

ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННОГО АСИММЕТРИЧНОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА БЕССЕЛЯ

Котляр В.В., Стафеев С.С., Порфирьев А.П.

Институт систем обработки изображений РАН,

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

Аннотация

Исследована острая фокусировка линейно-поляризованного лазерного асимметричного пучка Бесселя с топологическим зарядом 3, имеющего в поперечном сечении распределение интенсивности в виде полумесяца. Показано с помощью формул Дебая, что в фокусе апланатического объектива (числовая апертура $NA=0,9$) формируется распределение интенсивности также в виде полумесяца. С помощью разностного решения уравнений Максвелла показано, что в фокусе бинарной зонной пластинки с $NA=0,995$ также формируется полумесяц. Асимметричный пучок Бесселя был сформирован с помощью жидкокристаллического микродисплея и сфокусирован с помощью иммерсионного микрообъектива с $NA=1,25$. В плоскости фокуса также формировался полумесяц.

Ключевые слова: асимметричная мода Бесселя, острая фокусировка, формула Дебая.

Введение

В [1–4] рассмотрены непараксиальные асимметричные моды Бесселя (аБ-моды) и параксиальные асимметричные пучки Бесселя–Гаусса. В поперечном сечении этих лазерных пучков распределение интенсивности имеет вид полумесяца. В [5] аБ-моды исследовались экспериментально с помощью цифровой матрицы микрорезеркал (*digital micromirror device*). В [6] по аналогии с [2] (вводя комплексное смещение моды Бесселя) рассмотрены асимметричные пучки Чебышева–Бесселя. В [3–5] исследовалась также параксиальная фокусировка аБ-пучков. С другой стороны, известны векторные пучки Бесселя [7, 8], которые распространяются без дифракции и имеют различные состояния поляризации. В [7] показано, что бездифракционный линейно-поляризованный векторный пучок Бесселя выражается через ряды из функций Бесселя и имеет в своём спектре бесконечное число угловых гармоник. Векторные пучки Бесселя с азимутальной и радиальной поляризациями можно сформировать с помощью 4 конических поверхностей с углом Брюстера или 4 аксионов [9]. Сфокусированный лазерный пучок с распределением интенсивности в виде полумесяца используется для оптического захвата и перемещения биологических микрообъектов [10]. Но данный пучок рассчитывается итеративно в параксиальном приближении, и его острая фокусировка в [10] не исследуется.

Асимметричные непараксиальные пучки Бесселя в виде полумесяца описываются простой аналитической формулой [1–4], зависящей от параметра, изменением которого можно менять характеристики полумесяца. Эксперименты в параксиальном случае подтвердили формирование полумесяца в плоскости фокуса [5]. Но при большой числовой апертуре на картину интенсивности в фокусе существенно влияет поляризация. Поэтому актуальным является исследование острой фокусировки аБ-пучка с целью выяснения вопроса: будет ли сохраняться в фокусе полумесяц?

В данной работе тремя разными способами (численно и экспериментально) доказано, что при острой фокусировке линейно-поляризованного лазерного асимметрич-

ного пучка Бесселя с топологическим зарядом $n=3$, имеющего в поперечном сечении распределение интенсивности в виде полумесяца, в фокусе также формируется полумесяц. С помощью формул Дебая показано, что в фокусе широкоапертурного апланатического объектива (числовая апертура $NA=0,9–0,95$) формируется распределение интенсивности также в виде полумесяца с шириной по полуспаду интенсивности $0,56\lambda$, где $\lambda=532$ нм – длина волны. С помощью разностного решения уравнений Максвелла FDTD-методом показано, что в фокусе бинарной зонной пластинки с $NA=0,995$ также формируется полумесяц, который вращается вокруг оптической оси при удалении от плоскости фокуса. Асимметричный пучок Бесселя был сформирован с помощью жидкокристаллического микродисплея и сфокусирован с помощью иммерсионного микрообъектива с $NA=1,25$. При трёх различных состояниях поляризации исходного пучка Бесселя в плоскости фокуса формировался полумесяц, повернутый на 90° по отношению к полумесяцу, сформированному микродисплеем.

1. Фокусировка аБ-моды широкоапертурным апланатическим объективом

Моделирование фокусировки асимметричной моды Бесселя широкоапертурным апланатическим объективом проводилось с помощью уравнения Дебая [11, 12]. Амплитуда аБ-моды имеет вид [1, 2]:

$$E(r, \varphi, c) = \left[\frac{\alpha r}{\alpha r - 2c \exp(i\varphi)} \right]^{n/2} \times \times J_n \left\{ \sqrt{\alpha r (\alpha r - 2c \exp(i\varphi))} \right\} \exp(in\varphi), \quad (1)$$

где $J_n(x)$ – функция Бесселя первого рода n -го порядка, (r, φ) – полярные координаты, α – масштабный множитель, c – безразмерный коэффициент, в общем случае комплексный.

Моделирование осуществлялось в приближении Дебая, в соответствии с которым распределение напряжённости электрического поля в фокусе широкоапертурной системы описывается уравнением [11, 12]:

$$E(\rho, \psi, z) = -\frac{if}{\lambda} \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} B(\theta, \phi) T(\theta) P(\theta, \phi) \times \exp\{ik[\rho \sin \theta \cos(\phi - \psi) + z \cos \theta]\} \sin \theta d\theta d\phi, \quad (2)$$

где $B(\theta, \phi)$ – распределение напряжённости электрического поля на входе широкоапертурной системы в координатах выходного зрачка, $P(\theta, \phi)$ – матрица поляризации, $T(\theta)$ – функция аподизации, f – фокусное расстояние, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Для линейно-поляризованного света матрица поляризации имеет вид:

$$P(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cos \theta \\ \sin \phi \cos \phi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Распределение аБ-моды в координатах выходного зрачка объектива с учётом (1) примет вид:

$$B(\theta, \phi) = \left(\frac{\beta \sin \theta}{\sin \theta_{\max}} \frac{\beta \sin \theta}{\sin \theta_{\max} - 2ce^{i\phi}} \right)^{\frac{n}{2}} \times J_n \left(\sqrt{\frac{\beta \sin \theta}{\sin \theta_{\max}} \left(\frac{\beta \sin \theta}{\sin \theta_{\max}} - 2ce^{i\phi} \right)} \right) e^{in\phi}, \quad (4)$$

где $\beta = \alpha R$, α – параметр моды, R – радиус апертуры апланатического объектива. Заметим, что, когда знаменатель в (1) и (4) стремится к нулю, одновременно стремится к нулю аргумент функции Бесселя и значение самой функции Бесселя, которую можно приблизить выражением $J_n(x) \approx (x/2)^n (n!)^{-1}$. То есть возникает неопределённость, которая легко разрешается.

Ниже рассматривается фокусировка аБ-моды с параметрами $n=3, c=1, \beta=5$ апланатическим объективом с числовой апертурой $NA = \sin \theta_{\max} = 0,9$. Первоначально аБ-мода была поляризована вдоль оси x . На рис. 1 показано распределение интенсивности фокусируемой аБ-моды. На рис. 1 пунктиром показана апертура объектива радиуса R , ограничивающая фокусируемую аБ-моду. При разных R в фокусе формировался полумесяц с разными характеристиками.

На рис. 2 показано распределение интенсивности в фокусе апланатического объектива с $NA = 0,9$ светового поля, показанного на рис. 1. Из рис. 2 видно, что аБ-мода в фокусе имеет вид полумесяца. Интересно распределение продольной составляющей интенсивности в фокусе. Как известно, при фокусировке линейно-поляризованной плоской волны (или Гауссова пучка) продольная составляющая интенсивности отвечает за уширение фокусного пятна вдоль оси, параллельной поляризации фокусируемого излучения.

В случае аБ-моды продольная составляющая будет аналогичным образом уширять толщину фокусного кольца в плоскости, параллельной направлению поляризации входного излучения (рис. 3а).

В плоскости, перпендикулярной направлению поляризации, продольная компонента также будет уширять кольцо, но в меньшей степени (максимумы продольной и поперечной составляющих интенсивности незначительно смещены друг от друга). В частности, толщина кольца суммарной интенсивности в плоскости, параллельной направлению поляризации входного излучения, составляет по полуспаду интенсивности $FWHM = 0,41$ мкм (рис. 2б).

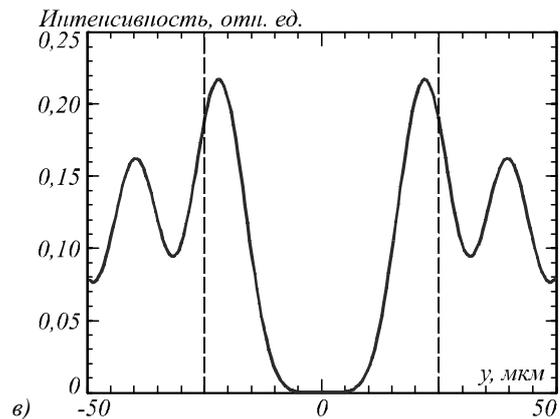
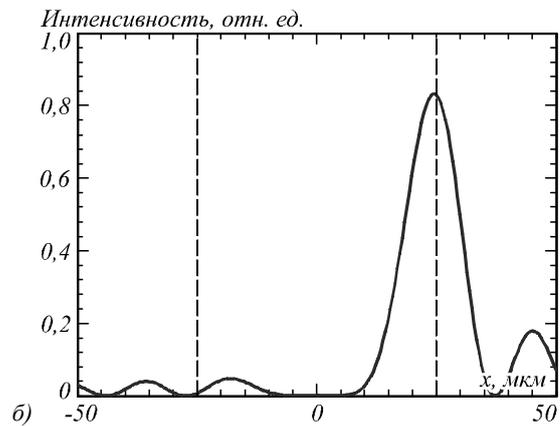
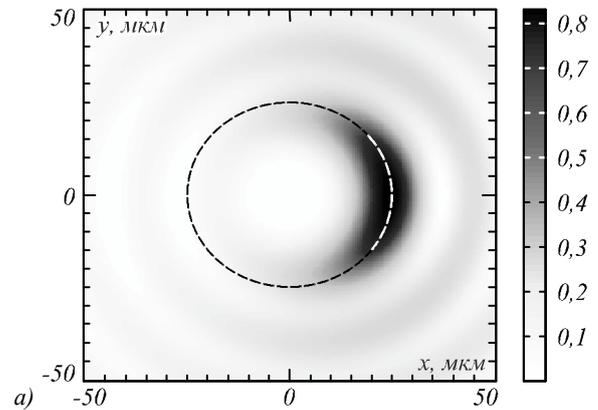


Рис. 1. Исходное распределение (а) интенсивности аБ-моды (негатив) и его сечения вдоль осей x (б) и y (в) при $\beta = 5$ ($\alpha = 0,2$ мкм⁻¹, $R = 25$ мкм). Пунктирной линией на рисунках показана апертура линзы

В этой же плоскости толщина кольца, создаваемого поперечной составляющей интенсивности, – $FWHM = 0,32$ мкм (сплошная кривая на рис. 3а), т.е. происходит уширение в 1,28 раз.

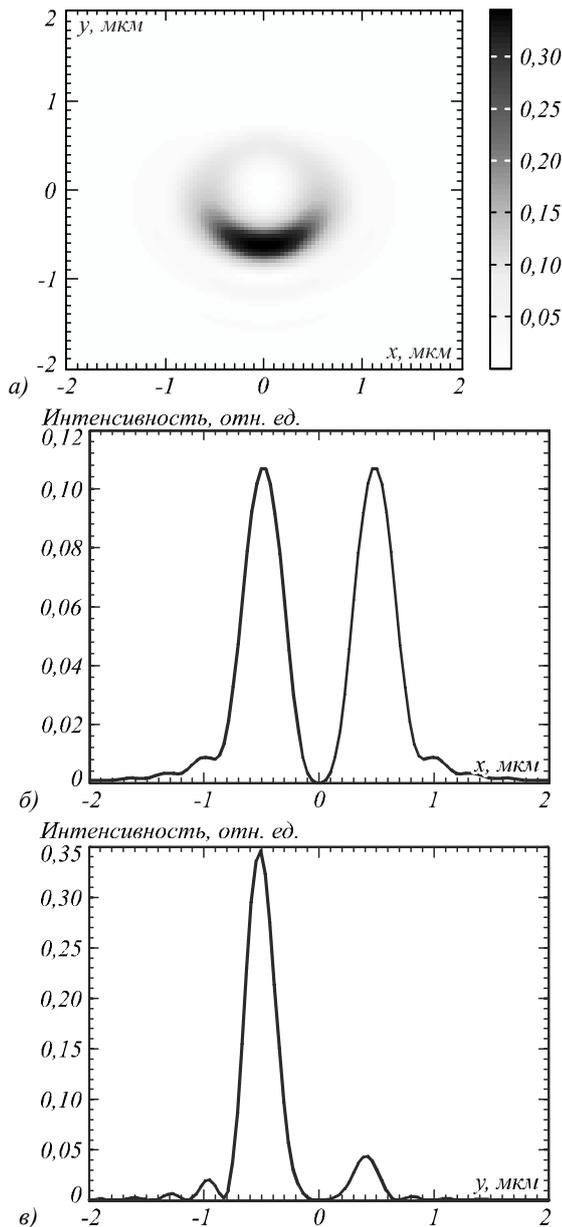


Рис. 2. Распределение интенсивности (негатив) в фокусе апланатического объектива при фокусировке аБ-моды (а) и сечения интенсивности вдоль осей x (б) и y (в)

Если рассматривать плоскость, перпендикулярную направлению поляризации входного излучения, то толщина кольца, создаваемого суммарной интенсивностью $\text{FWHM} = 0,30 \text{ мкм} = 0,56\lambda$ (рис. 2в), а кольца, создаваемого поперечной составляющей интенсивности – $\text{FWHM} = 0,27 \text{ мкм}$ (сплошная кривая рис. 3б). т.е. происходит уширение в 1,11 раза. Из сравнения рис. 1а и 2а видно, что полумесяц в фокусе повёрнут по отношению к исходному полумесяцу на 90° .

Пусть теперь плоскость поляризации направлена вдоль оси y . Результаты моделирования в таком случае приведены на рис. 4 и 5.

Как видно из рис. 4 и 5, поведение продольной составляющей интенсивности поменялось. Поляризация фокусируемой аБ-моды направлена вдоль оси y , там же наблюдается уширение толщины полумесяца в фокусе.

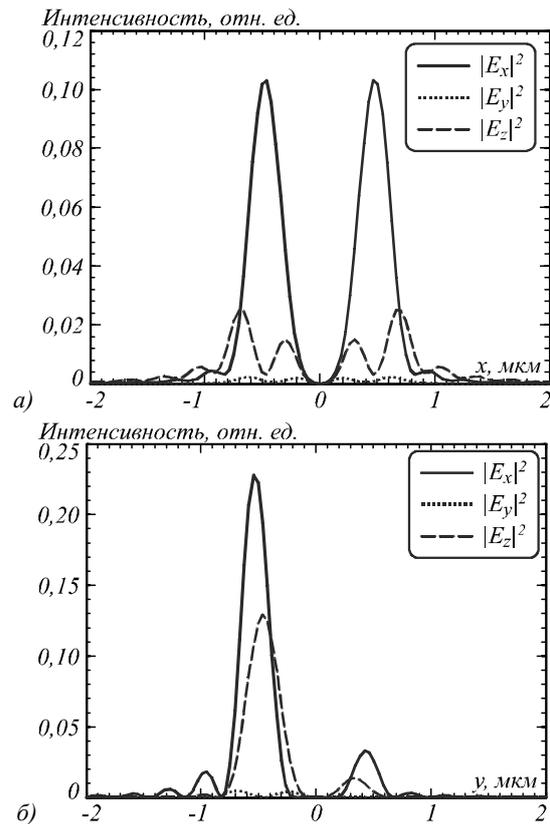


Рис. 3. Распределение отдельных компонент интенсивности вдоль осей x (а) и y (б) в фокусе апланатического объектива при фокусировке аБ-моды

В то же время количественно уширение оказалось таким же, как и ранее (рис. 2, 3). Толщина кольца суммарной интенсивности в плоскости, параллельной направлению поляризации входного излучения, составляет по полуспаду интенсивности $\text{FWHM} = 0,40 \text{ мкм}$ (рис. 4в), в этой же плоскости толщина кольца, создаваемого поперечной составляющей интенсивности, составляет $\text{FWHM} = 0,32 \text{ мкм}$ (пунктирная кривая на рис. 5б), происходит уширение в 1,25 раза. Если рассматривать плоскость, перпендикулярную направлению поляризации входного излучения, то толщина кольца, создаваемого суммарной интенсивностью $\text{FWHM} = 0,30 \text{ мкм}$ (рис. 4б), а кольца, создаваемого поперечной составляющей интенсивности – $\text{FWHM} = 0,27 \text{ мкм}$ (рис. 5а). Происходит уширение в 1,11 раза.

Моделирование показало, что выбор направления поляризации поперёк полумесяца предпочтительнее, чем вдоль полумесяца, так как в последнем случае происходит большее искажение картины полумесяца. Действительно, если линейная поляризация направлена поперёк полумесяца, то отношение максимальных интенсивностей по декартовым осям в фокусе на рис. 2б, в равно $I_{\text{max},x}/I_{\text{max},y} = 0,1/0,35 = 0,29$. Если же линейная поляризация направлена вдоль полумесяца, то отношение максимальных интенсивностей по декартовым осям в фокусе на рис. 4б, в равно $I_{\text{max},x}/I_{\text{max},y} = 0,14/0,29 = 0,48$. Отношение максимальных интенсивностей по декартовым осям в исходном полумесяце на рис. 1б, в рав-

но (с учётом поворота полумесяца в фокусе на 90°) $I_{\max,y}/I_{\max,x}=0,21/0,8=0,26$. Из сравнения этих чисел видно, что полумесяц в фокусе на рис. 2 ближе к исходному полумесяцу на рис. 1, чем полумесяц в фокусе на рис. 4.

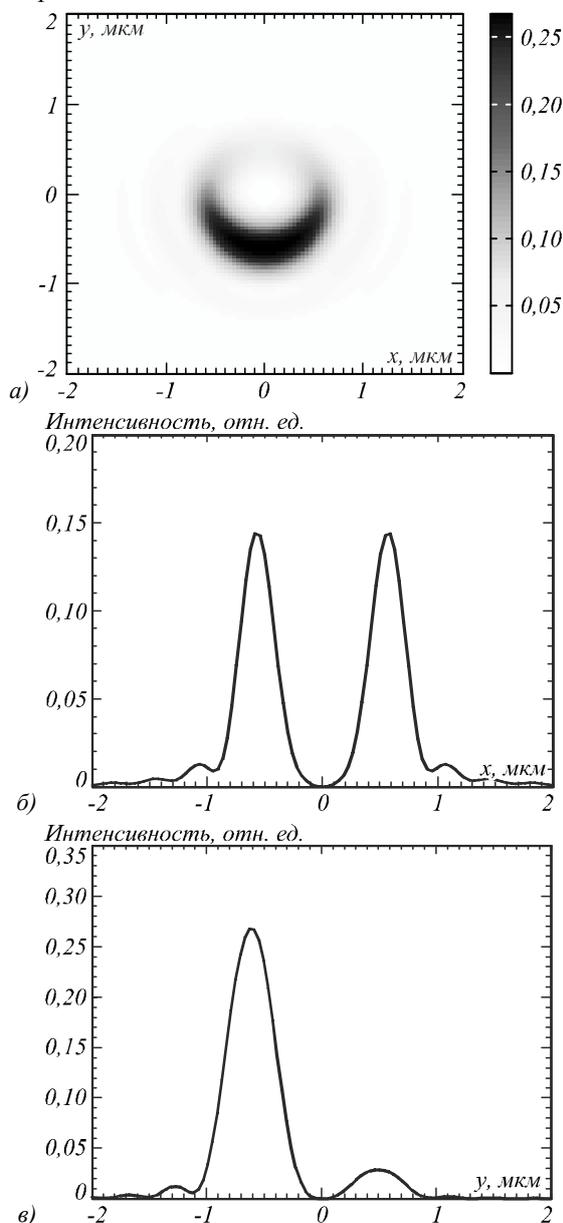


Рис. 4. Распределение интенсивности (негатив) в фокусе апланатического объектива при фокусировке аБ-моды (а), и сечения интенсивности вдоль осей x (б) и y (в)

Рассмотрим далее распределение интенсивности в плоскости, отстоящей на расстояние от фокальной плоскости, равное одной длине волны.

Распределение интенсивности в этой плоскости показано на рис. 6. Из рисунка видно, что при распространении аБ-пучка после фокуса картина интенсивности поворачивается. При смещении на длину волны поворот полумесяца составил примерно 11° .

Формулы Дебая (2)–(4) являются приближёнными, и при числовой апертуре, близкой к единице, ошибка моделирования возрастает. Поэтому в следующем раз-

деле будет проведено моделирование методом FDTD, который является точным при любой числовой апертуре. Правда, в этом случае придётся рассматривать фокусировку не с помощью абстрактного апланатического объектива, а с помощью конкретной микролинзы, например, бинарной зонной пластинки.

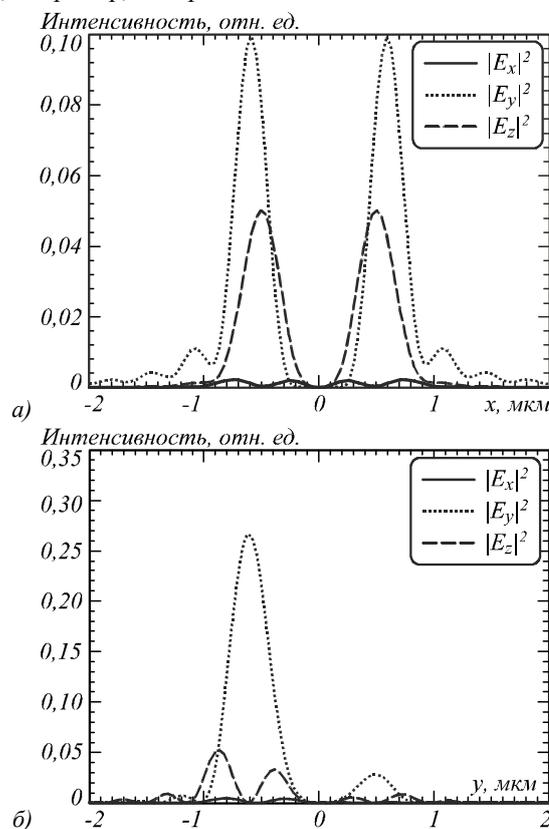


Рис. 5. Распределение отдельных компонент интенсивности в фокусе апланатического объектива при фокусировке аБ-моды: сечения вдоль осей x (а) и y (б)

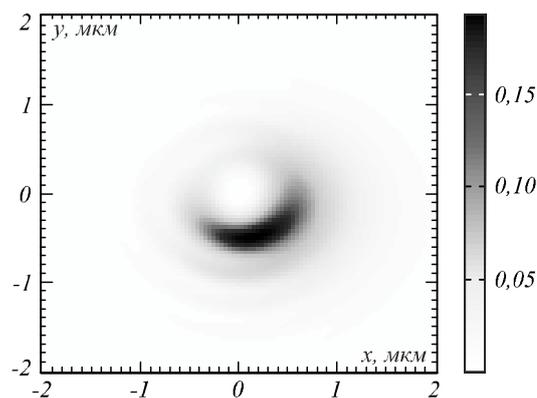


Рис. 6. Распределение интенсивности (негатив) в плоскости, отстоящей от фокальной плоскости на расстояние, равное длине волны

2. Острая фокусировка асимметричного пучка Бесселя с помощью зонной пластинки

Моделировалось распространение линейно-поляризованного асимметричного аБ-пучка (1) с длиной волны $\lambda=532$ нм методом FDTD, реализованным в программе FullWAVE. Размер сетки FDTD по про-

странству составлял 0,02 мкм. Параметры исследуемого аБ-пучка (1): $n=3$, $c=1$, $\alpha=5 \text{ мкм}^{-1}$. На рис. 7 представлен вид рассматриваемого аБ-пучка. При расчёте интенсивности проводилось усреднение по последнему периоду.

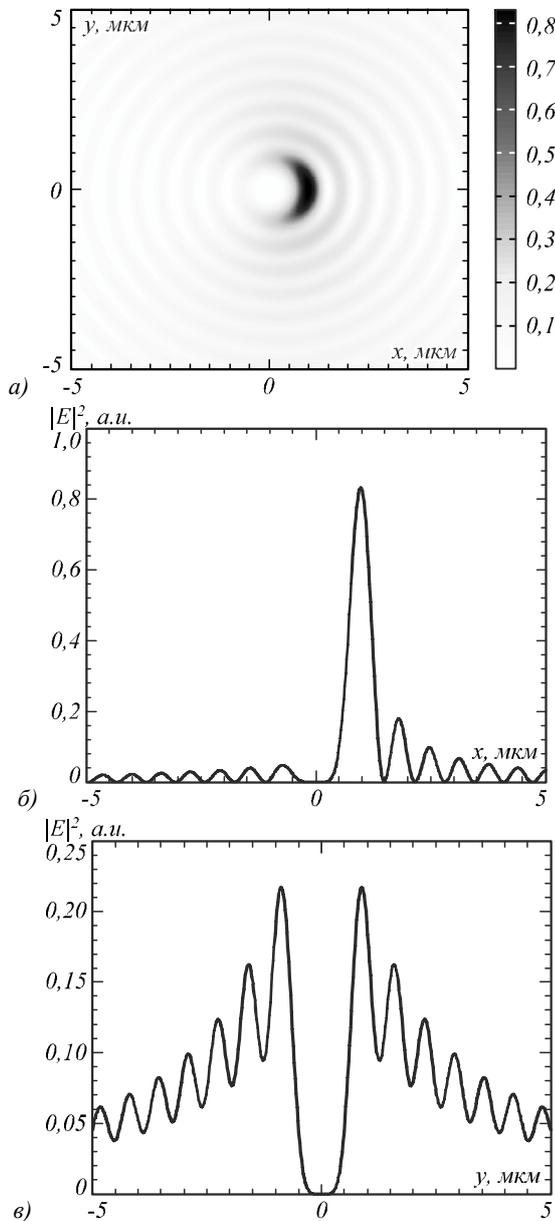


Рис. 7. Вид исходного аБ-пучка (негатив) (а) и сечения вдоль осей x (б) и y (в)

Сфокусируем теперь аБ-пучок (рис. 7) с помощью широкоапертурной зонной пластинки Френеля с фокусным расстоянием, равным длине волны фокусируемого света ($NA = 0,995$). Рассмотрим два состояния поляризации. Результаты фокусировки приведены на рис. 8 и 9.

Из сравнения рис. 8 и 9 видно, что картина дифракции аБ-пучка на зонной пластинке при смене направления поляризации качественно не меняется, хотя большее искажение полумесяца в фокусе также происходит при направлении поляризации в исходном поле (рис. 7) вдоль полумесяца (рис. 8).

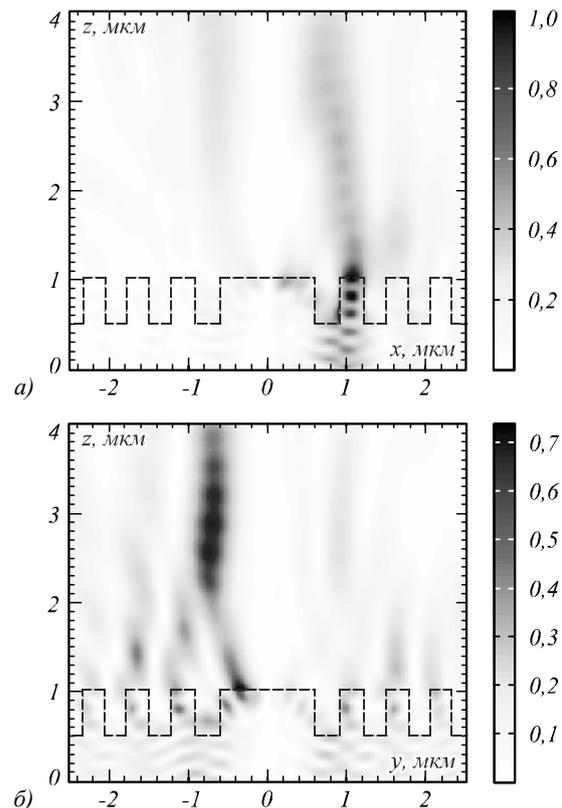


Рис. 8. Распределение интенсивности (негатив) в плоскостях, параллельных направлению распространения аБ-пучка (поляризация вдоль оси y)

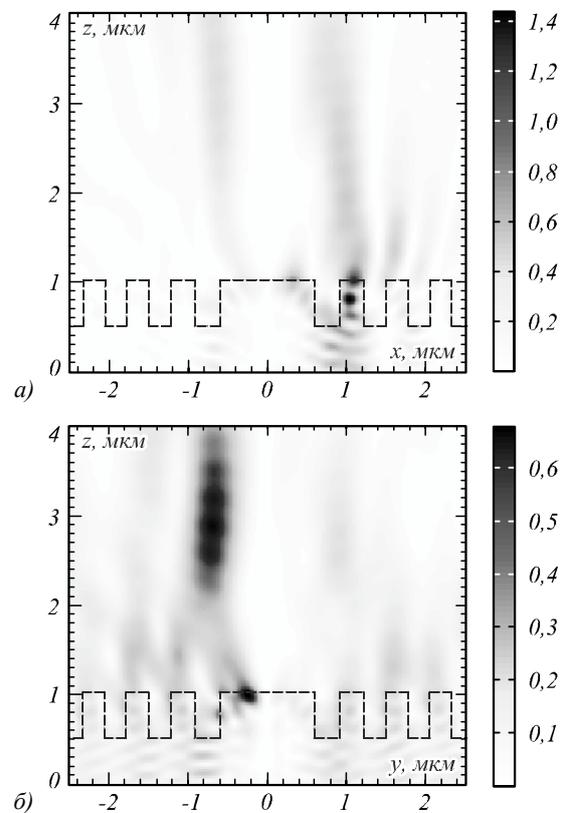


Рис. 9. Распределение интенсивности (негатив) в плоскостях, параллельных направлению распространения аБ-пучка (поляризация вдоль оси x)

Из рис. 10 видно, что в плоскости фокуса и после неё формируется распределение интенсивности в виде полумесяца, которое вращается вокруг оптической оси по часовой стрелке при удалении от плоскости фокуса. При удалении на расстояние λ от поверхности зонной пластинки максимум интенсивности полумесяца повернулся на угол 28° . В данном случае полумесяц вращается быстрее, так как числовая апертура зонной пластинки больше, чем объектива из раздела 1.

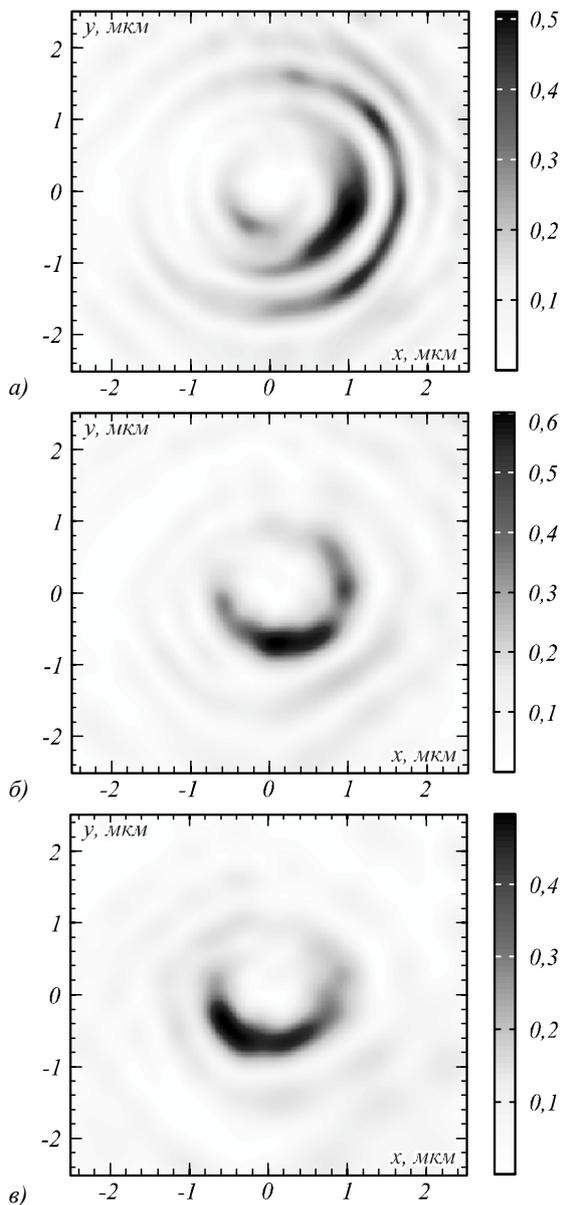


Рис. 10. Распределение интенсивности (негатив) в плоскости, перпендикулярной направлению распространения АБ-пучка на расстоянии (а) λ (расчётный фокус), (б) 3λ , (в) 5λ от поверхности ЗП

Результаты этого раздела не согласуются с результатами раздела 1, так как моделирование проводилось при разной числовой апертуре. И, кроме того, фокусное расстояние в этом разделе равно λ , а в [13] показано, что формулы Дебая не работают, когда фокусное расстояние меньше 4λ .

3. Эксперимент по острой фокусировке асимметричного лазерного пучка Бесселя–Гаусса

Цель этого раздела – показать, что, несмотря на приближённое формирование асимметричного пучка Бесселя–Гаусса с помощью жидкокристаллического дисплея и на наличие aberrаций высокоапертурного микрообъектива в фокальной плоскости, формируется полумесяц, который сохраняется, хотя и видоизменяется, при различных состояниях поляризации исходного лазерного пучка.

Для формирования парааксиального асимметричного пучка Гаусса–Бесселя и исследования его фокусировки с использованием микрообъектива с высокой числовой апертурой была использована оптическая схема, представленная на рис. 11.

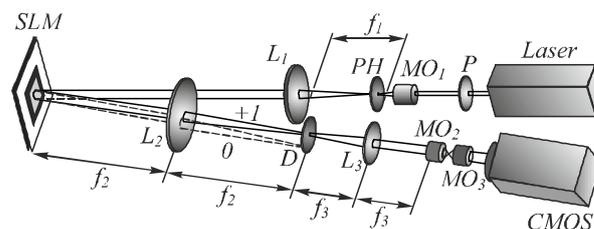


Рис. 11. Оптическая схема для формирования асимметричных пучков Бесселя–Гаусса: Laser – твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм), P – поляризатор света, MO₁ – микрообъектив ($40\times$, NA = 0,6), PH – пинхол (40 мкм), L₁ – линза с фокусным расстоянием $f_1 = 150$ мм, L₂ – линза с фокусным расстоянием $f_2 = 350$ мм, L₃ – линза с фокусным расстоянием $f_3 = 150$ мм, MO₂ – микрообъектив ($100\times$, NA = 1,25), MO₃ – микрообъектив ($60\times$, NA = 0,85), SLM – пространственный модулятор света PLUTO VIS, D – диафрагма, CMOS – CMOS-камера MDCE-5A (1280×1024)

Для вывода изображений фазы был использован пространственный модулятор света SLM PLUTO-VIS (разрешение – 1920×1080 пикселей, размер пикселя – 8 мкм). С помощью поляризатора P задавалось направление линейной поляризации лазерного пучка твердотельного лазера Laser ($\lambda = 532$ нм). Система из микрообъектива MO ($40\times$, NA=0,6), линзы L₁ ($f_1 = 150$ мм) и пинхола PH (размер отверстия – 40 мкм) была использована для получения однородного Гауссова профиля интенсивности начального лазерного пучка. Кроме того, это позволяло произвести расширение лазерного пучка. Отражённый от модулятора пучок с помощью системы линз L₂ ($f_2 = 350$ мм) и L₃ ($f_3 = 150$ мм), а также диафрагмы D был использован для высокочастотной оптической фильтрации. В результате такой конфигурации системы в плоскости входного зрачка микрообъектива MO₂ ($100\times$, NA = 1,25) находилась плоскость, сопряжённая с плоскостью дисплея модулятора. Микрообъектив MO₃ ($60\times$, NA = 0,85) проецировал изображение, сформированное в фокальной плоскости микрообъектива MO₂ на матрицу CMOS-камеры MDCE-5A (1/2", разрешение – 1280×1024 пикселей).

С помощью данной оптической схемы были проведены эксперименты по острой фокусировке асим-

метричных пучков Бесселя–Гаусса с помощью иммерсионного микрообъектива с высокой числовой апертурой ($NA = 1,25$). Для формирования пучков было использовано закодированное фазовое распределение, представленное на рис. 12.

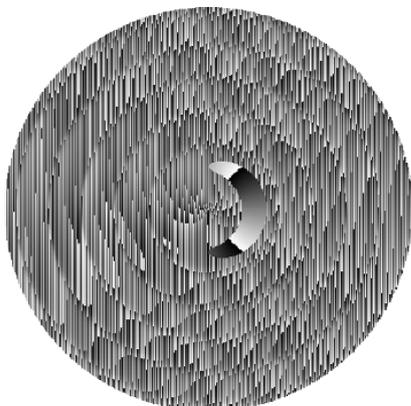


Рис. 12. Кодированная фаза для формирования асимметричного пучка Бесселя–Гаусса

При выводе фазы на дисплей модулятора к ней добавлялась линейная фазовая маска, для того чтобы разнести в пространстве формируемые пучки и нерегулируемое световое пятно, возникающее из-за несовершенства антибликового покрытия и пиксельной структуры модулятора света. Для блокирования нулевого порядка дифракции была использована диафрагма D. Радиус освещающего лазерного пучка по уровню, на котором интенсивность спадала в e^2 раз, равнялся примерно 0,65 мм. Были проведены эксперименты для различных случаев направления линейной поляризации относительно фазового распределения, выводимого на дисплей модулятора. Так, на рис. 13 и 14 показаны изображения, полученные для двух случаев, отличающихся тем, что в одном из них фазовое распределение элемента, формирующего асимметричные пучки Бесселя, было повернуто на 90 градусов относительно направления линейной поляризации освещающего пучка. На рис. 13а и 14а показаны распределения интенсивности, которые имели лазерные пучки в плоскости входного зрачка микрообъектива MO_2 , и также указано направление поляризации освещающего пучка. На рис. 13б и 14б показаны распределения интенсивности, сформированные в фокальной плоскости микрообъектива MO_2 . Видно, что в случае, представленном на рис. 13, пучок при фокусировке поворачивается на 90 градусов и при этом сохраняют свою структуру с точностью до масштаба. Из рис. 14 видно, что пучок также поворачивается на 90 градусов, но в этом случае структура пучка искажается больше.

Это можно объяснить изменением направления поляризации освещающего лазерного пучка и тем, что кодированное фазовое распределение только частично учитывает амплитудное распределение. Кроме того, был проведён дополнительный эксперимент при использовании лазера с той же длиной волны, но с эллиптически-поляризованным пучком на выходе (рис. 15).

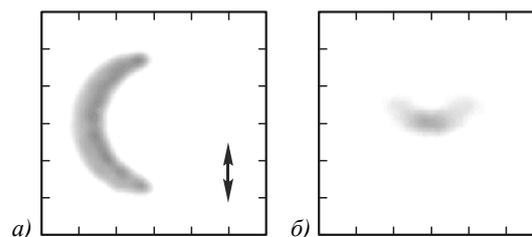


Рис. 13. Фокусировка асимметричного пучка Бесселя–Гаусса с помощью микрообъектива с высокой числовой апертурой ($NA = 1,25$). Случай, когда полумесяц вытянут вдоль направления линейной поляризации освещающего пучка лазера (отмечено двунаправленной стрелочкой): распределение интенсивности в плоскости входного зрачка микрообъектива (шаг сетки равен 200 мкм) (а); распределение интенсивности в фокальной плоскости микрообъектива (шаг сетки равен 2 мкм) (б)

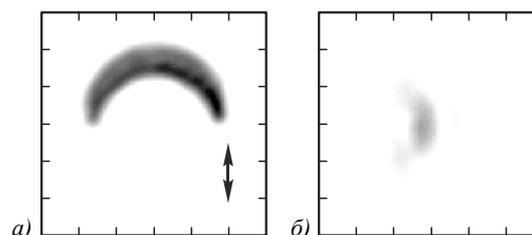


Рис. 14. Фокусировка асимметричного пучка Бесселя–Гаусса с помощью микрообъектива с высокой числовой апертурой ($NA = 1,25$). Случай, когда полумесяц вытянут поперёк направления линейной поляризации освещающего пучка лазера (отмечено двунаправленной стрелочкой): распределение интенсивности в плоскости входного зрачка микрообъектива (шаг сетки равен 200 мкм) (а); распределение интенсивности в фокальной плоскости микрообъектива (шаг сетки равен 2 мкм) (б)

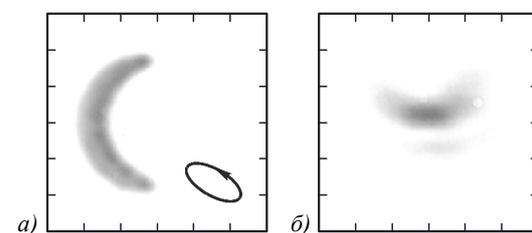


Рис. 15. Фокусировка асимметричного пучка Бесселя–Гаусса с помощью микрообъектива с высокой числовой апертурой ($NA = 1,25$). Случай эллиптически-поляризованного освещающего пучка лазера (отмечен эллипсом со стрелочкой): распределение интенсивности в плоскости входного зрачка микрообъектива (шаг сетки равен 200 мкм) (а); распределение интенсивности в фокальной плоскости микрообъектива (шаг сетки равен 2 мкм) (б)

В этом случае также происходит поворот формируемых пучков при фокусировке с сохранением их структуры в форме полумесяца с точностью до масштаба.

Заключение

В работе численно и экспериментально исследована острая фокусировка линейно-поляризованного лазерного асимметричного пучка Бесселя с топологическим зарядом 3, имеющего в поперечном сечении распределение интенсивности в виде полумесяца.

Показано с помощью формул Дебая, что в фокусе широкоапертурного апланатического объектива (числовая апертура $NA = 0,9 - 0,95$) формируется распределение интенсивности также в виде полумесяца с шириной по полуспаду интенсивности $0,56\lambda$.

Выбор направления поляризации поперёк полумесяца меньше искажает полумесяц в фокусе, чем в случае направления поляризации вдоль полумесяца. При удалении от плоскости фокуса на расстояние λ полумесяц поворачивается на 11° . С помощью разностного решения уравнений Максвелла FDTD-методом показано, что в фокусе бинарной зонной пластинки с $NA = 0,995$ также формируется полумесяц, который поворачивается на 28° при распространении на λ . Параксиальный асимметричный пучок Бесселя-Гаусса был сформирован с помощью жидкокристаллического микродисплея и сфокусирован с помощью иммерсионного микрообъектива с $NA = 1,25$. В плоскости фокуса также формировался полумесяц, повернутый на 90 градусов по отношению к полумесяцу, сформированному микродисплеем. Полумесяц в фокусе сохранялся, но видоизменялся в зависимости от трёх разных состояний поляризации исходного лазерного пучка.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3970.2014.9) и молодого учёного кандидата наук МК-4816.2014.2, а также грантов РФФИ 13-07-97008, 14-29-07133, 14-07-97038, 14-07-97039 и 15-07-01174.

Литература

1. **Котляр, В.В.** Бездифракционные асимметричные элегантные пучки Бесселя с дробным орбитальным угловым моментом / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 4-10.
2. **Kotlyar, V.V.** Asymmetric Bessel modes / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, V.A. Soifer // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(8). – P. 2395-2398.
3. **Котляр, В.В.** Вращающиеся элегантные пучки Бесселя-Гаусса / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв, Р.В. Скиданов, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 162-170.
4. **Kotlyar, V.V.** Asymmetric Bessel-Gauss beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31(9). – P. 1977-1983.
5. **Gong, L.** Observation of the asymmetric Bessel beams with arbitrary orientation using a digital micromirror device / L. Gong, X.-Z. Qiu, Y.-X. Ren, H.-Q. Zhu, W.-W. Liu, J.-H. Zhou, M.-C. Zhong, X.-X. Chu, Y.-M. Li // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(22). – P. 26763-26776.
6. **Sheppard, C.J.R.** Two-dimensional complex source point solutions: application to propagation invariant beams, optical fiber modes, planar waveguides, and plasmonic devices / C.J.R. Sheppard, S.S. Kou, J. Lin // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31(12). – P. 2674-2679.
7. **Bouchal, Z.** Non-diffractive vector Bessel beams / Z. Bouchal, M. Olivik // Journal of Modern Optics. – 1995. – Vol. 42(8). – P. 1555-1566.
8. **Yu, Y.Z.** Vector analysis of nondiffracting Bessel beams / Y.Z. Yu, W.B. Dou // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2008. – Vol. 5. – P. 57-71.
9. **Schafer, F.P.** On some properties of axicons / F.P. Schafer // Applied Physics B. – 1986. – Vol. 39. – P. 1-8.
10. **Rykov, M.A.** Modifying the laser beam intensity distribution for obtaining improved strength characteristics of an optical trap / M.A. Rykov, R.V. Skidanov // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53(2). – P. 156-164.
11. **Davidson, N.** High-numerical-aperture focusing of radially polarized doughnut beams with a parabolic mirror and a flat diffractive lens / N. Davidson, N. Bokor // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29(12). – P. 1318-1320.
12. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic systems / B. Richards, E. Wolf // Proceedings of the Royal Society of London A. – 1959. – Vol. 253. – P. 358-379.
13. **Stafeev, S.S.** Subwavelength focusing of laser light by microoptics / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, L. O'Faolain // Journal of Modern Optics. – 2013. – Vol. 60(13). – P. 1050-1059.

References

1. **Kotlyar, V.V.** Diffraction-free asymmetric elegant bessel beams with fractional orbital angular momentum / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, V.A. Soifer // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(1). – P. 4-10.
2. **Kotlyar, V.V.** Asymmetric Bessel modes / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, V.A. Soifer // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(8). – P. 2395-2398.
3. **Kotlyar, V.V.** Rotating elegant bessel-gaussian beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(2). – P. 162-170.
4. **Kotlyar, V.V.** Assymmetric Bessel-Gauss beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31(9). – P. 1977-1983.
5. **Gong, L.** Observation of the asymmetric Bessel beams with arbitrary orientation using a digital micromirror device / L. Gong, X.-Z. Qiu, Y.-X. Ren, H.-Q. Zhu, W.-W. Liu, J.-H. Zhou, M.-C. Zhong, X.-X. Chu, Y.-M. Li // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(22). – P. 26763-26776.
6. **Sheppard, C.J.R.** Two-dimensional complex source point solutions: application to propagation invariant beams, optical fiber modes, planar waveguides, and plasmonic devices / C.J.R. Sheppard, S.S. Kou, J. Lin // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31(12). – P. 2674-2679.
7. **Bouchal, Z.** Non-diffractive vector Bessel beams / Z. Bouchal, M. Olivik // Journal of Modern Optics. – 1995. – Vol. 42(8). – P. 1555-1566.
8. **Yu, Y.Z.** Vector analysis of nondiffracting Bessel beams / Y.Z. Yu, W.B. Dou // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2008. – Vol. 5. – P. 57-71.
9. **Schafer, F.P.** On some properties of axicons / F.P. Schafer // Applied Physics B. – 1986. – Vol. 39. – P. 1-8.
10. **Rykov, M.A.** Modifying the laser beam intensity distribution for obtaining improved strength characteristics of an optical trap / M.A. Rykov, R.V. Skidanov // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53(2). – P. 156-164.
11. **Davidson, N.** High-numerical-aperture focusing of radially polarized doughnut beams with a parabolic mirror and a flat diffractive lens / N. Davidson, N. Bokor // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29(12). – P. 1318-1320.
12. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic systems / B. Richards, E. Wolf // Proceedings of the Royal Society of London A. – 1959. – Vol. 253. – P. 358-379.
13. **Stafeev, S.S.** Subwavelength focusing of laser light by microoptics / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, L. O'Faolain // Journal of Modern Optics. – 2013. – Vol. 60(13). – P. 1050-1059.

SHARP FOCUSING OF LINEARLY POLARIZED ASYMMETRIC BESSEL BEAM

V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.P. Porfirev
Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University

Abstract

We conduct the numerical and experimental study of sharp focusing of a linearly polarized asymmetric Bessel beam with topological charge $n = 3$ and a crescent-shaped transverse intensity pattern. Using the Debye integral, we show that in the focal plane of a high NA aplanatic lens ($NA = 0.9 - 0.95$) the intensity distribution is also crescent-shaped. Using the FDTD method it is shown that a binary zone plate with $NA = 0.995$ also forms a crescent-shaped focal spot that is rotated around the optical axis. An asymmetric Bessel beam was generated using a spatial light modulator (SLM) and focused using an immersion objective with $NA = 1.25$. A crescent-shaped intensity pattern formed in the focal plane was rotated by 90 degrees relative to the SLM-aided crescent.

Keywords: optical vortices; propagation; modes.

Сведения об авторах

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** – см. стр.11 этого номера.

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

Sergey Sergeevich 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.

Порфирьев Алексей Петрович, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладная математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год). Ассистент кафедры технической кибернетики СГАУ, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическое манипулирование.

E-mail: porfirev.alexey@smr.ru.

Alexey Petrovich Porfirev (b. 1987) graduated (2010) from Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Applied Physics and Mathematics. Candidate in Physics and Mathematics (2013). Currently he is an assistant professor in Technical Cybernetics department of SSAU and a researcher in Micro- and Nanotechnologies laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). His current research interests include diffractive optics and optical manipulation.

Поступила в редакцию 21 января 2015 г.