Sci* 1959; 253(1274): 358-379.
- [17] Katsenelenbaum BZ. What is the direction of the Poynting vector? *J Commun Technol Electron* 1997; 42(2): 119-120.
- [18] Karman GP, Beijersbergen MW, van Duijl A, Woerdman JP. Creation and annihilation of phase singularities in a focal field. *Opt Lett* 1997; 22(9): 1503-1505.
- [19] Berry MV. Wave dislocation reactions in non-paraxial Gaussian beams. *J Mod Opt* 1998; 45(9):1845-1858.
- [20] Volyar AV. Nonparaxial Gaussian beams: 1. Vector fields. *Techn Phys Lett* 2000; 26(7): 573-575.
- [21] Volyar AV, Shvedov VG, Fadeeva TA. The structure of a nonparaxial Gaussian beam near the focus: II. Optical vortices. *Opt Spectr* 2001; 90(1): 93-100.
- [22] Salem MA, Bağcı H. Energy flow characteristics of vector X-Waves. *Opt Express* 2011; 19(9): 8526-8532.
- [23] Vaveliuk P, Martinez-Matos O. Negative propagation effect in nonparaxial Airy beams. *Opt Express* 2012; 20(24): 26913-26921.
- [24] Rondon-Ojeda I, Soto-Eguibar F. Properties of the Poynting vector for invariant beams: negative propagation in Weber beams. *Wave Motion* 2018; 78: 176-184.
- [25] Berry MV. Optical currents. *J Opt A-Pure Appl Op* 2009; 11(9): 094001.
- [26] Song Z, Kelf TA, Sanchez WH, Roberts MS, Rička J, Frenz M, Zvyagin AV. Characterization of optical properties of ZnO nanoparticles for quantitative imaging of transdermal transport. *Biomed Opt Express* 2011; 2(12): 3321-3333.
- [27] Zhang L, Jiang Y, Ding Y, Povey M, York D. Investigation into the antibacterial behaviour of suspensions of ZnO nanoparticles (ZnO nanofluids). *J Nanopart Res* 2007; 9(3): 479-489.
- [28] Sirelkhatim A, Mahmud S, Seeni A, Kaus NHM, Ann LC, Bakhori SKM, Hasan H, Mohamad D. Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nanomicro Lett* 2015; 7(3): 219-242.
- [29] Omidvar A. Indium-doped and positively charged ZnO nanoclusters: Versatile materials for CO detection. *Vacuum* 2018; 147: 126-133.
- [30] Alisafae H, Fiddy MA. Polarization insensitivity in epsilon-near-zero metamaterial from plasmonic aluminum-doped zinc oxide nanoparticles. *J Nanophotonics* 2014; 8(1): 083898.
- [31] Beek WJE, Wienk MM, Janssen RAJ. Efficient hybrid solar cells from zinc oxide nanoparticles and a conjugated polymer. *Adv Mater* 2004; 16(12): 1009-1013.
- [32] Hau SK, Yip H-L, Baek NS, Zou J, O'Malley K, Jen AKY. Air-stable inverted flexible polymer solar cells using zinc oxide nanoparticles as an electron selective layer. *Appl Phys Lett* 2008; 92(25): 253301.
- [33] Stafeev SS, Kotlyar VV, Nalimov AG, Kozlova ES. The non-vortex inverse propagation of energy in a tightly focused high-order cylindrical vector beam. *IEEE Photonics J* 2019; 11: 4500810. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2921669.
- [34] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG. Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity. *Phys Rev A* 2019; 99(3): 033840. DOI: 10.1103/PhysRevA.99.033840.
- [35] Harada Y, Asakura T. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime. *Opt Commun* 1996; 124(5-6): 529-541.
- [36] Bekshaev AY. Subwavelength particles in an inhomogeneous light field: Optical forces associated with the spin and orbital energy flows. *J Opt* 2013; 15(4): 044004.

### Authors' information

**Victor Victorovich Kotlyar** is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute (Samara) of the Russian Academy of Sciences – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and professor of Computer Science department at Samara National Research University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in Physics and Mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE- and OSA-member. He is coauthor of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices. E-mail: [kotlyar@smr.ru](mailto:kotlyar@smr.ru).

**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 RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” 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.

**Anton Gennadyevich Nalimov** (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 “Mathematical Modeling and Program Complexes”, finished it in 2006 with speciality 01.04.05 “Optics”. A.G. Nalimov works on Technical Cybernetics department in Samara National Research University as an associate professor, works as a scientist in the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 130 papers and 3 inventions. Email: [anton@smr.ru](mailto:anton@smr.ru).

**Alexey Andreevich Kovalev** (b. 1979), graduated (2002) from Samara National Research University, majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths degree in 2012. He is a senior researcher of Laser Measurements laboratory at IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. He is a co-author of more than 150 scientific papers. His current research interests are mathematical diffraction theory and photonic crystal devices. E-mail: [alanko@smr.ru](mailto:alanko@smr.ru).

---

**Alexey Petrovich Porfirev** (b. 1987) graduated (2010) from Samara National Research University, majoring in Applied Physics and Mathematics. He holds the Candidate's Degree in Physics and Mathematics (2013). Currently he is an associate professor at Technical Cybernetics department of Samara National Research University and a senior researcher at Intelligent Video Data Analysis Laboratory of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. His current research interests include diffractive optics, optical manipulation and structured laser beams. E-mail: [porfirev.alexey@smr.ru](mailto:porfirev.alexey@smr.ru).

---

*Received June 03, 2020. The final version – July 13, 2020.*

---