

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Поперечная интенсивность в остром фокусе цилиндрического векторного пучка второго порядка

Е.С. Козлова^{1,2}, С.С. Стафеев^{1,2}, С.А. Фомченков^{1,2}, В.В. Подлипов^{1,2}, В.В. Котляр^{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 сканирующего ближнепольного оптического микроскопа исследовалась область обратного потока энергии, формируемого сфокусированным амплитудной зонной пластинкой цилиндрическим векторным пучком второго порядка. Сравнение распределения интенсивности, детектируемого пирамидальным металлизированным кантилевером с отверстием, и характеристик светового поля, рассчитанных с помощью метода FDTD и формул Ричардса–Вольфа, позволяет говорить о чувствительности кантилевера к поперечной составляющей интенсивности, а не суммарной интенсивности или компонентам вектора Пойнтинга в области обратного потока энергии.

Ключевые слова: обратный поток энергии, векторный пучок, сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ), FDTD-метод.

Цитирование: Козлова, Е.С. Поперечная интенсивность в остром фокусе цилиндрического векторного пучка второго порядка / Е.С. Козлова, С.С. Стафеев, С.А. Фомченков, В.В. Подлипов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 2. – С. 165-171. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-835.

Citation: Kozlova ES, Stafeev SS, Fomchenkov SA, Podlipnov VV, Kotlyar VV. Transverse intensity at the tight focus of a second-order cylindrical vector beam. Computer Optics 2021; 45(2): 165-171. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-835.

Введение

Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ) занимает важное место в исследованиях в области плазмоники, нанофотоники и т.д. [1–3]. Благодаря СБОМ у исследователей есть возможность детектировать световые поля вблизи областей раздела двух сред в той зоне, где, помимо распространяющихся световых волн, фиксируемых средствами классической оптической микроскопии, присутствуют и затухающие волны, в регистрации которых обычный микроскоп бессилён.

Различают два типа кантилеверов для регистрации излучения в СБОМ: безапертурные (s-SNOM) и апертурные (a-SNOM). Несмотря на то, что в последнее время отмечается устойчивый рост использования безапертурных СБОМ, интерес к апертурным СБОМ сохраняется, в том числе в силу большей сложности измерений с помощью безапертурных СБОМ методик.

Существует два типа апертурных СБОМ: на основе металлизированного заостренного волокна и полые пирамидальные кантилеверы. Отличительной особенностью апертурных СБОМ, как это ясно из названия, является наличие на конце зонда небольшого отверстия – апертуры, с помощью которой и осуществляется детектирование проходящего излучения. Диаметр отверстия колеблется от десятка до

сотни нанометров. Само отверстие обычно имеет круглую форму. Однако для решения специфических задач может использоваться и другая форма отверстия апертурного СБОМ кантилевера. В работе [4] исследовалась поляризационная чувствительность апертурных СБОМ кантилеверов с прямоугольным отверстием. Было показано, что пропускательность излучения увеличивается, если поляризация падающего на кантилевер света направлена вдоль большей стороны прямоугольника.

В работе [5] апертурный СБОМ на основе волокна использовался для изучения интерференционной картины поверхностных плазмон-поляритонов, создаваемых светом разной поляризации. Интересный тип зондов был предложен в работе [6], где в отверстии пирамидального кантилевера была закреплена микросфера. Отдельного упоминания заслуживают апертурные кантилеверы с отверстием в форме «галстука-бабочки» (bowtie). Такие отверстия можно изготовить как на металлизированных волноводах [7, 8], так и в пирамидальных кантилеверах [9]. Такая форма отверстия работает как наноантенна, позволяя локально усиливать световое поле, например, для литографических целей. Поляризационные свойства пирамидальных кантилеверов исследовались в работах [10, 11], было показано, что в области ближнего поля такие кантилеверы более чувствительны к поляриза-

ции проходящего через них излучения, чем вдали от раздела двух сред. Кантелефер с квадратным отверстием использовался в работе [12] для детектирования люминесцирующих наночастиц. В работе [13] исследовалась острая фокусировка лазерного излучения зонной пластинкой Френеля и было показано, что форма фокусного пятна, зарегистрированная стандартным пирамидальным СБОМ кантелефером ближе к форме поперечной составляющей интенсивности, а не суммарной интенсивности и не продольной компоненты вектора Пойнтинга.

Ранее нами численно исследовалась острая фокусировка цилиндрических векторных пучков второго порядка [14] и оптических вихрей с топологическим зарядом два [15] фазовыми зонными пластинками и было показано, что в центре фокусных пятен наблюдаются области, в которых направление вектора Пойнтинга противоположно направлению распространения пучка. Экспериментального исследования с помощью СБОМ острой фокусировки таких пучков ранее осуществлено не было.

Отметим, что зонные пластинки Френеля и металинзы на их основе получили широкое применение в области фокусировки излучения [16–21]. Отдельный интерес представляют спиральные зонные пластинки, которые позволяют одновременно формировать и фокусировать вихревой пучок [22–26]. В последнее время у научного сообщества возрос интерес к исследованию фокусировки более сложных векторных полей. Так, в [18] рассматривается металинза для эффективного управления амплитудой, фазой и поляризацией, которая была изготовлена на тонкой пленке аморфного кремния. При длине волны падающего излучения, равной 635 нм, наностержни из аморфного кремния сильно ограничивают магнитные дипольные резонансы с разностью фаз π и, таким образом, достигают высокого пропускания для кросс-поляризации и нулевого коэффициента пропускания ко-поляризации. Изготовленная металинза показывает в 1,5 раза более высокую эффективность фокусировки, а также в 2,3 раза более высокую контрастность изображения, чем обычная ЗП на основе тонкой пленки хрома (100 нм). В работе [27] теоретически и численно исследовались характеристики радиально и азимутально поляризованных пучков после прохождения через плазмонные субволновые структуры в виде кольцевых щелей. В [28] с помощью FDTD-метода исследуется фокусировка цилиндрических векторных пучков спиральной металинзой с топологическим зарядом $m=1$, числовой апертурой 1 и фокусным расстоянием, равным длине падающей волны. Показано, что данная линза создает вблизи поверхности фокальное пятно в форме круга с диаметром меньше дифракционного предела для падающих ТЕ-волн или кольца для ТМ-волн, в картине интенсивности образующегося фокального пятна присутствуют локальные (симметричные и асимметричные)

области обратного потока энергии, которые могут располагаться как в центре, так и на периферии.

В данной работе рассмотрена фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка амплитудной зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием 532 нм и диаметром 15 мкм. Зонная пластинка изготавливалась средствами электронной литографии, химического травления и лифт-офф процесса в алюминиевой пленке толщиной 50 нм. Численно методом FDTD и с помощью формул Ричардса–Вольфа было показано, что такая зонная пластинка формирует в фокусном пятне на оси область, в которой направление вектора Пойнтинга противоположно направлению распространения пучка (область обратного потока энергии). И распределение продольной компоненты вектора Пойнтинга, и интенсивности имеют вид колец, но у продольной компоненты вектора Пойнтинга кольцо симметричное, а у интенсивности – асимметричное, обусловленное неравномерным вкладом различных составляющих. В частности, поперечная составляющая интенсивности ненулевая на оптической оси и имеет вид трех пиков, расположенных вдоль оси x . Затем область обратного потока исследовалась с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа Интегра Спектра (НТ-МДТ) на основе полого пирамидального апертурного кантелефера. Экспериментально фиксировалось пиковое распределение интенсивности в фокусе (с субволновыми размерами $FWHM_x=0,39\lambda$ и $FWHM_y=0,71\lambda$). Данный факт является доказательством чувствительности кантелефера к поперечной составляющей интенсивности светового поля в области обратного потока энергии.

Дизайн и изготовление зонной пластинки

Зонные пластинки рассчитывались для освещения их длиной волны $\lambda=532$ нм и фокусировки на расстояние $f=0,532$ мкм. Радиусы колец зонной пластинки рассчитывались по формуле $r_m=(m\lambda f-m^2\lambda^2/4)^{1/2}$. Диаметр изготавливаемых пластинок был равен 15 мкм. Числовая апертура линзы при таких параметрах равна $NA=0,99749$.

Для изготовления субволновых дифракционных оптических элементов использовалась технология, включающая литографию, химическое травление и лифт-офф процесс. В качестве подложки будущего элемента использовался кварцевый субстрат. Шероховатость поверхности составляла меньше 10 нм. Металлическая пленка напылялась на кварцевую подложку с использованием напыляющей магнетронной системы CarolineD12A (ESTO-Vacuum, Inc.). Металлический слой формировался в процессе осаждения алюминия. Все пленки осаждались при давлении в вакууме 10^{-3} Па и мощности 300–700 Вт. Толщина алюминиевой пленки контролировалась временем напыления и составила 50 нм. Далее в центрифуге наносился резист для электронно-лучевой литогра-

фии. Толщина нанесенного резиста была равна 400 нм (контролировалась на профилометре P-16 (KLA-Tencor, Inc.)). Экспозиция резиста выполнялась SEM-микроскопом с разрешением 10 нм. Затем химически осуществлялось удаление оставшейся маски из резиста. Получившаяся структура очищалась и запекалась для повышения адгезивных свойств. С помощью установки магнетронного напыления CarolineD12A (ESTO-Vacuum, Inc.) наносилась тонкая пленка хрома. Напыление происходило при следующих параметрах: 10^{-3} Па и 700 Вт. Толщина пленки составляла 45 нм. Далее применялся лифт-офф процесс: с помощью ацетона удалялся резист вместе с пленкой хрома на нем. Это позволяло получить негативную маску в хrome по отношению к маске на резисте. Через пленку хрома металлический слой удалялся с помощью NaOH. На последнем этапе маска хрома удалялась гексацианоферратом (III) калия ($K_3[Fe(CN)_6]$) в течение 10 минут.

Изображение получившейся зонной пластинки показано на рис. 1.

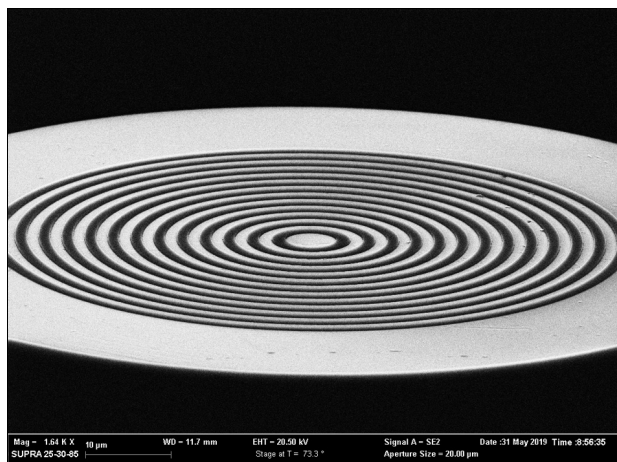


Рис. 1. СЭМ-изображение изготовленной зонной пластинки

Численное моделирование методом FDTD

Моделирование было выполнено с помощью $(FD)^2TD$ -метода, реализованного в программном обеспечении FullWAVE (RSoft). При расчетах использовались следующие параметры сетки: шаг по пространственным координатам составил 15 нм, шаг по псевдовремени $c\Delta t$ был выбран равным 7,5 нм в соответствии с условием Куранта. В ходе анализа результатов моделирования производилось усреднение компонент поля по 10 периодам. Параметры зонной пластинки в моделировании (диаметр, фокусное расстояние, глубина рельефа) соответствовали параметрам изготовленной пластинки, но не учитывались возможные погрешности изготовления.

Интенсивность в фокусе рассчитывалась по формуле $I = |E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2 = I_x + I_y + I_z$, а вектор Пойнтинга – по формуле $\mathbf{S} = \text{Re}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{H})$, где \mathbf{E} и \mathbf{H} – векторы напряженности электрического и магнитного по-

лей в фокусе. Начальное световое поле было выбрано в виде $\mathbf{E} = (\sin 2\varphi, \cos 2\varphi, 0)$, где φ – азимутальный угол в плоскости XY при $z=0$. Результаты фокусировки на расстоянии $f = 532$ нм показаны на рис. 2–3.

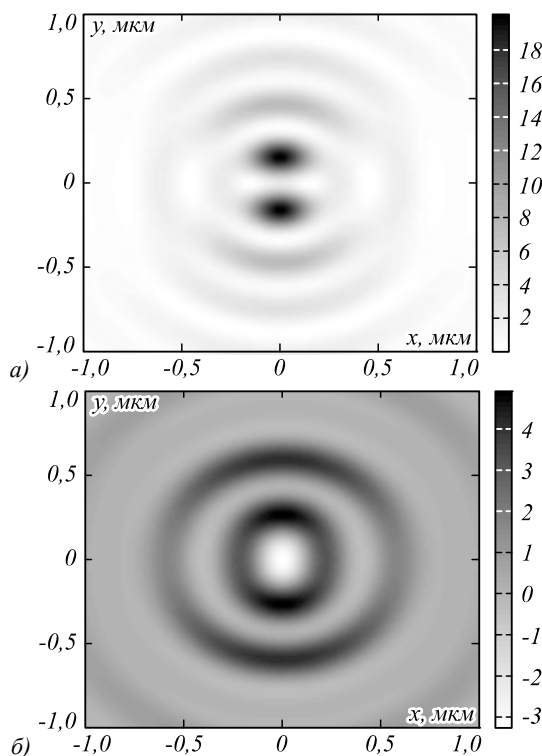


Рис. 2. Полная интенсивность (а) и продольная компонента вектора Пойнтинга (б) в фокальной плоскости

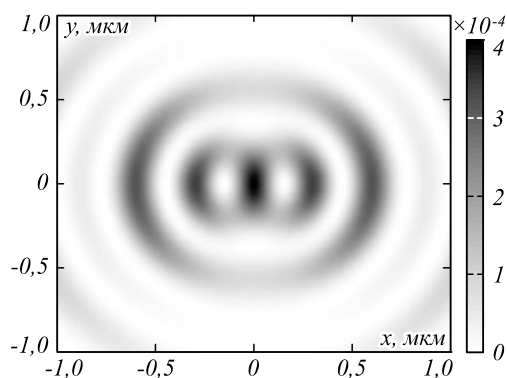


Рис. 3. Поперечная составляющая интенсивности $I_x + I_y$

Из рис. 2 и 3 видно, что распределение интенсивности и продольной компоненты вектора Пойнтинга в плоскости фокуса имеет вид колец: асимметричного в случае интенсивности (рис. 2а) и симметричного в случае с продольной компонентой вектора Пойнтинга (рис. 2б). При этом в центре кольца, формируемого продольной компонентой вектора Пойнтинга, наблюдаются отрицательные значения (обратный поток энергии). Асимметрия кольца интенсивности обеспечивается неравномерным вкладом в формирование этого кольца отдельных составляющих интенсивности – продольная составляющая формирует верхнюю и нижнюю части

кольца (имеет вид двух пиков, расположенных вдоль оси y), а поперечная формирует правую и левую части кольца (имеет вид трех пиков, расположенных вдоль оси x). При этом именно поперечная составляющая интенсивности ненулевая на оси z (рис. 3).

Численное моделирование по формулам Ричардса–Вольфа

Проведем также моделирование фокусировки цилиндрического векторного пучка второго порядка (длина волны 532 нм) зонной пластинкой Френеля с помощью формул Ричардса–Вольфа [29]:

$$U(\rho, \psi, z) = -\frac{if}{\lambda} \int_0^{\alpha_{\max}} \int_0^{2\pi} B(\theta, \varphi) T(\theta) l(\theta) \mathbf{P}(\theta, \varphi) \times \exp\{ik[\rho \sin \theta \cos(\varphi - \psi) + z \cos \theta]\} \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (1)$$

где $U(\rho, \psi, z)$ – напряжённость электрического или магнитного поля, $B(\theta, \varphi)$ – электрическое или магнитное поле на входе широкоапертурной системы в координатах выходного зрачка (θ – полярный угол, φ – азимутальный), $T(\theta)$ – функция аподизации линзы, f – фокусное расстояние, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны (в моделировании считалась равной 532 нм), α_{\max} – максимальный полярный угол, определяемый числовой апертурой линзы ($NA = \sin \alpha_{\max}$), $l(\theta)$ – распределение входного поля в координатах выходного зрачка, $\mathbf{P}(\theta, \varphi)$ – вектор поляризации, для напряжённости электрического и магнитного полей имеющий вид:

$$\mathbf{P}(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \cos \varphi \end{bmatrix} a(\theta, \varphi) + \begin{bmatrix} \sin \varphi \cos \varphi (\cos \theta - 1) \\ 1 + \sin^2 \varphi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{bmatrix} b(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где $a(\theta, \varphi)$ и $b(\theta, \varphi)$ – функции, описывающие состояние поляризации x - и y -компонент напряжённостей фокусируемого пучка.

Для светового поля с цилиндрической поляризацией m -го порядка вектора Джонса будут иметь вид:

$$E(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} a(\theta, \varphi) \\ b(\theta, \varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(m\varphi) \\ \cos(m\varphi) \end{pmatrix} \quad (3)$$

для напряжённости электрического поля и

$$H(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} a(\theta, \varphi) \\ b(\theta, \varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos(m\varphi) \\ -\sin(m\varphi) \end{pmatrix} \quad (4)$$

для напряжённости магнитного поля. Вектор Пойнтинга вычислялся по формуле $\mathbf{S} = \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)$. При расчете считалось, что зонная пластинка освещается ци-

линдрическим векторным пучком второго порядка в форме моды Лаггерра–Гаусса (0,1), имеющим в координатах выходного зрачка вид:

$$l(\theta) = \text{tg}(\theta) \exp\left\{-\beta^2 \frac{\text{tg}^2 \theta}{\text{tg}^2 \theta_{\max}}\right\}, \quad (5)$$

где параметр β равен отношению радиуса линзы к радиусу пучка $\beta = R/\omega$. Параметр β был равен единице, что соответствует эксперименту.

Отметим, что формула (1) справедлива при фокусировке света в свободном пространстве, вдали от раздела двух сред, однако качественно результаты будут совпадать с расчетом методом FDTD. Результаты фокусировки приведены на рис. 4–5: на рис. 4 показано распределение интенсивности $I = I_x + I_y + I_z$ и продольной компоненты вектора Пойнтинга S_z , а на рис. 5 – распределение поперечной $I_r = I_x + I_y$ и продольной I_z составляющих интенсивности.

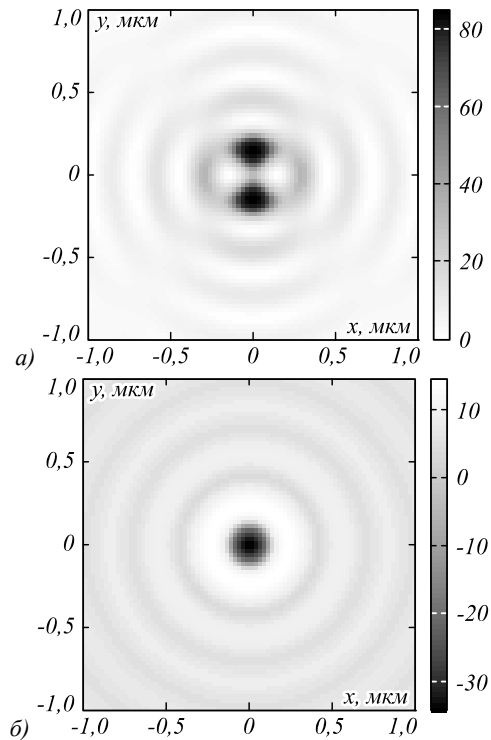


Рис. 4. Распределение полной интенсивности $I = I_x + I_y + I_z$ (а) и продольной компоненты вектора Пойнтинга S_z (б) в фокальной плоскости

В данном случае наблюдаются качественно такие же распределения интенсивности, как и при моделировании FDTD-методом, но в распределении поперечной компоненты интенсивности центральный пик больше (рис. 5а), чем при фокусировке плоского волнового фронта (рис. 3). Вызвано это использованием моды Лаггерра–Гаусса (5), которая эквивалентна кольцевой апертуре. Центральная часть зонной пластинки не работает при таком освещении, а эффекты острой фокусировки усиливаются. Отметим также, что поворот исходного пучка на 90 градусов приведет к такому же повороту рис. 4 и 5 и максимумы попе-

речной составляющей (рис. 5а) будут расположены вдоль вертикальной оси.

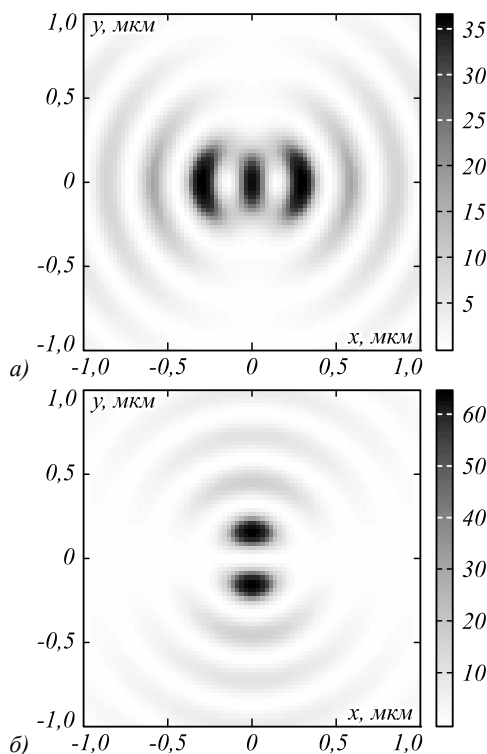


Рис. 5. Распределение поперечной $I_x + I_y$ (а) и продольной составляющей интенсивности I_z (б) в фокальной плоскости

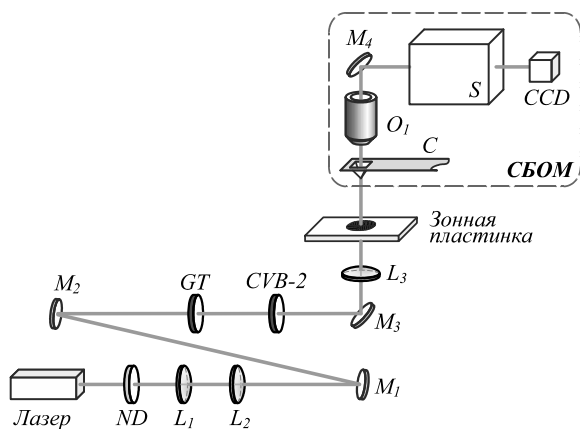


Рис. 6. Схема эксперимента. ND – фильтр нейтральной интенсивности, L_1, L_2, L_3 ($f_1 = 35$ мм, $f_2 = 100$ мм, $f_3 = 10$ мм) – линзы, M_1, M_2, M_3, M_4 – зеркала, GT – поляризационная призма Глана–Тейлора, CVB-2 – преобразователь поляризации (Thorlabs WPV10-532), C – кантилевер (диаметр отверстия 100 нм, SNOM_C, NT-MDT), O_1 – 100× объектив (100X Mitutoyo Plan Apo Infinity Corrected Long WD Objective), S – спектрометр (Solar III, Nanofinder 30), CCD-камера (Andor, DV401-BV)

Эксперимент средствами сканирующей ближнепольной оптической микроскопии

С помощью сканирующего ближнепольного микроскопа СБОМ Интегра Спектра изучалась фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка. Схема эксперимента показана на рис. 6.

Кантилевер СБОМ имеет вид полой пирамидки из тонкого слоя алюминия с отверстием на вершине. Диаметр отверстия составляет около 100 нм. Поперечное сканирование области фокуса осуществлялось с точностью 35 нм.

Измерения на СБОМ показали, что распределение интенсивности в фокусе имеет пиковый характер. Пример распределения интенсивности в фокусе (на расстоянии 0,6 мкм от поверхности) и его сечения показаны на рис. 7.

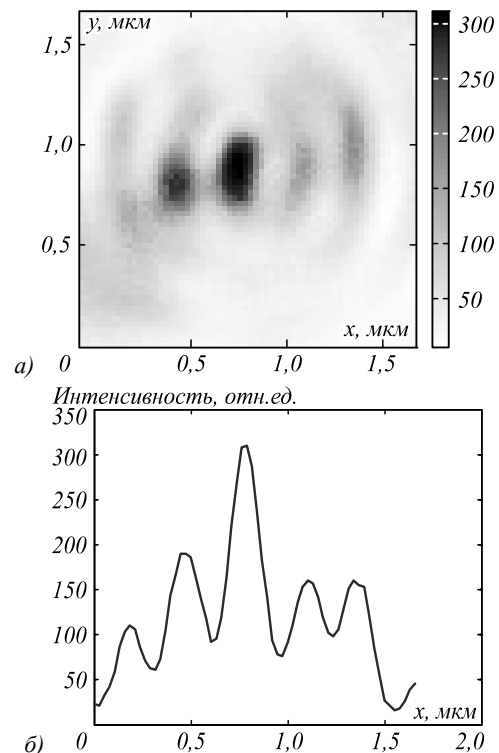


Рис. 7. Распределение интенсивности в фокусе, измеренное на СБОМ (а), и его сечение вдоль оси x (б)

Размеры фокусного пятна на рис. 7 составили $FWHM_x = 0,39\lambda$ и $FWHM_y = 0,71\lambda$.

Из сравнения рис. 3, 5а и 7 видно качественное согласование результатов, полученных на СБОМ (рис. 7), с распределением поперечной составляющей интенсивности светового поля $I_x + I_y$ в моделировании (рис. 3 и 5а). Хотя в численном моделировании боковые пики вдоль оси y получились более выраженными, чем в эксперименте.

Заключение

В данной работе рассмотрена фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка амплитудной зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием 532 нм и диаметром 15 мкм, изготовленной средствами электронной литографии, химического травления и лифт-офф процесса в алюминиевой пленке толщиной 50 нм. Численно было показано, что такая зонная пластинка формирует в фокусном пятне на оси область, в которой направление вектора Пойнтинга противоположно направлению распро-

странения пучка (область обратного потока энергии), а поперечная составляющая интенсивности ненулевая на оптической оси и имеет вид трех пиков, расположенных вдоль оси x . Область обратного потока исследовалась с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа Интегра Спектра (НТ-МДТ) на основе полого пирамидального апертурного кантилевера. Экспериментально фиксировалось пиковое распределение интенсивности в фокусе (с субволновыми размерами $\text{FWHM}_x = 0,39\lambda$ и $\text{FWHM}_y = 0,71\lambda$). Сравнение распределений интенсивности, детектируемой СБОМ кантилевером, и характеристик светового поля, рассчитанных с помощью метода FDTD и формул Ричардса–Вольфа, позволяет говорить о чувствительности кантилевера к поперечной составляющей интенсивности, а не суммарной интенсивности или компонентам вектора Пойнтинга в области обратного потока энергии.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.П. Порфирьеву за предоставление оборудования, необходимого в проведении эксперимента.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в частях «Введение» и «Заключение», Российского научного фонда (грант № 18-19-00595) в части «Эксперимент средствами сканирующей ближнепольной оптической микроскопии», Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, (грант № 18-07-01380) в части «Дизайн и изготовление зонной пластинки», (грант № 18-29-20003) в части «Численное моделирование методом FDTD».

Литература

1. **Abed, J.** Investigation of broadband surface plasmon resonance of dewetted Au structures on TiO₂ by aperture-probe SNOM and FDTD simulations / J. Abed, F. Alexander, I. Taha, N. Rajput, C. Aubry, M. Jouiad // *Plasmonics*. – 2019. – Vol. 14, Issue 1. – P. 205-218.
2. **Heydarian, H.** Dual-color plasmonic probes for improvement of scanning near-field optical microscopy / H. Heydarian, A. Shahmansouri, P. Yazdanfar, B. Rashidian // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2018. – Vol. 35, Issue 3. – P. 627-635.
3. **Minin, I.V.** Plasmonic nanojet: an experimental demonstration: publisher's note / I.V. Minin, O.V. Minin, I.A. Glinsky, R.A. Khabibullin, R. Malureanu, A.V. Lavrinenko, D.I. Yakubovsky, A.V. Arsenin, V.S. Volkov, D.S. Ponomarev // *Optics Letters*. – 2020. – Vol. 45, Issue 13. – P. 3418.
4. **Werner, S.** Cantilever probes with aperture tips for polarization-sensitive scanning near-field optical microscopy / S. Werner, O. Rudow, C. Mihalcea, E. Oesterschulze // *Applied Physics A*. – 1998. – Vol. 66, Issue 7. – P. S367-S370.
5. **Dvořák, P.** Imaging of near-field interference patterns by aperture-type SNOM – influence of illumination wavelength and polarization state / P. Dvořák, Z. ědes, M. Kvapil, T. Šamořil, F. Ligmajer, M. Hrtoř, R. Kalousek, V. Krápek, P. Dub, J. Spousta, P. Varga, T. Šikola // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 14. – P. 16560-16573.
6. **González Mora, C.A.** Microsphere-based cantilevers for polarization-resolved and femtosecond SNOM / C.A. González Mora, M. Hartelt, D. Bayer, M. Aeschlimann, E.A. Ilin, E. Oesterschulze // *Applied Physics B*. – 2016. – Vol. 122, Issue 4. – 86.
7. **Atie, E.M.** Remote optical sensing on the nanometer scale with a bowtie aperture nano-antenna on a fiber tip of scanning near-field optical microscopy / E.M. Atie, Z. Xie, A. El Eter, R. Salut, D. Nedeljkovic, T. Tannous, F.I. Baida, T. Grosjean // *Applied Physics Letters*. – 2015. – Vol. 106, Issue 15. – 151104.
8. **El Eter, A.** Fiber-integrated optical nano-tweezer based on a bowtie-aperture nano-antenna at the apex of a SNOM tip / A. El Eter, N.M. Hameed, F.I. Baida, R. Salut, C. Filiatre, D. Nedeljkovic, E. Atie, S. Bole, T. Grosjean // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 8. – P. 10072-10080.
9. **Murphy-DuBay, N.** Nanopatterning using NSOM probes integrated with high transmission nanoscale bowtie aperture / N. Murphy-DuBay, L. Wang, E.C. Kinzel, S.M.V. Uppuluri, X. Xu // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, Issue 4. – P.2584-2589.
10. **Biagioni, P.** Unexpected polarization behavior at the aperture of hollow-pyramid near-field probes / P. Biagioni, D. Polli, M. Labardi, A. Pucci, G. Ruggeri, G. Cerullo, M. Finazzi, L. Duò // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 87, Issue 22. – 223112.
11. **Biagioni, P.** Near-field vs. far-field polarization properties of hollow pyramid SNOM tips / P. Biagioni, M. Coduri, D. Polli, T. Virgili, M. Labardi, G. Cerullo, M. Finazzi, L. Duò // *Physica Status Solidi (C)*. – 2005. – Vol. 2, Issue 12. – P. 4078-4082.
12. **Shershulin, V.A.** Use of scanning near-field optical microscope with an aperture probe for detection of luminescent nanodiamonds / V.A. Shershulin, S.R. Samoylenko, O.A. Shenderova, V.I. Konov, I.I. Vlasov // *Laser Physics*. – 2017. – Vol. 27, Issue 2. – 025201.
13. **Kotlyar, V.V.** Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, Y. Liu, L. O'Faolain, A.A. Kovalev // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52, Issue 3. – P. 330-339. – DOI: 10.1364/AO.52.000330.
14. **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.
15. **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.
16. **Liu, Q.** Validation of vectorial theories for the focusing of high numerical aperture Fresnel zone plates / Q. Liu, T. Liu, S. Yang, T. Wang, Y. Wang // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 429. – P. 119-126.
17. **Minerbi, E.** Nonlinear metasurface Fresnel zone plates for terahertz generation and manipulation / E. Minerbi, S. Keren-Zur, T. Ellenbogen // *Nano Letters*. – 2019. – Vol. 19, Issue 9. – P. 6072-6077.
18. **Yoon, G.** Metasurface zone plate for light manipulation in vectorial regime / G. Yoon, J. Jang, J. Mun, K.T. Nam, J. Rho // *Communications Physics*. – 2019. – Vol. 2, Issue 1. – 156.
19. **Kotlyar, V.V.** Tight focusing of laser light using a chromium Fresnel zone plate / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, M.V. Kotlyar, L. O'Faolain, E.S. Kozlova //

- Optics Express – 2017. – Vol. 25, Issue 17. – P. 19662-19671. – DOI: 10.1364/OE.25.019662.
20. **Mote, R.G.** Focusing behavior of 2-dimensional plasmonic conical zone plate / R.G. Mote, O.V. Minin, I.V. Minin // Optical and Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 49, Issue 8. – 271.
21. **Kim, J.** Numerical and experimental study on multi-focal metallic Fresnel zone plates designed by the phase selection rule via virtual point sources / J. Kim, H. Kim, G.-Y. Lee, J. Kim, B. Lee, Y. Jeong // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, Issue 3. – 449.
22. **Yang, J.** Dual-type fractal spiral zone plate for generating sequence of square optical vortices / J. Yang, Y. Zhong, C. Zheng, S. Ding, H. Zang, E. Liang, L. Cao // Journal of the Optical Society of America A. – 2019. – Vol. 36, Issue 5. – P. 893-897.
23. **Zang, H.** Fractal spiral zone plate with high-order harmonics suppression / H. Zang, S. Ding, L. Wei, C. Wang, Q. Fan, L. Cao // Applied Optics. – 2019. – Vol. 58, Issue 31. – P. 8680-8686.
24. **Козлова, Е.С.** Моделирование генерации оптических вихрей с помощью спиральной зонной пластинки из серебра / Е.С. Козлова // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 977-984. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-977-984.
25. **Cheng, S.** Composite spiral zone plate / S. Cheng, T. Xia, M. Liu, C. Zheng, H. Zang, S. Tao // IEEE Photonics Journal. – 2019. – Vol. 11, Issue 1. – P. 1-11.
26. **Козлова, Е.С.** Исследование влияния параметров амплитудных спиральных зонных пластинок на формируемый обратный поток энергии / Е.С. Козлова // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 1093-1097. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1093-1097.
27. **Kim, H.** Theoretical and numerical study of cylindrical-vector-mode radiation characteristics in periodic metallic annular slits and their applications / H. Kim, Y. Jeong // Current Optics and Photonics. – 2018. – Vol. 2, Issue 5 – P. 482-487.
28. **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.
29. **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. – 1959. – Vol. 253, Issue 1274. – P. 358-379.

Сведения об авторах

Козлова Елена Сергеевна, 1989 года рождения. В 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и информатика». Кандидат физико-математических наук с 2014 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы. E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

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. ORCID: 0000-0002-7008-8007.

Фомченков Сергей Александрович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладные математика и физика». Аспирант кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптические фильтры. E-mail: s.a.fom@mail.ru.

Подлипов Владимир Владимирович, инженер НИЛ-35 и ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженер лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИ РАН). Область научных интересов: математическое моделирование, электронно-лучевая литография и оптимизация технологических процессов травления в микроэлектронике, дифракционной оптике, технологии обработки и контроля поверхности. E-mail: podlipovvv@ya.ru.

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.

ГРНТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 13 ноября 2020 г. Окончательный вариант – 28 декабря 2020 г.

Transverse intensity at the tight focus of a second-order cylindrical vector beam

E.S. Kozlova^{1,2}, S.S. Stafeev^{1,2}, S.A. Fomchenkov^{1,2}, V.V. Podlipnov^{1,2}, V.V. Kotlyar^{1,2}

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

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

Abstract

In this paper, an effect of a reverse energy flow at the focus of a second-order cylindrical vector beam which passed through amplitude zone plate was investigated with a scanning near-field optical microscope. A comparison of the intensity distribution detected with a pyramidal metalized cantilever with a hole and the characteristics of the light field calculated using a FDTD method and the Richards-Wolf formulas suggests that the cantilever is sensitive to the transverse intensity component rather than the total intensity or the components of the Poynting vector in the backflow region.

Citation: Kozlova ES, Stafeev SS, Fomchenkov SA, Podlipnov VV, Kotlyar VV. Transverse intensity at the tight focus of a second-order cylindrical vector beam. *Computer Optics* 2021; 45(2): 165-171. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-835.

Acknowledgements: This work was supported by the RF Ministry of Science and Higher Education under the government project of FSRC "Crystallography and Photonics" RAS ("Introduction" and "Conclusion" Sections), the Russian Science Foundation under project No. 18-19-00595 ("An experiment by means of scanning near-field optical microscopy"), and the Russian Foundation for Basic Research under projects No. 18-07-01380 ("Design and synthesis of a zone plate"), and No. 18-29-20003 ("Numerical modeling by a FDTD method").

References

- [1] Abed J, Alexander F, Taha I, Rajput N, Aubry C, Jouiad M. Investigation of broadband surface plasmon resonance of dewetted Au structures on TiO₂ by aperture-probe SNOM and FDTD simulations. *Plasmonics* 2019; 14(1): 205-218.
 - [2] Heydarian H, Shahmansouri A, Yazdanfar P, Rashidian B. Dual-color plasmonic probes for improvement of scanning near-field optical microscopy. *J Opt Soc Am B* 2018; 35(3): 627-635.
 - [3] Minin IV, Minin OV, Glinskiy IA, Khabibullin RA, Malureanu R, Lavrinenko AV, Yakubovsky DI, Arsenin AV, Volkov VS, Ponomarev DS. Plasmonic nanojet: an experimental demonstration: publisher's note. *Opt Lett* 2020; 45(13): 3418.
 - [4] Werner S, Rudow O, Mihalcea C, Oesterschulze E. Cantilever probes with aperture tips for polarization-sensitive scanning near-field optical microscopy. *Appl Phys A* 1998; 66(7): S367-S370.
 - [5] Dvořák P, Édes Z, Kvapil M, Šamořil T, Ligmajer F, Hrtoň M, Kalousek R, Křápek V, Dub P, Spousta J, Varga P, Šikola T. Imaging of near-field interference patterns by aperture-type SNOM – influence of illumination wavelength and polarization state. *Opt Express* 2017; 25(14): 16560-16573.
 - [6] González Mora CA, Hartelt M, Bayer D, Aeschlimann M, Ilin EA, Oesterschulze E. Microsphere-based cantilevers for polarization-resolved and femtosecond SNOM. *Appl Phys B* 2016; 122(4): 86.
 - [7] Atie EM, Xie Z, El Eter A, Salut R, Nedeljkovic D, Tanous T, Baida FI, Grosjean T. Remote optical sensing on the nanometer scale with a bowtie aperture nano-antenna on a fiber tip of scanning near-field optical microscopy. *Appl Phys Lett* 2015; 106(15): 151104.
 - [8] El Eter A, Hameed NM, Baida FI, Salut R, Filiatre C, Nedeljkovic D, Atie E, Bole S, Grosjean T. Fiber-integrated optical nano-tweezer based on a bowtie-aperture nano-antenna at the apex of a SNOM tip. *Opt Express* 2014; 22(8): 10072-10080.
 - [9] Murphy-DuBay N, Wang L, Kinzel EC, Uppuluri SM V., Xu X. Nanopatterning using NSOM probes integrated with high transmission nanoscale bowtie aperture. *Opt Express* 2008; 16(4): 2584-2589.
 - [10] Biagioni P, Polli D, Labardi M, Pucci A, Ruggeri G, Cerullo G, Finazzi M, Duò L. Unexpected polarization behavior at the aperture of hollow-pyramid near-field probes. *Appl Phys Lett* 2005; 87(22): 223112.
 - [11] Biagioni P, Coduri M, Polli D, Virgili T, Labardi M, Cerullo G, Finazzi M, Duò L. Near-field vs. far-field polarization properties of hollow pyramid SNOM tips. *Phys status solidi C* 2005; 2(12): 4078-4082.
 - [12] Shershulin VA, Samoylenko SR, Shenderova OA, Konov VI, Vlasov II. Use of scanning near-field optical microscope with an aperture probe for detection of luminescent nanodiamonds. *Laser Phys* 2017; 27(2): 025201.
 - [13] Kotlyar VV, Stafeev SS, Liu Y, O'Faolain L, Kovalev AA. Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light. *Appl Opt* 2013; 52(3): 330-339. DOI: 10.1364/AO.52.000330.
 - [14] 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 Photon J* 2019; 11(4): 4500810. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2921669.
 - [15] 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.
 - [16] Liu Q, Liu T, Yang S, Wang T, Wang Y. Validation of vectorial theories for the focusing of high numerical aperture Fresnel zone plates. *Opt Commun* 2018; 429: 119-126.
-

-
- [17] Minerbi E, Keren-Zur S, Ellenbogen T. Nonlinear metasurface Fresnel zone plates for terahertz generation and manipulation. *Nano Lett* 2019; 19(9): 6072-6077.
- [18] Yoon G, Jang J, Mun J, Nam KT, Rho J. Metasurface zone plate for light manipulation in vectorial regime. *Commun Phys* 2019; 2(1): 156.
- [19] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L, Kozlova ES. Tight focusing of laser light using a chromium Fresnel zone plate. *Opt Express* 2017; 25(17): 19662-19671. DOI: 10.1364/OE.25.019662.
- [20] Mote RG, Minin O V., Minin I V. Focusing behavior of 2-dimensional plasmonic conical zone plate. *Opt Quantum Electron* 2017; 49(8): 271.
- [21] Kim J, Kim H, Lee G-Y, Kim J, Lee B, Jeong Y. Numerical and Experimental Study on Multi-Focal Metallic Fresnel Zone Plates Designed by the Phase Selection Rule via Virtual Point Sources. *Appl Sci* 2018; 8(3): 449.
- [22] Yang J, Zhong Y, Zheng C, Ding S, Zang H, Liang E, et al. Dual-type fractal spiral zone plate for generating sequence of square optical vortices. *J Opt Soc Am A* 2019; 36(5): 893-897.
- [23] Zang H, Ding S, Wei L, Wang C, Fan Q, Cao L. Fractal spiral zone plate with high-order harmonics suppression. *Appl Opt* 2019; 58(31): 8680-8686.
- [24] Kozlova ES. Modeling of the optical vortex generation using a silver spiral zone plate. *Computer Optics* 2018; 42(6): 977-984. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-977-984.
- [25] Cheng S, Xia T, Liu M, Zheng C, Zang H, Tao S. Composite spiral zone plate. *IEEE Photonics J* 2019; 11(1): 1-11.
- [26] Kozlova ES. Investigation of the influence of amplitude spiral zone plate parameters on produced energy backflow. *Computer Optics* 2019; 43(6): 1093-1097. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1093-1097.
- [27] Kim H, Jeong Y. Theoretical and numerical study of cylindrical-vector-mode radiation characteristics in periodic metallic annular slits and their applications. *Curr Opt Photonics* 2018; 2(5): 482-487.
- [28] 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.
- [29] 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. spiral zone plate with high-order harmonics suppression. *Appl Opt* 2019; 58(31):8680-8686.
- [30] Kozlova ES. Modeling of the optical vortex generation using a silver spiral zone plate. *Comput Opt* 2018; 42(6): 977-84.
- [31] Cheng S, Xia T, Liu M, Zheng C, Zang H, Tao S. Composite Spiral Zone Plate. *IEEE Photonics J* 2019; 11(1): 1-11.
- [32] Kozlova ES. Investigation of the influence of amplitude spiral zone plate parameters on produced energy backflow. *Comput Opt* 2019; 43(6): 1093-1097.
- [33] Kim H, Jeong Y. Theoretical and numerical study of cylindrical-vector-mode radiation characteristics in periodic metallic annular slits and their applications. *Curr Opt Photonics* 2018; 2(5): 482-487.
- [34] Kotlyar V V., Nalimov AG. Sharp focusing of vector optical vortices using a metalens. *J Opt* 2018; 20(7): 075101.
- [35] Richards B, Wolf E. Electromagnetic Diffraction in Optical Systems. II. Structure of the Image Field in an Aplanatic System. *Proc R Soc A Math Phys Eng Sci* 1959; 253(1274): 358-79.
-

Authors' information

Elena Sergeevna Kozlova, (b. 1989) received Master's degree in Applied Mathematics and Informatics in Samara State Aerospace University (2011). She received her PhD in 2014. She is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences and assistant of Computer Science department at Samara National Research University. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: kozlova.elena.s@gmail.com.

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. ORCID: 0000-0002-7008-8007.

Sergey Alexandrovich Fomchenkov (b. 1991) graduated (2014) from Samara State Aerospace University, majoring in Applied Physics and Mathematics. Currently he is a post-graduate student in Technical Cybernetics department of Samara National Research University. His current research interests include diffractive optics and optical filters. E-mail: s.a.fom@mail.ru.

Vladimir Vladimirovich Podlipnov, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, an engineer of the laboratory of Micro- and Nanotechnology of the Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences. His research interests: mathematical modeling, electron-beam lithography, optimization of etching procedures in microelectronics, diffractive optics and techniques for surface processing and inspection. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

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.

Received November 13, 2020. The final version – December 28, 2020.
