

Острая фокусировка лазерных пучков с посекторно неоднородной поляризацией

С.С. Стафеев^{а,б}, А.Г. Налимов^{а,б}, М.В. Котляр^б, Л. О'Фаолейн^в, В.В. Котляр^{а,б}

^а Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская 151, Самара, Россия

^б Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^в Школа физики и астрономии, Университет Сент Эндрюса, KY16 9SS, Великобритания

Аннотация

Численно рассмотрена фокусировка оптического вихря с посекторной азимутальной поляризацией. Оценено влияние секторности на результаты фокусировки. Было показано, что использование 6-секторного пучка приводит к незначительному расхождению в размерах фокусного пятна по сравнению с идеальным пучком – разница в диаметрах по полуспаду интенсивности не превышает $0,001\lambda$. При использовании 4-секторного пучка расхождение в диаметрах не превышает $0,028\lambda$. Экспериментально исследовалась фокусировка лазерного излучения с длиной волны 633 нм, прошедшего через четырехсекторный пропускающий азимутальный поляризатор с фазовым сдвигом, зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием 532 нм. Экспериментально измеренные размеры фокусного пятна составили 0,46 и 0,57 от длины волны фокусируемого света.

Ключевые слова: острая фокусировка; оптический вихрь; азимутальная поляризация; зонная пластинка Френеля

1. Введение

Цилиндрические векторные пучки (пучки, в которых направление поляризации имеет радиальную симметрию) в оптике в настоящий момент активно изучаются [1]. При этом в последнее время отмечен рост к исследованию фокусировки азимутально и радиально поляризованных оптических вихрей [2,3]. Существует несколько способов получения цилиндрических векторных пучков, в которых направление поляризации изменяется не непрерывно, а посекторно. Такие пучки с посекторной азимутальной или радиальной поляризацией могут быть получены с помощью волновых пластинок [4,5], нелинейных оптических кристаллов [6], поляризующих пленок [7] и субволновых решеток [8].

Острая фокусировка цилиндрических пучков, поляризованных посекторно (азимутально и радиально), была рассмотрена ранее в [9], однако острая фокусировка азимутально поляризованного оптического вихря ранее не рассматривалась.

В данной работе было оценено влияние секторности азимутально поляризованного оптического вихря на результаты фокусировки и экспериментально рассмотрена фокусировка света, прошедшего через четырехсекторный субволновый азимутальный поляризатор с фазовым сдвигом. Было показано, что использование 6-секторного пучка приводит к незначительному расхождению в размерах фокусного пятна по сравнению с идеальным пучком – разница в диаметрах по полуспаду интенсивности не превышает $0,001\lambda$. При использовании 4-секторного пучка расхождение в диаметрах не превышает $0,028\lambda$. Экспериментально исследовалась фокусировка лазерного излучения с длиной волны 633 нм, прошедшего через четырехсекторный пропускающий азимутальный поляризатор с фазовым сдвигом, зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием 532 нм. Экспериментально измеренные размеры фокусного пятна составили 0,46 и 0,57 от длины волны фокусируемого света.

2. Влияние секторности пучка на результаты фокусировки

Моделирование выполнялось с помощью формул Ричардса-Вольфа. Считалось, что азимутально поляризованный свет с длиной волны 532 нм проходит через секторную фазовую пластинку после чего фокусируется зонной пластинкой Френеля с числовой апертурой $NA=0,95$. Пример моделируемой задачи показан на рис. 1.

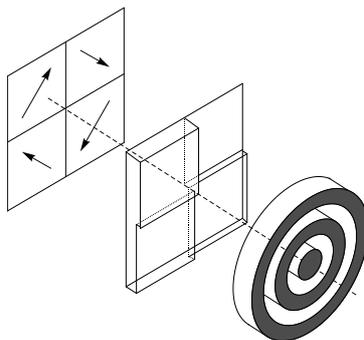


Рис. 1. Схема моделирования: четырехсекторный азимутально поляризованный пучок и четырехсекторная фазовая пластинка.

Результаты моделирования показаны на рис. 2-4. На рис. 2 показана фокусировка пучка, состоящего из четырех секторов. На рис. 3 – из шести секторов. Для сравнения на рис. 4 показана фокусировка идеального азимутально поляризованного оптического вихря.

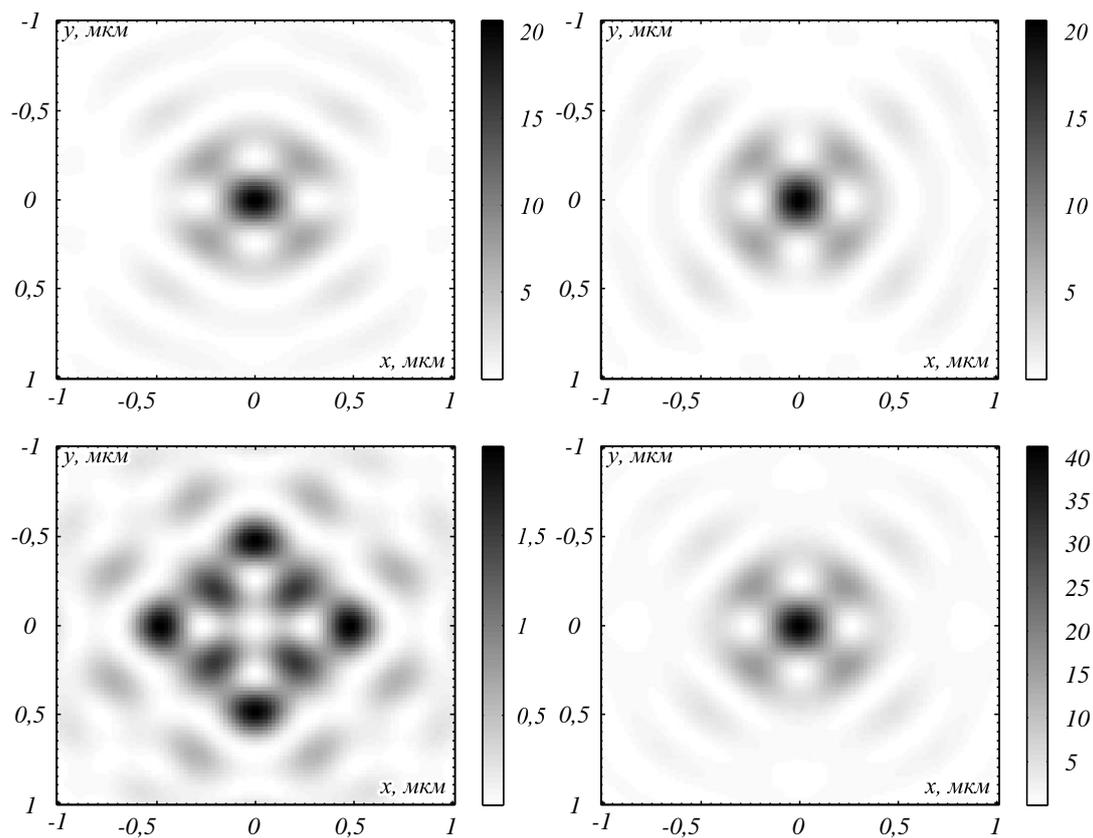


Рис. 2. Распределение в фокусном пятне интенсивности и отдельных составляющих интенсивности: I_x (а), I_y (б), I_z (в), I (г), при фокусировке 4-секторного азимутального пучка, прошедшего 4-секторную СФП.

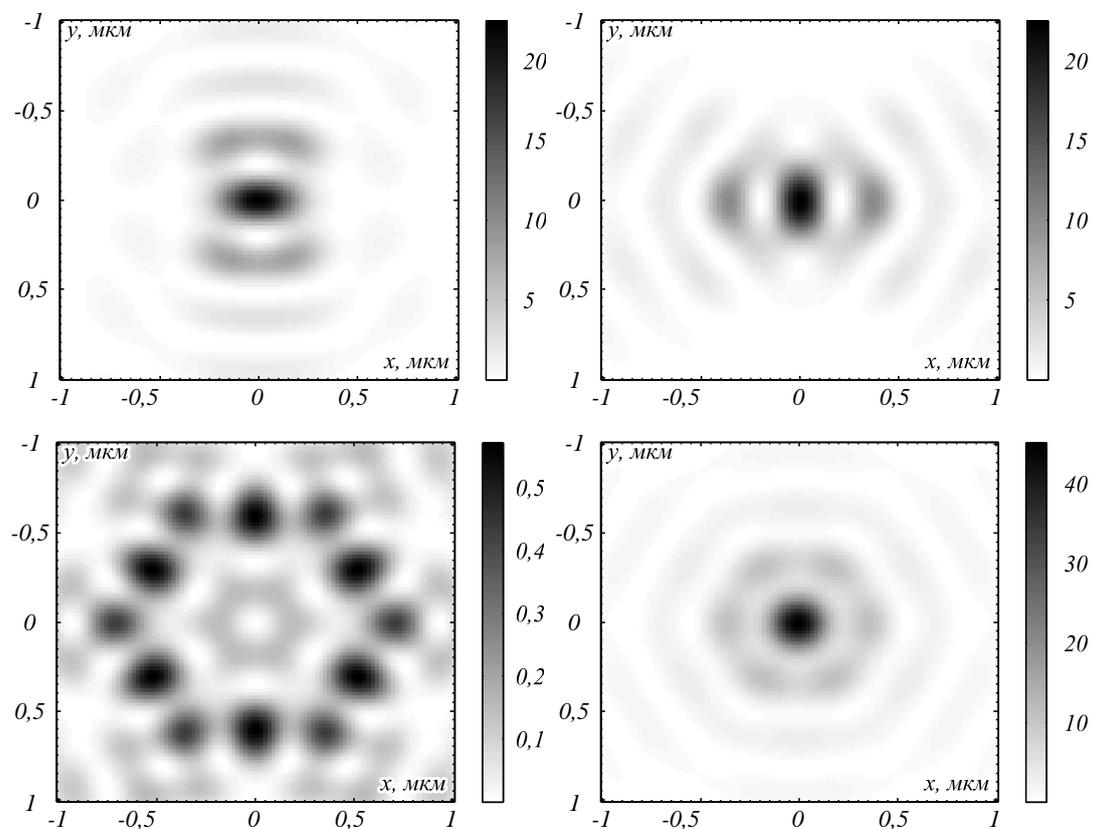


Рис. 3. Распределение в фокусном пятне интенсивности и отдельных составляющих интенсивности: I_x (а), I_y (б), I_z (в), I (г), при фокусировке 6-секторного азимутального пучка, прошедшего 6-секторную СФП.

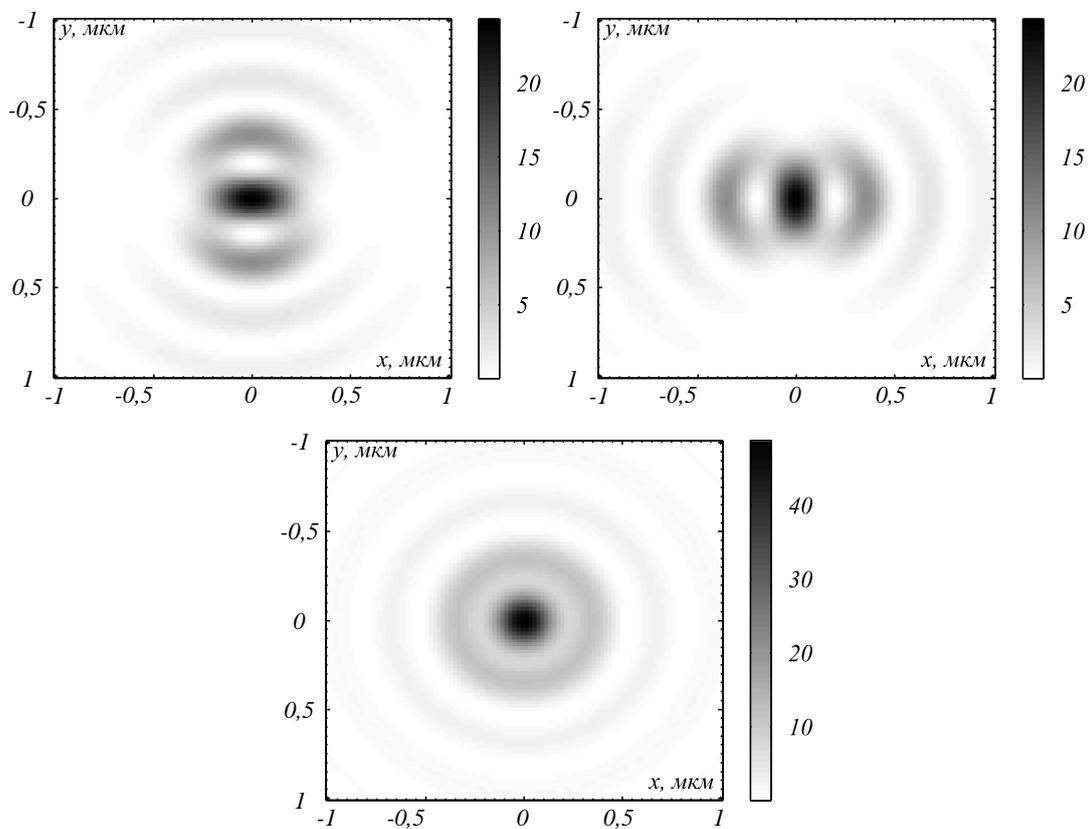


Рис. 4. Интенсивность в фокусном пятне I_x (а), I_y (б), I (в) при фокусировке идеального азимутально-поляризованного оптического вихря.

Из сравнения рис. 2 и 3 с рис. 4 видно, что секторно-поляризованный пучок, прошедший через секторную СФП в отличие от идеального азимутально поляризованного оптического вихря содержит продольную компоненту напряженности электрического поля. Хотя вклад ее в формирование фокуса мал – для 4-секторного пучка максимум поперечной компоненты примерно в 21 раз превышает максимум продольной, а для 6-секторного – примерно в 80 раз. На рис. 5 показана относительная погрешность расхождения интенсивности в фокусе идеального пучка (I_{ideal}) и секторно поляризованного (I_{quasi}), вычисленная как $|I_{ideal}-I_{quasi}|/\max(I_{ideal})$.

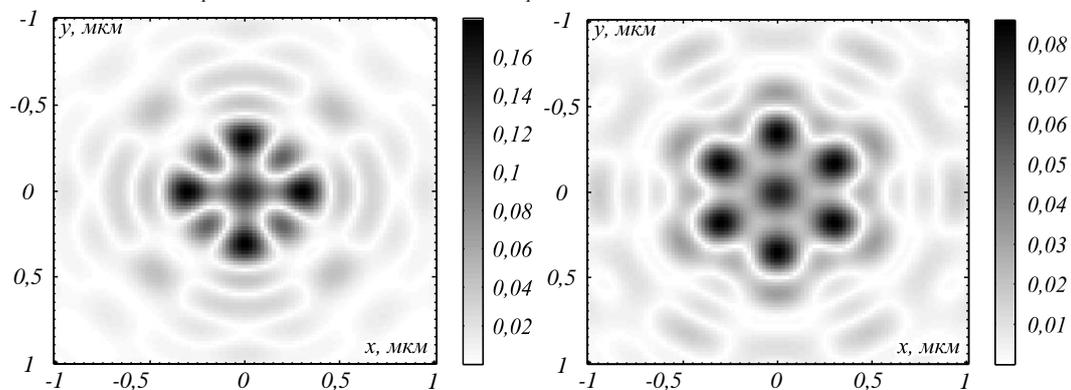


Рис. 5. Ошибка в фокусе, вычисленная как $|I_{ideal}-I_{quasi}|/\max(I_{ideal})$ для (а) 4-секторного и (б) 6-секторного азимутально-поляризованного пучка.

Максимум погрешности на рис. 5а не превышал 18%, а на рис. 5б – 9%. Размеры получившихся фокусных пятен приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что использование 6-секторного пучка практически не влияет на результат фокусировки – расхождение в размерах фокусного пятна по полуспаду интенсивности, вызванное асимметрией, не превышает $0,001\lambda$. Для 4-секторного пучка расхождение не превышает $0,028\lambda$.

Таблица 1. Значения диаметров фокусного пятна по полуспаду интенсивности

Количество секторов	$FWHM_{min}(\lambda)$	$FWHM_{max}(\lambda)$
4 сектора	0,458	0,490
6 секторов	0,462	0,463
Идеальный азимутально поляризованный вихрь	0,462	0,462

3. Пропускающий четырехсекторный поляризатор с фазовым сдвигом

3.1. Изготовление пропускающего четырехсекторного поляризатора с фазовым сдвигом

Для дальнейшего исследования острой фокусировки нами был предложен микрополяризатор с полуволновым сдвигом для преобразования линейной поляризации в азимутальную. Такой микрополяризатор содержит четыре зоны с углами наклона линий субволновых решеток -60° , 60° , -60° , 60° (рис. 6). Период решеток равен 230 нм, ширина ступеньки 138 нм, ширина канавки 92 нм. Материал решетки - кремний (Si), высота рельефа решетки 130 нм. Решетка рассчитана на длину волны 633 нм, комплексный показатель преломления кремния при расчете выбирался равным $n = 3,87 - 0,016i$. Размер изготовленного поляризатора 100×100 мкм.

Микрополяризатор был изготовлен по технологии электронной литографии. На поверхность аморфного кремния (130 нм) (a-Si) на прозрачной пирексной подложке, нанесли 320 нм резиста (ПММА), который закрепили при температуре 180°C . Величина толщины резиста (320 нм) была подобрана оптимальным образом. Во избежание формирования заряда на поверхности образца, на него было распылено 15 нм золота. Электронным лучом с напряжением 30 кВ была написана картина 4-секторной решетки-поляризатора на поверхности резиста. Для проявления образца, использовался раствор воды и изопропанола в соотношении 3:7. При этом процессе слой золота был полностью смыт с поверхности ПММА. Трансформирование шаблона решетки-поляризатора с резиста на аморфный кремний было осуществлено с помощью реактивного ионного травления с использованием газов CHF_3 и SF_6 . Толщина резистора была подобрана таким образом, чтобы он смог защитить части картины во время травления 130 нм аморфного кремния. Аспектное отношение скоростей травления материала и маски было найдено 1:2,5.

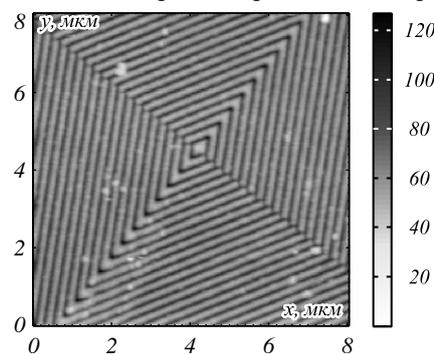


Рис. 6. АСМ изображение центральной части 4-секторного пропускающего поляризатора. Шкала показывает глубину рельефа в нм.

3.2. Экспериментальное исследование острой фокусировки лазерного излучения, прошедшего через четырехсекторный преобразователь поляризации

Экспериментально исследовалась фокусировка зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием $f = 532$ нм лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 633$ нм прошедшего через 4-секторный преобразователь поляризации. На рис. 7 показана схема проведенных измерений. В данном эксперименте линейно-поляризованное лазерное излучение от гелий-неонового лазера с длиной волны 633 нм попадало через волоконно-оптическую транспортную систему на подложку с расположенными на ней 4-СПП. Положение пятна и его размеры на зонной пластинке контролировались путем смещений зеркала M_1 . Прошедшее через 4-СПП излучение фокусировалось зонной пластинкой, а распределение интенсивности в фокусе измерялось сканирующим ближнепольным оптическим микроскопом Интегра Спектра (выделен штриховой линией на рис. 7) с помощью четырёхгранного пирамидального кантилевера C .

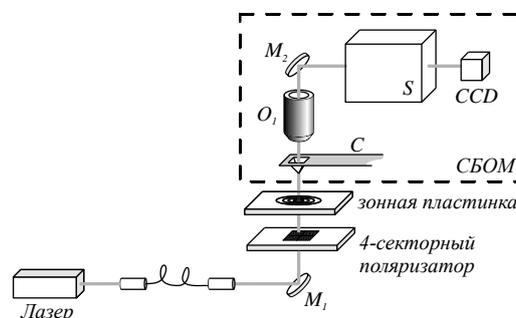


Рис. 7. Схема проводимого эксперимента. M_1 , M_2 – зеркала, O_1 – $100\times$ объектив, C – кантилевер, S – спектрометр, CCD – камера.

Измерения на сканирующем ближнепольном оптическом микроскопе показали, что на расстоянии 200-250 нм от поверхности ЗП формируется фокусное пятно, а его размеры по полуспаду интенсивности составляют $0,46\lambda$ и $0,57\lambda$ (рис. 8). При этом численное моделирование фокусировки методом FDTD показало, что размеры пятна формируемого поперечной составляющей напряженности электрического поля были равны $\text{FWHM} = 0,42\lambda$ и $\text{FWHM} = 0,59\lambda$.

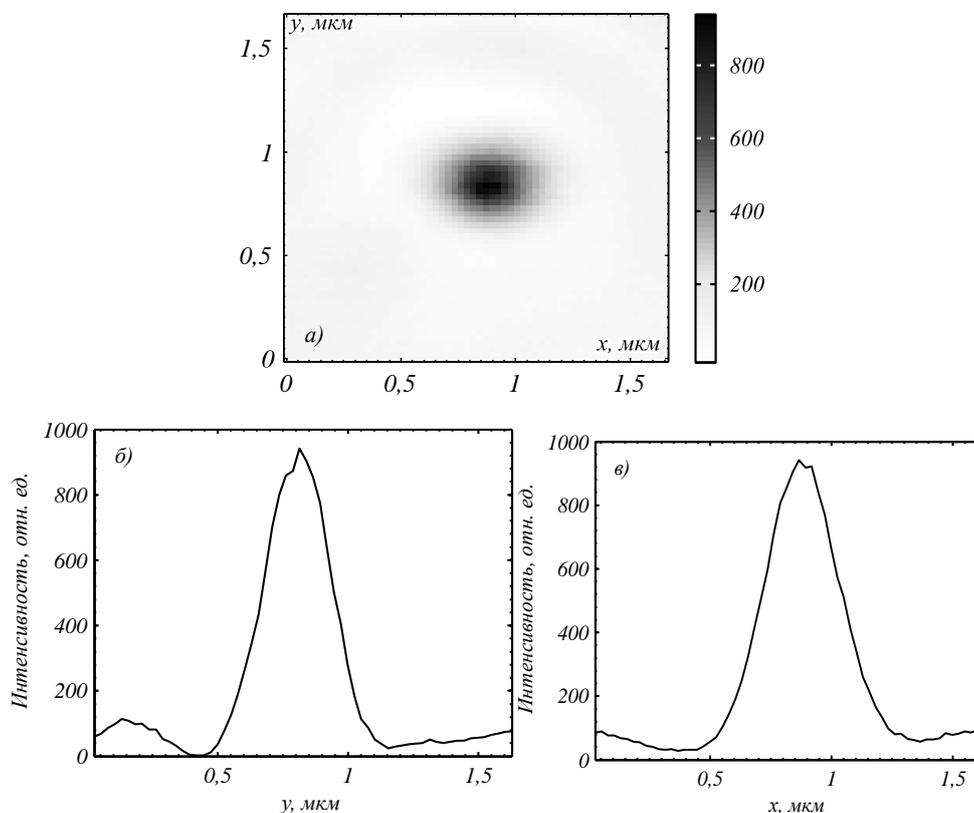


Рис. 8. Распределение интенсивности в фокусе измеренное на сканирующем ближнепольном микроскопе.

4. Заключение

В данной работе было оценено влияние секторности азимутально поляризованного оптического вихря на результаты фокусировки и экспериментально рассмотрена фокусировка света, прошедшего через четырехсекторный субволновый азимутальный поляризатор с фазовым сдвигом. Было показано, что использование 6-секторного пучка приводит к незначительному расхождению в размерах фокусного пятна по сравнению с идеальным пучком – разница в диаметрах по полуспаду интенсивности не превышает $0,001\lambda$. При использовании 4-секторного пучка расхождение в диаметрах не превышает $0,028\lambda$. Экспериментально исследовалась фокусировка лазерного излучения с длиной волны 633 нм, прошедшего через четырехсекторный пропускающий азимутальный поляризатор с фазовым сдвигом, зонной пластинкой Френеля с фокусным расстоянием 532 нм. Экспериментально измеренные размеры фокусного пятна составили 0,46 и 0,57 от длины волны фокусируемого света.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-4128.2016.9) и молодого кандидата наук (МК-9019.2016.2), а также грантов РФФИ (15-07-01174, 15-47-02492, 16-29-11698, 16-47-630483).

Литература

- [1] Zhan, Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Adv. Opt. Photon.* – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57.
- [2] Hao, X. Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam / X. Hao, C. Kuang, T. Wang, X. Liu // *Opt. Lett.* – 2010. – Vol. 35. – P. 3928-3930.
- [3] Qin, F. Shaping a Subwavelength Needle with Ultra-long Focal Length by Focusing Azimuthally Polarized Light / F. Qin, K. Huang, J. Wu, J. Jiao, X. Luo, C. Qiu, M. Hong // *Scientific Reports.* – 2015. – Vol. 5. – P. 09977.
- [4] Machavariani, G. Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32. – P. 1468-1470.
- [5] Алфёров, С.В. Экспериментальное исследование фокусировки неоднородно поляризованных пучков, сформированных при помощи секторных пластинок / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика.* – 2014. – Т. 38, №1. – С. 57-64.
- [6] Imai, R. Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals with threefold rotational symmetry / R. Imai, N. Kanda, T. Higuchi, Z. Zheng, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami // *Opt. Express.* – 2012. – Vol. 20. – P. 21896-21904.
- [7] Man, Z. Arbitrary vector beams with selective polarization states patterned by tailored polarizing films / Z. Man, C. Min, Y. Zhang, Z. Shen, and X.-C. Yuan // *Laser Phys.* – 2013. – Vol. 23. – P. 105001.
- [8] Налимов, А.Г. Отражающий четырёхзонный субволновый элемент микрооптики для преобразования линейной поляризации в радиальную / А.Г. Налимов, Л. О'Фаолейн, С.С. Стафеев, М.И. Шанина, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика.* – 2014. – Т.38, №2. – С. 229-236.
- [9] Man, Z. Tight focusing of quasi-cylindrically polarized beams / Z. Man, C. Min, S. Zhu, X.-C. Yuan // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2014. – Vol. 31. – P. 373-378.