

ФОКУСИРОВКА АСИММЕТРИЧНОЙ МОДЫ БЕССЕЛЯ ОБЪЕКТИВАМИ С БОЛЬШОЙ ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ

С.С. Стафеев^{1,2}, А.П. Порфирьев^{1,2}, В.В. Котляр^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН,

²Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В данной работе численно и экспериментально была рассмотрена фокусировка асимметричной моды Бесселя широкоапертурными объективами. Численно с помощью формул Дебая была рассмотрена фокусировка апланатическим объективом с числовой апертурой $NA = 0,9$. Экспериментально асимметричный пучок Бесселя был сформирован с помощью жидкокристаллического микродисплея и сфокусирован с помощью иммерсионного микрообъектива с $NA = 1,25$. Кроме того, с помощью метода FDTD была рассмотрена фокусировка асимметричной моды Бесселя зонной пластинкой Френеля с числовой апертурой $NA = 0,995$. Было показано, что во всех случаях в фокусе формируется распределение интенсивности в виде полумесяца.

Введение

Асимметричные непараксиальные пучки Бесселя (аБ-пучки) имеют в сечении вид полумесяца и 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]. Ранее, однако, не исследовалась фокусировка аБ-пучков линзами с высокой числовой апертурой, когда на интенсивности в фокусе начинает оказывать влияние поляризация фокусируемого пучка.

В данной работе тремя разными способами показано, что при острой фокусировке линейно-поляризованного лазерного асимметричного пучка Бесселя с топологическим зарядом $n = 3$, имеющего в поперечном сечении распределение интенсивности в виде полумесяца в фокусе также формируется полумесяц. В частности с помощью формул Дебая показано, что в фокусе широкоапертурного апланатического объектива ($NA = 0,9$) формируется распределение интенсивности 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 Френеля с числовой апертурой $NA = 0,995$ также формируется полумесяц, который вращается вокруг оптической оси, при удалении от плоскости фокуса. Асимметричный пучок Бесселя, полученный экспериментально с помощью жидкокристаллического микродисплея и сфокусированный с помощью иммерсионного микрообъектива с $NA = 1,25$, при различных состояниях поляризации формировал в фокусе полумесяц, повернутый на 90 градусов по отношению к исходному полумесяцу.

1. Моделирование с помощью уравнения Дебая

Моделирование фокусировки асимметричной моды Бесселя широкоапертурным апланатическим объективом проводилось с помощью уравнения Дебая [6,7]. Рассмотренные ранее аБ-моды имеют вид [1,2]:

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

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. Ниже рассмотрена фокусировка аБ-моды с параметрами $n = 3$, $c = 1$, $\alpha = 0,2$ мкм⁻¹ (рис. 1) апланатическим объективом с числовой апертурой $NA = \sin\theta_{\max} = 0,9$ и радиусом $R = 25$ мкм.

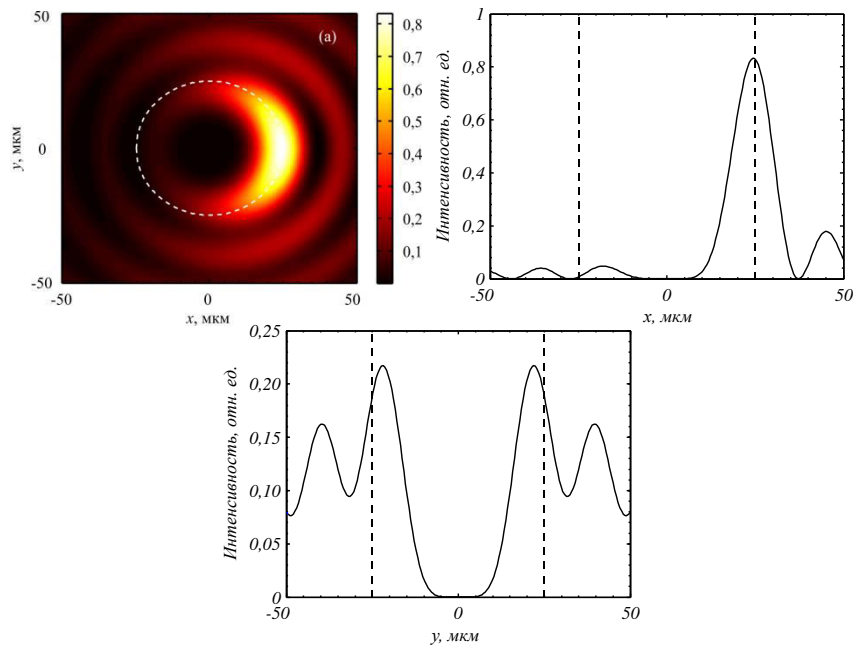


Рис. 1. Распределение интенсивности рассматриваемой аБ-моды. Пунктирной линией на рисунке показана апертура линзы

Первоначально аБ-мода была поляризована вдоль оси x . 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 (красная штрихпунктирная кривая на рис. 2б и 2в). Как известно, при фокусировке линейно поляризованного 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. 2б). В плоскости перпендикулярной направлению поляризации продольная компонента также будет уширять кольцо, но в меньшей степени (максимумы продольной и поперечной составляющих интенсивности незначительно смещены относительно друг друга).

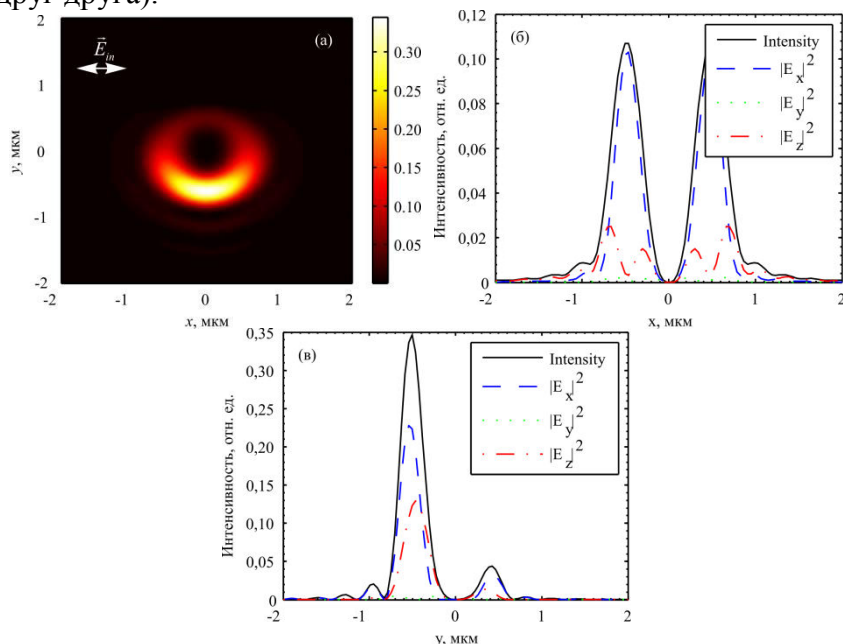


Рис. 2. Распределение интенсивности в фокусе апланатического объектива при фокусировке аБ-моды (а) сечения интенсивности и её отдельных составляющих вдоль осей x (б) и y (в)

Пусть теперь плоскость поляризации направлена вдоль оси y . Результаты моделирования в таком случае приведены на рис. 3.

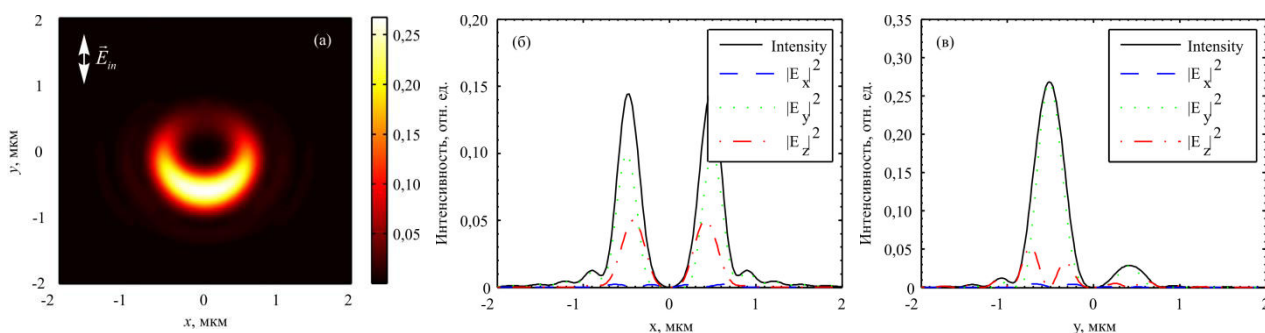


Рис. 3. Распределение интенсивности в фокусе апланатического объектива при фокусировке аБ-моды (а), сечения интенсивности и её отдельных составляющих вдоль осей x (б) и y (в)

Как видно из рис. 3 поведение продольной составляющей интенсивности поменялось. Поляризация фокусируемой аБ-моды направлена вдоль оси y , там же наблюдается уширение толщины кольца в фокусе. В то же время количественно уширение оказалось таким же, как и ранее (рис. 2).

2. Моделирование методом FDTD

Далее нами моделировалось распространение линейно-поляризованного асимметричного аБ-пучка (1) с длиной волны $\lambda = 532$ нм методом FDTD, реализованным в программе FullWAVE (<http://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-passive-device-fullwave.html>). Размер сетки FDTD по пространству составлял $0,02$ мкм. Параметры исследуемого аБ-пучка (1): $n = 3$, $c = 1$, $\alpha = 5$ мкм $^{-1}$. Сфокусируем теперь аБ-пучок с помощью широкоапертурной зонной пластинки Френеля с фокусным расстоянием равным длине волны фокусируемого света ($NA = 0,995$). Рассмотрим случай, когда поляризация направлена вдоль оси y . Результаты фокусировки приведены на рис. 4 и 5.

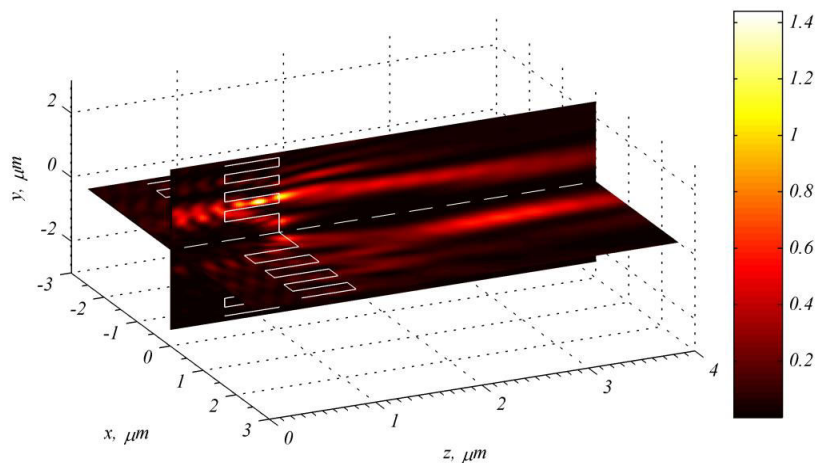


Рис. 4. Распределение интенсивности в плоскостях, параллельных направлению распространения аБ-пучка (поляризация вдоль оси y).

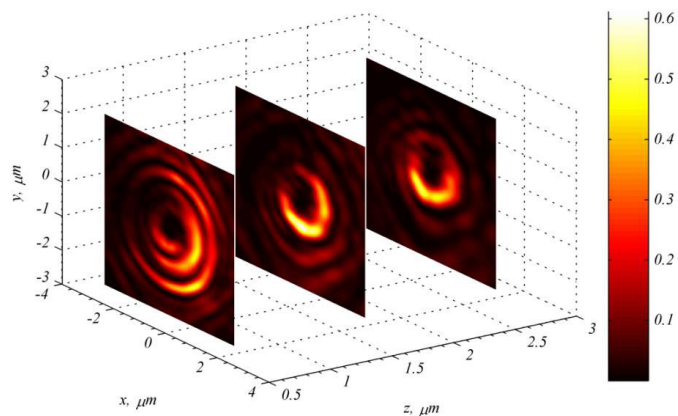


Рис. 5. Распределение интенсивности в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения аБ-пучка на расстояниях λ (расчётный фокус), 3λ , 5λ от поверхности ЗП.

Из рис. 5 видно, что в плоскости фокуса и после нее 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 вращение полумесяца происходило быстрее, чем при использовании апланатического объектива из предыдущего раздела, так как числовая апертура рассматриваемой зонной пластинки была больше, чем объектива из раздела 1.

3. Эксперимент

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. 6. Для вывода изображений фаз был использован пространственный модулятор света SLM PLUTO-VIS (разрешение 1920×1080 пикселей, размер пикселя 8 мкм). С помощью поляризатора света P задавалось направление линейной поляризации лазерного пучка твердотельного лазера Laser ($\lambda = 532$ нм). Система из микрообъектива MO ($40\times$, $NA = 0,6$), линзы L_1 ($f_1 = 150$ мм) и пинхола PH (размер отверстия 40 мкм) была использована для получения однородного гауссового профиля интенсивности начального лазерного пучка. Кроме того, это позволяло произвести расширение лазерного пучка. Отражённый от модулятора пучок с помощью системы линз L_2 ($f_2 = 350$ мм) и L_3 ($f_3 = 150$ мм), а также диафрагмы D была использована для высокочастотной оптической фильтрации. В результате такой конфигурации системы в плоскости входного зрачка микрообъектива MO_2 ($100\times$, $NA = 1,25$) находилась плоскость, сопряжённая с плоскостью дисплея модулятора. Микрообъектив MO_3 ($60\times$, $NA = 0,85$) формировал изображение, построенное в фокальной плоскости микрообъектива MO_2 на матрице CMOS-камеры MDCE-5A ($1/2''$, разрешение 1280×1024 пикселей).

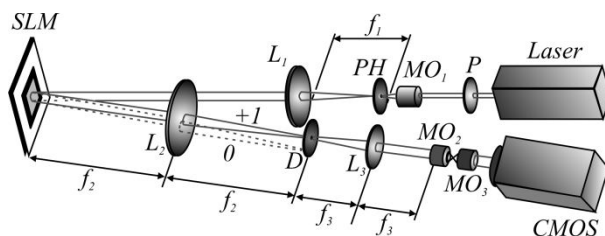


Рис. 6. Оптическая схема для формирования асимметричных пучков Бесселя-Гаусса: Laser – твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм), P – поляризатор света, MO_1 – микрообъектив ($40\times$, $NA = 0,6$), PH – пинхол (40 мкм), L_1 – линза с фокусным расстоянием $f_1 = 150$ мм, L_2 – линза с фокусным расстоянием $f_2 = 350$ мм, L_3 – линза с фокусным расстоянием $f_3 = 150$ мм, MO_2 – микрообъектив ($100\times$, $NA = 1,25$), MO_3 – микрообъектив ($60\times$, $NA = 0,85$), SLM – пространственный модулятор света PLUTO_VIS, D – диафрагма, CMOS – CMOS-камера MDCE-5A (1280×1024)

На рис. 7 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.

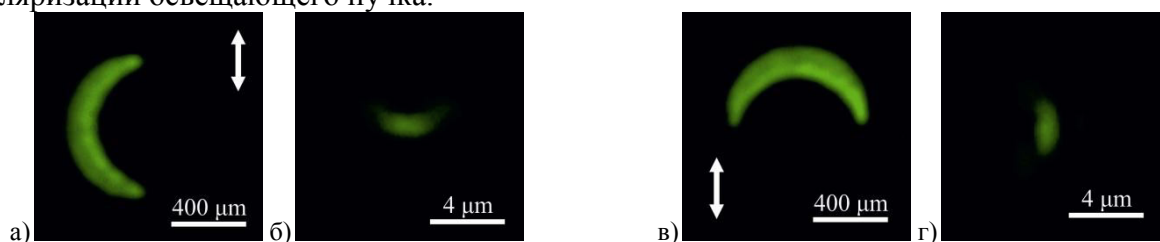


Рис. 7. Фокусировка асимметричного пучка Бесселя–Гаусса с помощью микрообъектива с высокой числовой апертурой ($NA = 1,25$). Распределение интенсивности в плоскости входного зрачка микрообъектива (шаг сетки равен 200 мкм) (а,в); распределение интенсивности в фокальной плоскости микрообъектива (шаг сетки равен 2 мкм) (б,г). Поляризация фокусируемой АБ-моды направлена вдоль (а,б) и поперек (в,г) полумесяца.

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 $NA = 0,9$) 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. Соيفер // 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. **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.
7. **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.