

Сравнение величин обратного потока энергии в остром фокусе светового поля с поляризационной и фазовой сингулярностями

В.В. Котляр^{1,2}, А.Г. Налимов^{1,2}, С.С. Стафеев^{1,2}

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

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

Аннотация

С помощью матриц и векторов Джонса показано, что оптический элемент с метаповерхностью, анизотропное пропускание которого описывается матрицей поворота поляризации на угол $m\varphi$, φ – полярный угол, при освещении светом с линейной поляризацией формирует азимутальную или радиальную поляризацию порядка m . При освещении светом с круговой поляризацией такой элемент формирует оптический вихрь с топологическим зарядом m . Этот поляризационно-фазовый конвертор (ПФК) выполняет спин-орбитальное преобразование, аналогичное тому, которое выполняют жидкокристаллические q -пластинки. Численно FDTD-методом показано, что при освещении ПФК с $m=2$ светом с линейной или круговой поляризацией и последующей острой фокусировкой с помощью бинарной зонной пластинки вблизи фокуса на оптической оси формируется обратный поток световой энергии, сравнимый по величине с прямым потоком. Причем обратный поток при фокусировке оптического вихря с топологическим зарядом 2 и с круговой поляризацией равен обратному потоку при фокусировке света с поляризационной сингулярностью 2-го порядка.

Ключевые слова: оптический вихрь, поляризация, обратный поток, металинза.

Цитирование: Котляр, В.В. Сравнение величин обратного потока энергии в остром фокусе светового поля с поляризационной и фазовой сингулярностями / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, С.С. Стафеев // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 174-183. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-174-183.

Введение

Оптические вихревые пучки известны давно [1]. Такие пучки имеют спиральную фазу, что влияет на свойства распространения этих пучков [2]. Интерес к ним обуславливается множеством возможностей применения. Вихревые лазерные пучки можно использовать в телескопах для обнаружения далеких планет [3], захвата и управления движением микрочастиц в оптическом пинцете [4, 5], вращения частиц оптическим гаечным ключом [6], передачи микрочастице углового момента [7], увеличения объема 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 течения энергии обратно к направлению распространения пучка [12]. В [12] численно показано, что в остром фокусе вихревого светового поля с круговой поляризацией, сформированном спиральной зонной пластинкой, вблизи оптической оси имеет место обратный поток световой энергии. Эффект обратного потока энергии изучался в работах других авторов. Например, в [13] показано, что обратный поток энергии может возникнуть в суперпозиции двух произвольных световых полей с разными проекциями волнового вектора на продольную ось. Показано, что направление действия силы такого пучка на частицу может быть в некоторых частях сечения пучка направлено противоположно к направлению распространения

пучка. В [14] численно показано наличие обратного потока на оптической оси в фокусе вихревой металинзы. В [15] численно показано наличие обратного распространения энергии в векторном пучке Бесселя с дробным топологическим зарядом. Такой световой пучок фактически является линейной комбинацией счетного числа обычных мод Бесселя. В [16] теоретически получены выражения для плотности вектора Пойнтинга X-пучков и необходимые условия для появления обратного потока энергии. В [17] численно показано наличие обратного течения энергии в непараксиальном ускоряющемся 2D-пучке Эйри. В [18] теоретически рассматриваются условия, которые нужно наложить на световое поле, чтобы оно локально проявляло обратное распространение (или имел место обратный поток энергии). Из приведенного обзора видно, что наиболее широко для получения областей с обратным потоком энергии используются вихревые лазерные пучки, причем для получения обратного потока необходимо использовать круговую поляризацию падающего поля.

Заметим, что, возможно, в световых полях, в которых фазовые и поляризационные сингулярности образуют в пространстве многосвязные узлы (vortex knot) [19, 20], также имеет место обратное распространение света (обратный поток световой энергии).

В последнее время для формирования лазерных пучков с заданными свойствами используют оптические элементы с метаповерхностью [21–25]. Компоненты с метаповерхностью представляют из себя наноструктурированную пленку из металла, полупро-

водника или диэлектрика толщиной 100–200 нанометров и с размером неоднородности меньше длины волны. Метаповерхность может состоять из набора наностолбиков [24, 25] или набора субволновых бинарных дифракционных решеток [23]. Расположение столбиков (или штрихов дифракционной решетки) и их размеры варьируются по поверхности элемента так, чтобы одновременно управлять заданным образом амплитудой, фазой и поляризацией падающего света в каждой точке метаповерхности.

Поэтому возникает вопрос: можно ли рассчитать такую метаповерхность, которая бы при разном освещении формировала световые поля то с поляризационной, то с фазовой сингулярностью?

В данной работе теоретически и численно показано, что металинза, содержащая в себе бинарную зонную пластинку с числовой апертурой, близкой к единице, и набор бинарных субволновых дифракционных решёток, работающих как полуволновые пластины и выполняющих поворот вектора поляризации падающего поля на угол $m\varphi$, формируют сходящийся векторный цилиндрический пучок m -го порядка (при падении света линейной поляризации) или фазовый вихрь с топологическим зарядом m (при падении света с круговой поляризацией). В остром фокусе такого сходящегося светового поля на оптической оси имеет место обратный поток световой энергии, сравнимый с прямым потоком.

1. Метаповерхность для формирования световых полей с сингулярностью

Известно [19, 23, 26, 27, 28], что элементы фотоники с метаповерхностью, которая представляет собой субволновые дифракционные решетки, сделанные в тонкой пленке пропускающего свет материала, могут работать как локальные полуволновые пластины, если параметры дифракционных решеток обеспечивают задержку фазы между ТЕ- и ТМ-поляризованными падающими световыми волнами на π . Для формирования неоднородной поляризации в прошедшем через такую решетку свете нужно, чтобы наклон штрихов решетки изменялся по поверхности элемента в соответствии с заданным распределением направления вектора поляризации [23]. Таким образом, полуволновая пластинка с метаповерхностью поворачивает вектор поляризации на угол 2θ , где θ – угол между штрихами решетки и вектором линейной поляризации падающего света. Такая полуволновая пластинка (субволновая дифракционная решетка) описывается матрицей поворота $R(\varphi)$ на угол $\varphi = 2\theta$:

$$R(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Теперь рассмотрим метаповерхность, которая в любой точке на луче, идущем из начала координат под углом φ (полярный угол) к положительному направлению горизонтальной оси x , поворачивает вектор поляризации, направленный вдоль оси x , на угол $m\varphi$, где m – целое положительное число. Тогда про-

пускание такой метаповерхности будет зависеть только от полярного угла и будет равно:

$$R_m(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos m\varphi & -\sin m\varphi \\ \sin m\varphi & \cos m\varphi \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Покажем далее, что метаповерхность с пропусканьем (2) обладает многофункциональностью и может формировать как световое поле с поляризационной сингулярностью m -го порядка, так и вихревое световое поле с топологическим зарядом m .

То есть оптический элемент с метаповерхностью (2), назовем его поляризационно-фазовый конвертер (ПФК), проявляет свойства q -пластинок [29], формирующих свет с радиальной или азимутальной поляризацией, и может проявлять свойства спиральной фазовой пластинки [30], формируя вихревое световое поле с топологическим зарядом m . Действительно, при падении на ПФК света с ТЕ-поляризацией, на выходе сформируется световое поле с радиальной поляризацией m -го порядка:

$$R_m(\varphi) |TE\rangle = |RP, m\rangle, \quad (3)$$

где

$$|TE\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |RP, m\rangle = \begin{pmatrix} \cos m\varphi \\ \sin m\varphi \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Если на поверхность ПФК нормально падает ТМ-поляризованная плоская волна, то у прошедшей волны будет азимутальная поляризация m -го порядка:

$$R_m(\varphi) |TM\rangle = |AP, m\rangle, \quad (5)$$

где

$$|TM\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad |AP, m\rangle = \begin{pmatrix} -\sin m\varphi \\ \cos m\varphi \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Если ПФК освещает плоская волна с левой круговой поляризацией, то метаповерхность (2) за счет спин-орбитального взаимодействия формирует оптический вихрь с топологическим зарядом m и левой круговой поляризацией:

$$R_m(\varphi) |LCP\rangle = e^{im\varphi} |LCP\rangle, \quad (7)$$

где

$$|LCP\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}. \quad (8)$$

И, наконец, при освещении ПФК плоской волной с правой круговой поляризацией в прошедшем свете формируется оптический вихрь с топологическим зарядом $-m$ и правой круговой поляризацией:

$$R_m(\varphi) |RCP\rangle = e^{-im\varphi} |RCP\rangle, \quad (9)$$

где

$$|RCP\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Из этого анализа следует интересное следствие. В [31, 32] показано, что при острой фокусировке опти-

ческого вихря с топологическим зарядом $m=2$ и левой круговой поляризацией на оптической оси вблизи фокуса имеет место обратный поток световой энергии. А в [33] показано, что при острой фокусировке света с азимутальной поляризацией 2-го порядка вблизи фокуса на оптической оси также возникает обратный поток энергии. Выражения (3) – (10) показывают, что все четыре разновидности светового поля, острая фокусировка которого дает на оптической оси обратный поток энергии, можно сформировать с помощью одного оптического элемента с метаповерхностью (2) при $m=2$. Из (7) также следует, что совместное (последовательное) применение спиральной фазовой пластинки с топологическим зарядом n и ПФК m -го порядка приводит к сложению их порядков:

$$e^{im\varphi} R_m(\varphi) |LCP\rangle = e^{i(m+n)\varphi} |LCP\rangle. \quad (11)$$

Заметим, что в [29] жидкокристаллическую пластинку с двулучепреломлением рассматривали как неоднородную анизотропную среду для демонстрации спин-орбитального взаимодействия, пропускание которой описывалось немного другой матрицей, которая также формирует оптический вихрь, но в отличие от решетки (7) преобразует левую круговую поляризацию в правую:

$$R'_m(\varphi) |LCP\rangle = e^{im\varphi} |RCP\rangle, \quad (12)$$

$$R'_m(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos m\varphi & \sin m\varphi \\ \sin m\varphi & -\cos m\varphi \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Заметим, что световые поля (3), (7) и (9) связаны между собой линейным соотношением

$$|RP, m\rangle = e^{im\varphi} |LCP\rangle / \sqrt{2} + e^{-im\varphi} |RCP\rangle / \sqrt{2}, \quad (14)$$

из которого следует, что обратный поток для полей с фазовой и поляризационной сингулярностями одинаковый.

Далее численно с помощью FDTD-метода (Finite Difference Time Domain) будет показано, что ПФК (2) при $m=2$ формирует в остром фокусе бинарной зонной пластинки Френеля обратный поток на оптической оси при любом типе освещения (ТЕ-, ТМ-поляризация, левая или правая круговая поляризация). Будет показано, что при прочих равных условиях величина безвихревого обратного потока и вихревого одинаковы.

2. Моделирование фокусировки поля с поляризационной сингулярностью

В этом параграфе численно моделируется формирование и фокусировка светового поля с цилиндрической поляризацией второго порядка. В таком световом поле электрический вектор описывается вектором Джонса:

$$\mathbf{E} = |AP, m=2\rangle. \quad (15)$$

Ниже представлены проекции электрического вектора E_x и E_y .

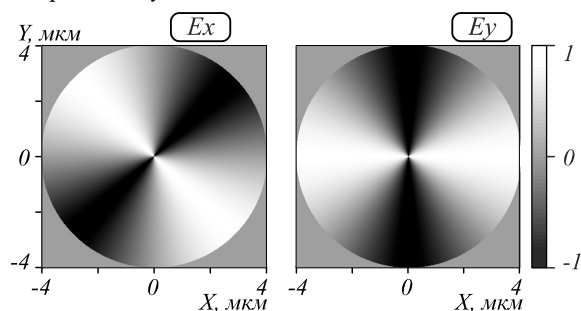


Рис. 1. Проекция вектора электрического поля на оси X и Y – белый цвет соответствует максимальному значению проекции (+1), черный – минимальному (–1), нулевое значение – средний серый цвет

Поляризация такого поля представлена на рис. 2, его интенсивность единичная по всему полю.

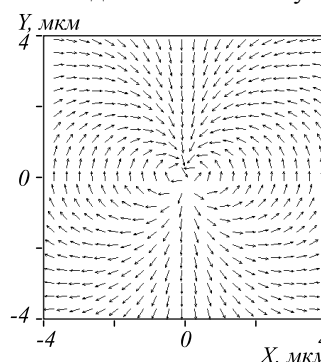


Рис. 2. Распределение поляризации в поле, которое описывается формулой (15)

На рис. 3 представлен результат фокусировки пучка (15) (рис. 2). На рис. 3а, б изображены двумерные распределения интенсивности в плоскости фокуса ($z=600$ нм):

$$I = I_x + I_y + I_z = |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2 \quad (16)$$

и продольной компоненты S_z вектора Пойнтинга

$$\mathbf{S} = \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad (17)$$

также в плоскости фокуса ($z=600$ нм). На рис. 3в, г – поперечные сечения вдоль осей X и Y обоих распределений. Моделирование проводилось методом FDTD для фокусировки света с поляризационной сингулярностью (15) с помощью бинарной зонной пластинки, содержащей 6 колец, при параметрах: длина волны падающего излучения $\lambda=633$ нм, фокусное расстояние $f=\lambda$, сетка моделирования $\lambda/30$ по всем трем координатам. Поле и зонная пластинка были ограничены круглой апертурой диаметром 8 мкм.

Как видно из рис. 3, при фокусировке рассматриваемого поля на оптической оси в фокусном пятне возникает обратный поток энергии.

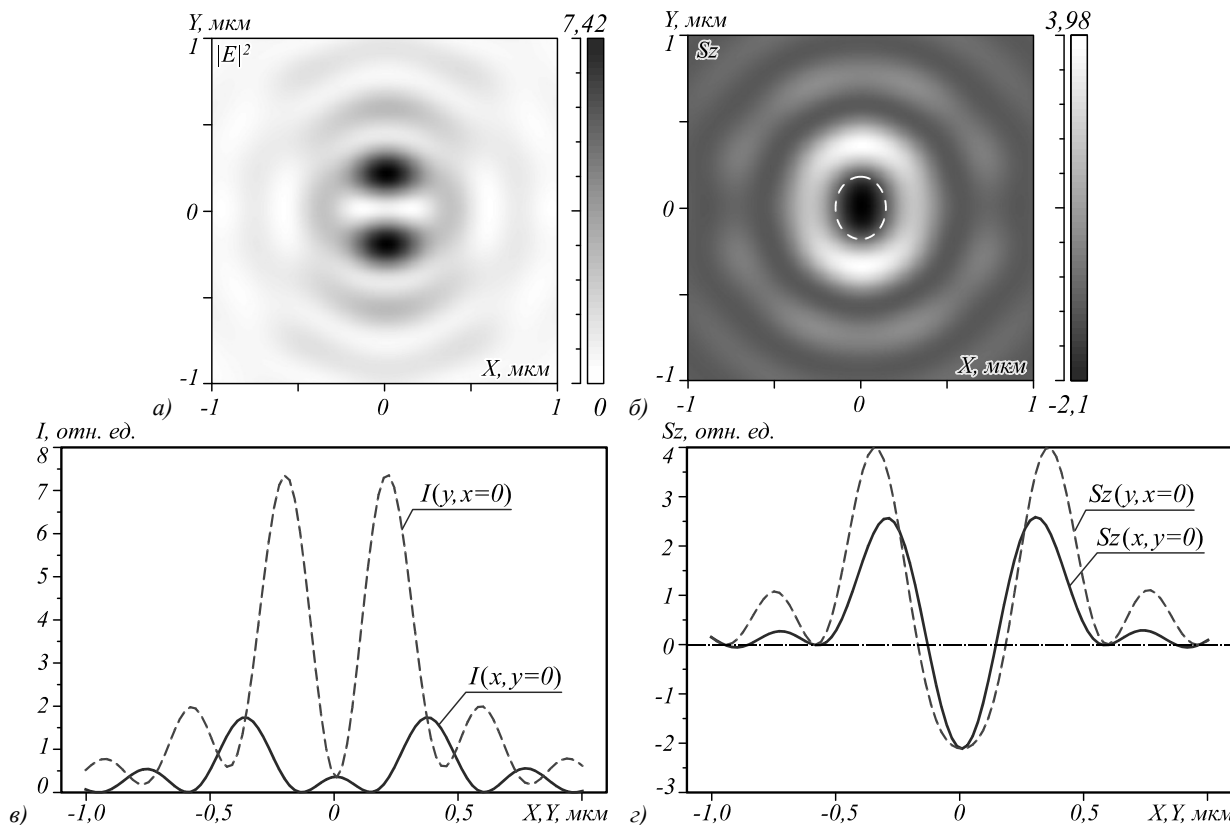


Рис. 3. Интенсивность I (а, в) и продольная проекция S_z вектора Пойнтинга (б, г) в плоскости фокуса на расстоянии $0,6$ мкм от зонной пластинки. Пунктиром (б) отмечена область с обратным потоком

3. Моделирование преобразования поляризации и фокусировки света металлинзой

Поляризационно-фазовый конвертор (2) с метаповерхностью можно объединить с бинарной зонной пластинкой в одной металлинзе. На рис. 4а показан внешний вид ПФК с метаповерхностью, состоящий из 16 секторных субволновых бинарных дифракционных решеток, пропускание которого описывается матрицей (2).

А на рис. 4б показана металлинза, объединяющая пропускание ПФК (рис. 4а) и бинарной зонной пластинки с числовой апертурой, близкой к единице. Металлинза составлялась из 16 секторов. В каждом секторе решетки чередуются в соответствии с зонами зонной пластинки Френеля, рассчитанной на фокусное расстояние $f = \lambda$: в каждой следующей зоне направление поляризации поворачивается на π относительно предыдущей. При этом направление штрихов решеток, примыкающих к границе зон, взаимно перпендикулярно. При показателе преломления материала метаповерхности $n = 4,352 + 0,486i$ (аморфный кремний) высота рельефа составляет 120 нм. Период решеток составляет 220 нм. Основой для данной металлинзы служила метаповерхность (рис. 4а), пропускание которой описывается матрицей (2). Если осветить плоской волной ПФК на рис. 4а, то прошедшее световое поле на расстоянии длины волны от метаповерхности будет иметь распределение интенсивности и поляризации, показанное на рис. 5.

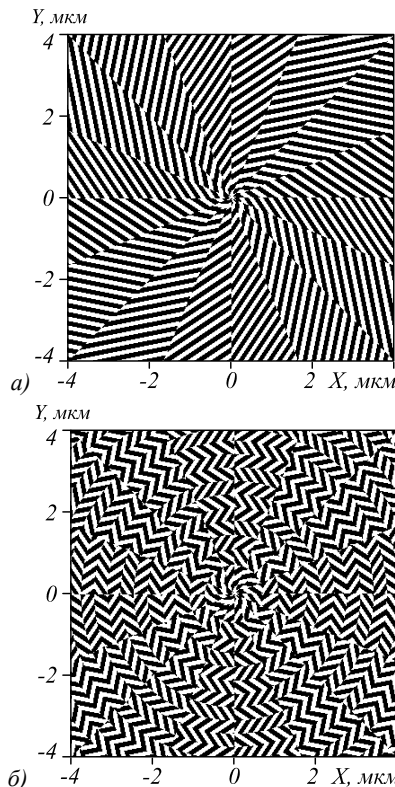


Рис. 4. Метаповерхность для формирования фазового вихря поляризации (а) и металлинза (б), фокусирующая это излучение

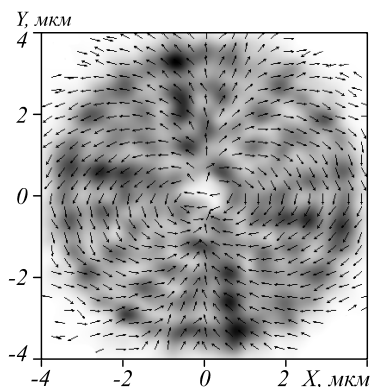


Рис. 5. Интенсивность излучения, прошедшего через метаповерхность, изображенную на рис. 4а (негатив). Стрелками показано направление поляризации по полю

Как видно из рис. 5, преобразование с помощью метаповерхности не дает равномерного светового распределения интенсивности, так как в разных секто-

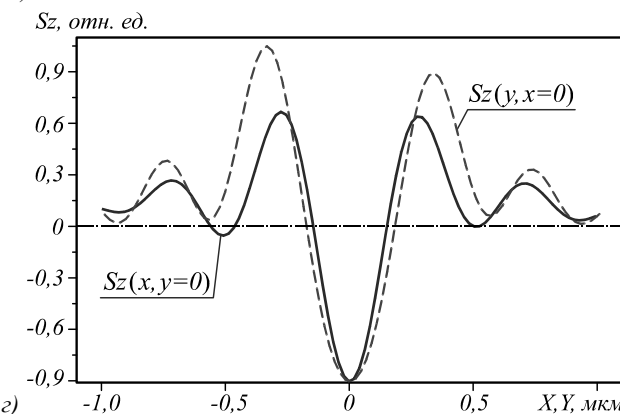
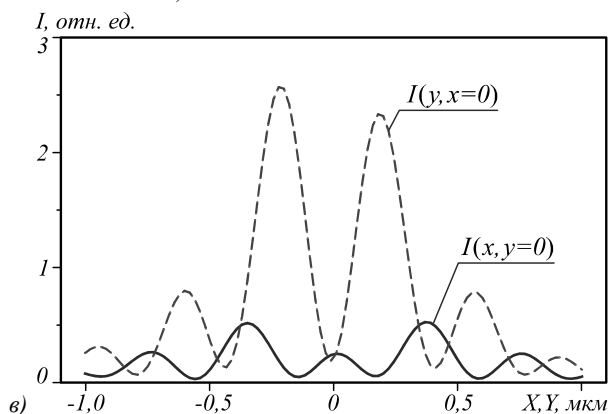
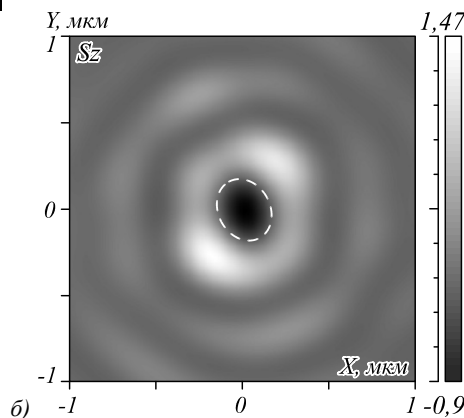
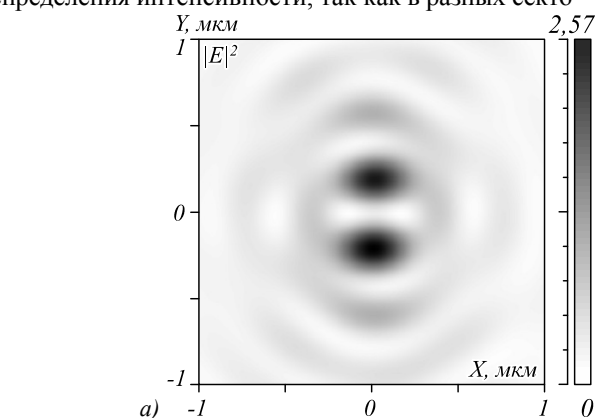


Рис. 6. Интенсивность (а) и продольная проекция вектора Пойнтинга (б) в фокусной плоскости на расстоянии 0,6 мкм от падающего поля с линейной поляризацией, прошедшего через металлинзу и их сечения (в, г) через центр фокусного пятна. Пунктиром (б) отмечена область с обратным потоком

Также видно, что обратный поток на рис. 6г примерно в 2 раза меньше, чем на рис. 3г. Это происходит из-за того, что энергетическая эффективность металлинзы (рис. 4б) примерно 33%.

4. Сравнение величины обратного потока в фокусе для поляризационной и фазовой сингулярности

В этом параграфе проведено сравнительное моделирование. На рис. 7 и 8 показаны распределения интенсивности и продольной компоненты вектора Пойнтинга (и их сечения) в плоскости острого фоку-

сах процент света, проходящий через них, различается. При этом поляризация излучения преобразовывается к виду рис. 2 поворотом рис. 5 на 180°.

На рис. 6 представлены результаты фокусировки излучения металлинзой (рис. 4б) для падающей плоской волны с линейной поляризацией, ограниченной апертурой 8 мкм, как и в предыдущем случае.

Видно, что в обоих случаях (на рис. 3г и рис. 6г) имеет место обратный поток энергии в центре фокусного пятна. Область с обратным потоком в плоскости XY представляет собой эллипс, диаметры которого составляют 0,27 мкм и 0,35 мкм (длина волны 0,633 мкм). В случае использования металлинзы (рис. 4б) при фокусировке теряется симметрия вдоль осей X и Y в проекции вектора Пойнтинга, что объясняется разной эффективностью при преобразовании поляризации в зависимости от угла поворота вектора электрического поля.

са, сформированного металлинзой (рис. 4б) при освещении плоской волной с левой (рис. 7) и правой (рис. 8) круговой поляризацией. Из рис. 7 и 8 видно, что в обоих случаях в плоскости фокуса в центре (на оптической оси) имеет место обратный поток световой энергии. Сравнивая максимальные (по модулю) значения величины обратного потока для трех рассмотренных случаев (0,9 на рис. 6г, 1 на рис. 7г и 0,83 на рис. 8г), приходим к выводу, что обратный поток при фокусировке оптического вихря с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией и при

фокусировке света с поляризационной сингулярно-

стью 2-го порядка примерно одинаковые.

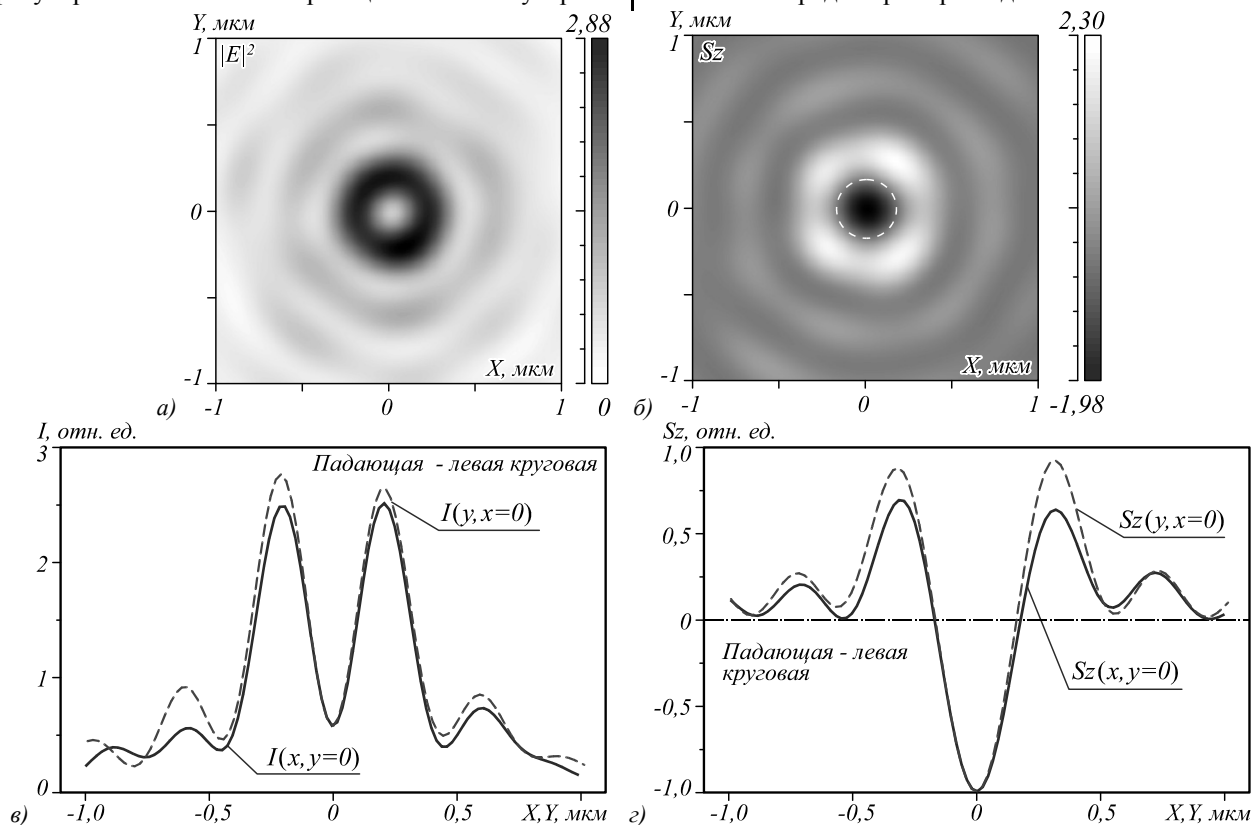


Рис. 7. Интенсивность (а) и продольная проекция вектора Пойнтинга (б) в плоскости фокуса на расстоянии 0,6 мкм от металлинзы и их сечения (в, г) через центр фокусного пятна. Падающее поле с левой круговой поляризацией

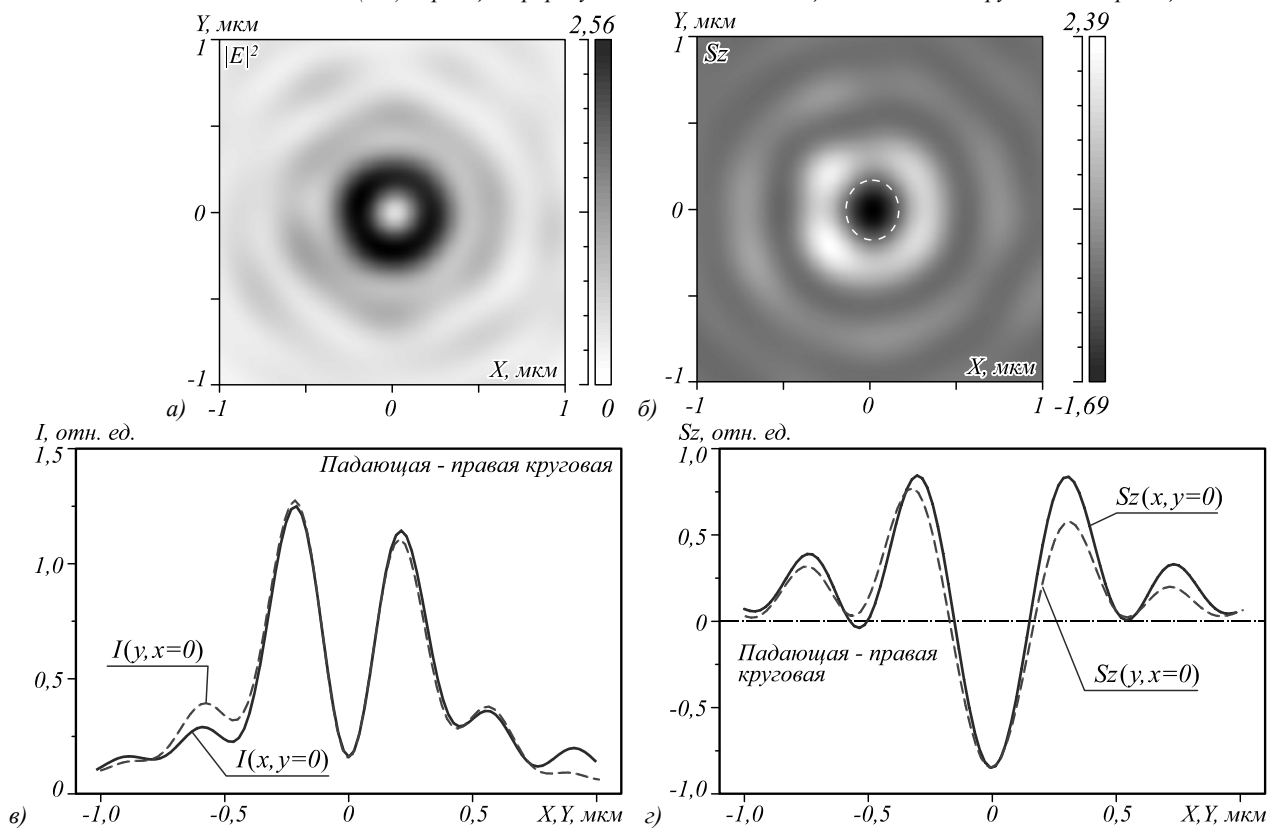


Рис. 8. Интенсивность (а) и продольная проекция вектора Пойнтинга (б) в фокусной плоскости на расстоянии 0,6 мкм от металлинзы и их сечения (в, г) через центр фокусного пятна. Падающее поле с правой круговой поляризацией

Заключение

В работе предложена и исследована многосекторная металлинза в тонкой плёнке прозрачного материала (например, аморфного кремния). Металлинза выполняет две функции: 1) преобразовывает падающую линейную поляризацию в азимутальную или радиальную поляризацию m -го порядка, а падающую плоскую волну с круговой поляризацией в оптический вихрь с топологическим порядком m и круговой поляризацией, и 2) остро фокусирует прошедшее излучение на расстоянии длины волны. Численно показано, что при $m=2$ в обоих случаях (поляризационного вихря и фазового вихря) вблизи плоскости фокуса на оптической оси имеет место обратный поток световой энергии, сравнимый с прямым потоком. Причём величина обратного потока при фокусировке фазового вихря почти совпадает с величиной обратного потока при фокусировке поляризационного вихря. Теоретически, как следует из (14), величина безвихревого обратного потока точно равна вихревому обратному потоку.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595) в части «Металлинза для формирования световых полей с сингулярностью», Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части «Моделирование фокусировки поля с поляризационной сингулярностью» (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20003) в части «Моделирование преобразования поляризации и фокусировки света металлинзой».

Литература

1. **Nye, J.F.** Dislocations in wave trains / F. Nye, M.V. Berry // *Proceedings of the Royal Society of London: Series A*. 1974. – Vol. 336. – P. 165-190.
2. **Soskin, M.S.** Singular optics / M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov. – In: *Progress in optics* / E. Wolf, ed. – Chap. 4. – Elsevier, 2001. – P. 219-276.
3. **Swartzlander, G.A., Jr.** The optical vortex coronagraph / G.A. Swartzlander, Jr. // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2009. – Vol. 11. – 094022.
4. **Swartzlander, G.A.** Optical vortex trapping of particles / K.T. Gahagan, G.A. Swartzlander // *Optics Letters*. – 1996. – Vol. 21. – P. 827-829.
5. **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. – 231110.
6. **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. – P. 52-54.
7. **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. – P. S82-S89.
8. **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. – 087701.
9. **Bandyopadhyay, A.** Wigner distribution of elliptical quantum optical vortex / A. Bandyopadhyay, R.P. Singh // *Optics Communications*. – 2011. – Vol. 284. – P. 256-261.
10. **Bandyopadhyay, A.** Entanglement of a quantum optical elliptical vortex / A. Bandyopadhyay, S. Prabhakar, R.P. Singh // *Physics Letters A*. – 2011. – Vol. 375. – P. 1926-1929.
11. **McMorran, B.J.** Electron vortex beams with high quantum 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. – P. 192-195.
12. **Стафеев, С.С.** Поведение продольной компоненты вектора Пойнтинга при острой фокусировке оптических вихрей с круговой поляризацией / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, Вып. 2. – С. 190-196. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-190-196.
13. **Sukhov, S.** On the concept of “tractor beams” / S. Sukhov, A. Dogariu // *Optics Letters*. – 2010. – Vol. 35. – P. 3847-3849.
14. **Котляр, В.В.** Формирование и фокусировка векторного оптического вихря с помощью металлинзы / В.В. Котляр, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 645-654. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-645-654.
15. **Mitri, F.G.** Reverse propagation and negative angular momentum density flux of an optical nondiffracting nonparaxial fractional Bessel vortex beam of progressive waves / F.G. Mitri // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2016. – Vol. 33. – P. 1661-1667.
16. **Salem, M.A.** Energy flow characteristics of vector X-wave / M.A. Salem, H. Bagci // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19. – P. 8526-8532.
17. **Vaveliuk, P.** Negative propagation effect in nonparaxial Airy beams / P. Vaveliuk, O. Martinez-Matos // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. 26913-26921.
18. **Berry, M.V.** Quantum backflow, negative kinetic energy, and optical retro-propagation / M.V. Berry // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. – 2010. – Vol. 43. – 415302.
19. **Irvine, W.N.M.** Linked and knotted beams of light / W.N.M. Irvine, D. Boumeester // *Nature Physics*. – 2008. – Vol. 4. – P. 716-720.
20. **Sugic, D.** Singular knot bundle in light / D. Sugic, M.R. Dennis // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2018. – Vol. 35, Issue 12. – P. 1987-1999.
21. **Yu, N.** Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction / N. Yu, P. Genevet, M.A. Kats, F. Avietta, J.P. Terienne, F. Capasso, Z. Gaburro // *Science*. – 2011. – Vol. 334, Issue 6054. – P. 333-337.
22. **Arbabi, A.** Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission / A. Arbabi, Y. Horie, M. Bagheri, A. Faraon // *Nature Nanotechnology*. – 2015. – Vol. 10, Issue 11. – P. 937-943.
23. **Kotlyar, V.V.** Thing high numerical aperture metalens / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev, G. Hu, L. O’Faolain, M.V. Koltlyar, D. Gibson, S. Song // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 7. – P. 8158-8167. – DOI: 10.1364/OE.25.008158.
24. **Tian, S.** Dielectric longitudinal bifocal metalens with adjustable intensity and high focusing efficiency / S. Tian,

- H. Guo, J. Hu, S. Zhuang // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, Issue 2. – P. 680-688.
25. **Park, C.S.** Structural color filter based on an all-dielectric metasurface exploiting silicon-rich silicon nitride nanodisks / C.S. Park, I. Koirala, S. Gao, V.R. Shrestha, S.S. Lee, D.Y. Choi // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, Issue 2. – P. 667-678.
26. **Kotlyar, V.V.** Design of diffractive optical elements modulating polarization / V.V. Kotlyar, O.K. Zalyalov // Optik. – 1996. – Vol. 103, Issue 3. – P. 125-130.
27. **Bomzon, Z.** Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings / Z. Bomzon, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // Optics Letters. – 2002. – Vol. 27, Issue 13. – P. 1141-1143.
28. **Niv, A.** Propagation-invariant vectorial Bessel beams obtained by use of quantized Pancharatnam-Berry phase optical elements / A. Niv, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29, Issue 3. – P. 238-240.
29. **Marrucci, L.** Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media / L. Marrucci, C. Manzo, D. Paparo // Physical Review Letters. – 2006. – Vol. 96. – P. 163905.
30. **Kotlyar, V.V.** The phase rotor filter / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, G.V. Uspleniev, M.V. Shinkarev, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39, Issue 5. – P. 1147-1154. – DOI: 10.1080/09500349214551151.
31. **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. – P. 075101. – DOI: 10.1088/2040-8986/aac4b3.
32. **Kotlyar, V.V.** Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov // Optics Letters. – 2018. – Vol. 43, Issue 12. – P. 2921-2924. – DOI: 10.1364/OL.43.002921.
33. **Стафеев, С.С.** Обратный поток энергии при острой фокусировке азимутально поляризованных пучков высших порядков Обратный поток энергии в фокусе цилиндрического векторного пучка / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 744-750. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-744-750.

Сведения об авторах

Котляр Виктор Викторович, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета (СГАУ). 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.

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.

Стафеев Сергей Сергеевич, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладная 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. ORCID: 0000-0002-7008-8007.

ГРПТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 25 декабря 2018 г. Окончательный вариант – 22 января 2019 г.

Comparison of backward flow values in the sharp focus of light fields with polarization and phase singularity

V.V. Kotlyar^{1,2}, A.G. Nalimov^{1,2}, S.S. Stafeev^{1,2}

¹IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia;

²Samara National Research University, Moskovskoye shosse, 34, 443086, Samara, Russia

Abstract

Using Jones matrices and vectors, we show that an optical metasurface composed of a set of subwavelength binary diffraction gratings and characterized by an anisotropic transmittance described by a polarization rotation matrix by the angle $m\varphi$, where φ is the polar angle, forms an m-

th order azimuthally or radially polarized beam when illuminated by linearly polarized light, generating an optical vortex with the topological charge m upon illumination by circularly polarized light. Such a polarization-phase converter (PPC) performs a spin-orbit transformation, similar to that performed by liquid-crystal q-plates. Using a FDTD method, it is numerically shown that when illuminating the PPC by a uniformly (linearly or circularly) polarized field with topological charge $m=2$ and then focusing the output beam with a binary zone plate, a reverse on-axis light flow is formed, being comparable in magnitude with the direct optical flow. Moreover, the reverse flows obtained when focusing the circularly polarized optical vortex with the topological charge $m=2$ and the second-order polarization vortex are shown to be the same in magnitude.

Keywords: optical vortex, polarization, backward flux, metalens.

Citation: Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS. Comparison of backward flow values in the sharp focus of light fields with polarization and phase singularity. *Computer Optics* 2019; 43(2): 174-183. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-174-183.

Acknowledgement: This work was partly funded by the Russian Science Foundation under grant No. 18-19-00595 ("A metasurface for generating light beams with singularity"), the Ministry of Science and Higher Education within the State assignment to the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS ("Numerically simulated focusing of a polarization vortex"), and the Russian Foundation for Basic Research under project No. 18-29-20003 ("Simulation of metalens-aided polarization conversion and focusing of light").

References

- [1] Nye JF, Berry MV. Dislocations in wave trains. *Proc Roy Soc Lond A*, 1974; 336: 165-190.
- [2] Soskin MS, Vasnetsov MV. Singular optics. In Book: Wolf E, ed. *Progress in optics*. Ch 4. Elsevier; 2001: 219-276.
- [3] Swartzlander GA, Jr. The optical vortex coronagraph. *J Opt A* 2009; 11: 094022.
- [4] Gahagan KT, Swartzlander GA. Optical vortex trapping of particles. *Opt Lett* 1996; 21: 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: 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: 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* 2002; 4: S82-S89.
- [8] Thidé B, Then H, Sjöholm J, Palmer N, 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: 087701.
- [9] Bandyopadhyay A, Singh RP. Wigner distribution of elliptical quantum optical vortex. *Opt Commun* 2011; 284: 256-261.
- [10] Bandyopadhyay A, Prabhakar S, Singh RP. Entanglement of a quantum optical elliptic vortex. *Phys Lett A* 2011; 375: 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: 192-195.
- [12] Stafeev SS, Nalimov AG. Longitudinal component of the Poynting vector of a tightly focused optical vortex with circular polarization. *Computer Optics* 2018; 42(2): 190-196. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-190-196.
- [13] Sukhov S, Dogariu A. On the concept of "tractor beams". *Opt Lett* 2010; 35: 3847-3849.
- [14] Kotlyar VV, Nalimov AG. A vector optical vortex generated and focused using a metalens. *Computer Optics* 2017; 41(5): 645-654. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-645-654.
- [15] Mitri FG. Reverse propagation and negative angular momentum density flux of an optical nondiffracting nonparaxial fractional Bessel vortex beam of progressive waves. *J Opt Soc Am A* 2016; 33: 1661-1667.
- [16] Salem MA, Bagei H. Energy flow characteristics of vector X-wave. *Opt Express* 2011; 19: 8526-8532.
- [17] Vaveliuk P, Martinez-Matos O. Negative propagation effect in nonparaxial Airy beams. *Opt Express* 2012; 20: 26913-26921.
- [18] Berry MV. Quantum backflow, negative kinetic energy, and optical retro-propagation. *J Phys A: Mathem & Theor* 2010; 43: 415302.
- [19] Irvine WNM, Boumeester D. Linked and knotted beams of light. *Nat Phys* 2008; 4: 716-720.
- [20] Sugic D, Dennis MR. Singular knot bundle in light. *J Opt Soc Am A* 2018; 35(12): 1987-1999.
- [21] Yu N, Genevet P, Kats MA, Avieta F, Terienne JP, Capasso F, Gaburro Z. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *Science* 2011; 334(6054): 333-337.
- [22] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, Faraon A. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission. *Nat Nanotechnology*, 2015; 10(11): 937-43.
- [23] Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS, Hu G, O'Faolain L, Kotlyar MV, Gibson D, Song S. Thing high numerical aperture metalens. *Opt Express* 2017; 25(7): 8158-8167. DOI: 10.1364/OE.25.008158.
- [24] Tian S, Guo H, Hu J, Zhuang S. Dielectric longitudinal bifocal metalens with adjustable intensity and high focusing efficiency. *Opt Express* 2019; 27(2): 680-688.
- [25] Park CS, Koirala I, Gao S, Shrestha VR, Lee SS, Choi DY. Structural color filter based on an all-dielectric metasurface exploiting silicon-rich silicon nitride nanodisks. *Opt Express* 2019; 27(2): 667-678.
- [26] Kotlyar VV, Zalyalov OK. Design of diffractive optical elements modulating polarization. *Optik* 1996; 103(3): 125-130.
- [27] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, Hasman E. Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings. *Opt Lett* 2002; 27(13): 1141-1143.

- [28] Niv A, Biener G, Kleiner V, Hasman E. Propagation-invariant vectorial Bessel beams obtained by use of quantized Pancharatnam-Berry phase optical elements. *Opt Lett* 2004; 29(3): 238-240.
- [29] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media. *Phys. Rev. Lett.*, 2006; 96: 163905.
- [30] Kotlyar VV, Khonina SN, Uspleniev GV, Shinkarev MV, Soifer VA. The phase rotor filter. *J Mod Opt* 1992; 39(5): 1147-1154. DOI: 10.1080/09500349214551151.
- [31] 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.
- [32] Kotlyar VV, Kovalev AA, Nalimov AG. 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.
- [33] Stafeev SS, Nalimov AG, Kotlyar VV. Energy backflow in a focal spot of the cylindrical vector beam. *Computer Optics* 2018; 42(5): 744-750. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-744-750.

Author's information

Victor Victorovich Kotlyar is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – 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 co-author 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.

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 RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 130 papers and 3 inventions. E-mail: anton@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 the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: sergey.stafeev@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7008-8007.

Received December 25, 2018. The final version – January 22, 2019.
