



УДК 535.42

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ СО СПИРАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАЗЫ

А.А. Зинчик^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская ФедерацияАдрес для переписки: zinchik_alex@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 23.03.15, принята к печати 15.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-817-824

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Зинчик А.А. Применение пространственных модуляторов света для формирования лазерных пучков со спиральным распределением фазы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 817-824.

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены аспекты численного моделирования лазерных спиральных пучков. Экспериментально получены спиральные пучки с применением жидкокристаллических пространственных модуляторов света. Исследована возможность динамического изменения параметров лазерного пучка. **Метод.** Традиционно спиральные пучки получают с помощью статических масок, задающих амплитудное и фазовое распределение пучка. В работе предложен модернизированный способ с использованием двух жидкокристаллических пространственных модуляторов света. Модуляторы отдельно формируют амплитудное и фазовое распределение лазерного пучка. **Основные результаты.** Выполнено численное моделирование распространения в пространстве спиральных пучков с различными амплитудными и фазовыми характеристиками с использованием программного пакета VirtualLab 5.0 производства LightTrans GmbH. Результаты моделирования сопоставлены с результатами натурального эксперимента. Результаты эксперимента хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования. Показано, что применение жидкокристаллических пространственных модуляторов света позволяет динамически изменять параметры спирального пучка, их структуру и зависимость угла поворота от расстояния. Инвертирование фазового распределения ведет к изменению направления вращения лазерного пучка, а следовательно, к изменению направления его орбитального момента. **Практическая значимость.** Применение пространственных модуляторов позволяет динамически менять параметры пучка, включая изменение направления вращения. Результаты работы могут быть использованы при решении задач лазерной манипуляции микрочастицами, а также в задачах определения фазовых неоднородностей прозрачных объектов.

Ключевые слова

жидкокристаллический пространственный модулятор света, компьютерное моделирование, вращение поперечного сечения пучка, динамическое изменение параметров, спиральный пучок.

APPLICATION OF SPATIAL LIGHT MODULATORS FOR GENERATION OF LASER BEAMS WITH A SPIRAL PHASE DISTRIBUTION

А.А. Zinchik^а^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian FederationCorresponding author: zinchik_alex@mail.ru

Article info

Received 23.03.15, accepted 15.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-817-824

Article in Russian

For citation: Zinchik A.A. Application of spatial light modulators for generation of laser beams with a spiral phase distribution. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 817-824.

Abstract

Subject of Research. This paper discusses numerical simulation of spiral beams. Spiral beams have been experimentally obtained with the use of liquid crystal spatial light modulators (LCD SLM). The ability of dynamical change for the laser beam parameters has been studied. **Method.** Spiral beams are traditionally obtained by means of static masks defining the amplitude and phase distribution of the beam. The paper deals with modernized method with the use of two LCD SLMs. Modulators form separately the amplitude and phase distribution of the laser beam. **Main Results.** Numerical modeling of space spiral beams with different amplitude and phase characteristics has been carried out with the use of VirtualLab 5.0 software package manufactured by LightTrans GmbH. Simulation results are compared to the results of a natural experiment.

Experimental results are in good agreement with computer simulation. It is shown that LCD SLMs application gives the possibility for dynamical change of the spiral beam parameters, their structure and the dependence of rotation angle on the distance. Distribution phase inversion leads to a change in the rotation direction of the laser beam and, therefore, to a change in the direction of its orbital angular momentum. **Practical Relevance.** The use of spatial modulators makes it possible to change dynamically the beam parameters, including rotation direction change. The results can be applied for solution of problems related to laser manipulating of microparticles, as well as the problems of determining the phase inhomogeneities of transparent objects.

Keywords

LCD spatial light modulator, simulation, beam cross section rotation, dynamical change of parameters, spiral beam.

Введение

Лазерное излучение широко используют для манипуляции микрочастицами в биологии, медицине, микроэлектронике, ядерной физике и других областях. Функциональность лазерных манипуляторов может быть значительно повышена с помощью спиральных лазерных пучков, структура которых остается неизменной при распространении с точностью до масштаба и вращения. Как известно, пучки такого типа имеют ненулевой орбитальный угловой момент [1–4]. Эти пучки могут не только вращать микроскопические частицы около оси пучка, но и перемещать такие частицы по заданной траектории [5–8]. Они сохраняют свою форму при распространении и фокусировке и могут иметь очень разнообразную структуру распределения интенсивности в поперечном сечении [9–13]. В работах [1, 2] показано, что лазерные моды Эрмита–Гаусса и Лагерра–Гаусса являются частными случаями спиральных лазерных пучков с нулевым параметром вращения. В последнее время появляются статьи, рассматривающие применение спиральных пучков к задачам неразрушающего контроля [14] и распознавания контурных изображений [15].

Существуют два основных способа формирования спиральных пучков: внутри лазерного резонатора или вне резонатора, путем использования амплитудных и фазовых масок для раздельного получения соответствующих компонент спирального пучка.

Первый способ требует вмешательства в конструкцию лазерного резонатора и не позволяет использовать готовые лазерные источники. Второй способ прост в реализации, но требует отдельного комплекта амплитудных и фазовых масок для каждого типа спирального пучка. Оба способа не позволяют оперативно изменять такие параметры пучка, как структура и направление вращения.

В работе [5] было предложено использовать один фазовый жидкокристаллический пространственный модулятор света (ЖК ПМС) для формирования в фокальной плоскости линзы распределения интенсивности, соответствующего поперечному сечению спирального пучка. При этом способе поперечное сечение полученного пучка не вращается при распространении.

В настоящей работе впервые предлагается использовать два жидкокристаллических пространственных модулятора света для раздельного формирования распределения интенсивности и фазы в поперечном сечении спирального пучка. Такое решение позволяет динамически изменять параметры спирального пучка, их структуру и зависимость угла поворота от расстояния. В частности, инвертирование фазового распределения ведет к изменению направления вращения лазерного пучка, а следовательно, к изменению направления его орбитального момента.

Теоретические аспекты моделирования спиральных пучков

Распределение интенсивности оптического поля описывается следующим уравнением [3]:

$$F(x, y, l) = \frac{1}{\sigma} F_0(X, Y) \exp\left(\frac{2il(X^2 + Y^2)}{\rho^2 k}\right) - i\gamma_0 \arg(\sigma),$$

где $X = \frac{x \cos(\theta_0 \arg(\sigma)) - y \sin(\theta_0 \arg(\sigma))}{\rho |\sigma|}$ и $Y = \frac{x \sin(\theta_0 \arg(\sigma)) + y \cos(\theta_0 \arg(\sigma))}{\rho |\sigma|}$; x и y – координаты в

плоскости поперечного сечения пучка; i – мнимая единица; l – расстояние вдоль направления распространения пучка; θ_0 – параметр вращения; k – волновое число; ρ – эффективный радиус гауссова пучка; $\sigma = 1 + 2il/(k\rho^2)$ – комплексный параметр, введенный для более компактной записи уравнения. Величина γ_0 – постоянная фазового набега, определяемая как $\gamma_0 = n + m + 1$, если функция $F_0(X, Y)$ является функцией Эрмита–Гаусса, и как $\gamma_0 = 2n + m + 1$, если функция $F_0(X, Y)$ является функцией Лагерра–Гаусса; n, m – индексы функций.

Функция $F_0(X, Y)$ должна удовлетворять следующим условиям [2, 3]:

$$\nabla^2 F_0 + 4i\theta_0 \left(X \frac{\partial F_0}{\partial Y} - Y \frac{\partial F_0}{\partial X} \right) 4F_0 (X^2 + Y^2 - \gamma_0) = 0.$$

Наиболее интересными являются два случая: параметр вращения $\theta_0 = \pm 1$ и параметр вращения θ_0 является вещественным числом. В первом случае спиральный пучок может быть создан в форме произвольной кривой. Распределение комплексной амплитуды описывается следующим уравнением [4]:

$$F(x,y,l) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\rho^2 \sigma}\right) f\left(\frac{x \pm y}{\rho \sigma}\right).$$

Здесь $f\left(\frac{x \pm y}{\rho \sigma}\right)$ – произвольная комплексная функция, задающая форму поперечного сечения пучка, знак в аргументе этой функции определяет направление вращения светового пучка при распространении.

Теоретически возможно получить пучок с распределением интенсивности в форме произвольной кривой. Для этого необходимо выбрать формирующую кривую, т.е. кривую, в форме которой мы хотим получить поперечное сечение пучка, записать уравнение этой кривой $\xi(t)$ в параметрической форме: $\xi(t) = a(t) + ib(t)$, где t – параметр, a и b – константы, и построить распределение поля в соответствии с формулой [8]

$$I(z, \bar{z}) = \exp\left(-\frac{z\bar{z}}{\rho^2}\right) \int_0^T \exp\left(-\frac{\xi(t)\bar{\xi}(t)}{\rho^2} + \frac{2z\bar{\xi}(t)}{\rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \int_0^t (\bar{\xi}(\tau)\xi'(\tau) - \xi(\tau)\bar{\xi}'(\tau)) d\tau\right) |\xi'(t)| dt, \quad (1)$$

где $z = x + iy$, $\bar{z} = x - iy$. Интеграл $\int_0^t (\bar{\xi}(\tau)\xi'(\tau) - \xi(\tau)\bar{\xi}'(\tau)) d\tau$ определяет ориентированную площадь сектора, формируемого при движении вдоль кривой ξ в интервале значений τ от 0 до t .

Во втором случае, если $\theta_0 \neq 0$ и $\theta_0 \neq \pm 1$, функция $F_0(X,Y)$ может быть представлена как сумма двух мод Лагерра–Гаусса [7]:

$$F_0(X,Y) = c_1 L_{n_0 m_0}(X,Y) + c_2 L_{n_1 m_1}(X,Y),$$

где c_1 и c_2 – произвольные комплексные константы, $L_{n_0 m_0}$ и $L_{n_1 m_1}$ – функции Лагерра–Гаусса. Тогда θ_0 определяется как [7]

$$\theta_0 = \frac{2n_0 + |m_0| - 2n_1 + |m_1|}{m_1 - m_0},$$

где n_0, m_0 – индексы первой моды, n_1, m_1 – индексы второй моды. В этом случае структурно-устойчивое решение имеет вид [8]

$$F(x,y,l) = \frac{1}{\sigma} F_0(X,Y) \exp\left(\frac{2il(X^2 + Y^2)}{\rho^4 k} - i(2n_0 + |m_0| + \theta_0 m_0 + 1) \arg(\sigma)\right). \quad (2)$$

Моделирование спиральных пучков

В качестве среды моделирования использовался программный пакет VirtualLab 5.0 (LightTrans GmbH).

В связи с тем, что ЖК ПМС позволяют формировать только дискретное распределение интенсивности и фазы, для моделирования по уравнению (1) были рассчитаны дискретные поперечные распределения интенсивности и фазы, из которых формировался спиральный пучок. Шаг дискретизации в поперечном распределении составлял 8 мкм. С использованием полученных распределений проведено моделирование распространения пучка в свободном пространстве и рассчитаны поперечные сечения пучка на различных расстояниях.

Результат моделирования такого пучка показан на рис. 1. Пучок представляет собой в поперечном сечении линию и вращается при распространении. Максимальный угол поворота, достигаемый на бесконечном расстоянии, составляет в данном случае 90°.

Рис. 2 показывает изменение с расстоянием поперечного сечения спирального пучка, полученного суммированием двух мод Лагерра–Гаусса. Коэффициенты первой моды составляют $m_0=1, n_0=0$, второй моды – $m_1=5, n_1=2$, константы $c_1=-2i, c_2=4$.

В этом случае для расчета распределения амплитуды и фазы использовалось уравнение (2).

Рис. 1 и 2 подтверждают, что поперечное сечение пучка вращается при распространении. Изменение фазового распределения на инверсное ведет к изменению направления вращения на противоположное.

На рис. 3 показано влияние распределения фазы на направление вращения пучка при распространении. Распределение фазы, показанное на рис. 3, а, вызывает вращение поперечного сечения пучка по часовой стрелке. Инверсное распределение (рис. 3, б) вызывает вращение против часовой стрелки. При этом распределение интенсивности и фазы претерпевает изменения, показанные на рис. 3 (в)–(е).

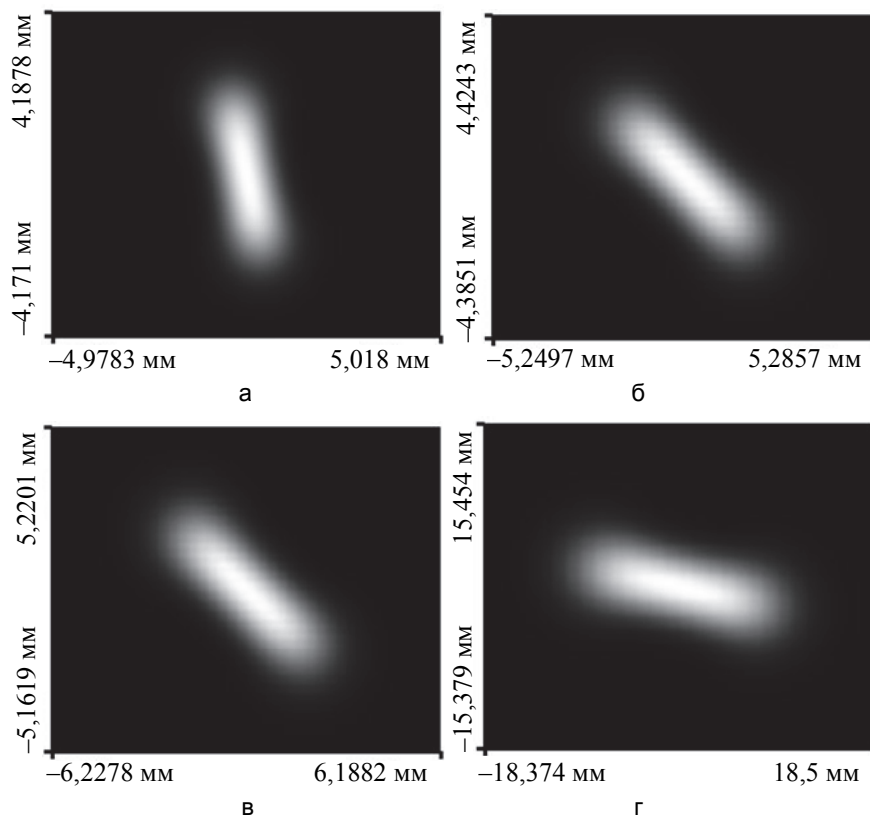


Рис. 1. Изменение поперечного сечения спирального пучка в форме прямой линии с увеличением расстояния. Дистанция: 1 м (а); 3 м (б); 5 м (в); 15 м (г)

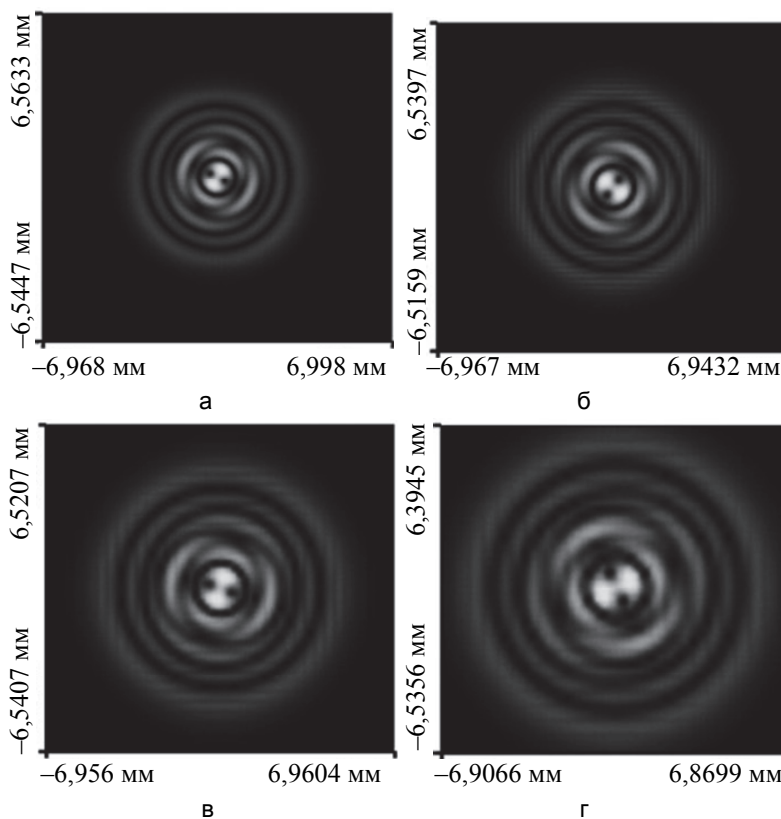


Рис. 2. Изменение поперечного сечения спирального пучка, составленного из двух мод Лагерра–Гаусса, с увеличением расстояния. Дистанция: 1 м (а); 3 м (б); 5 м (в) и 15 м (г)

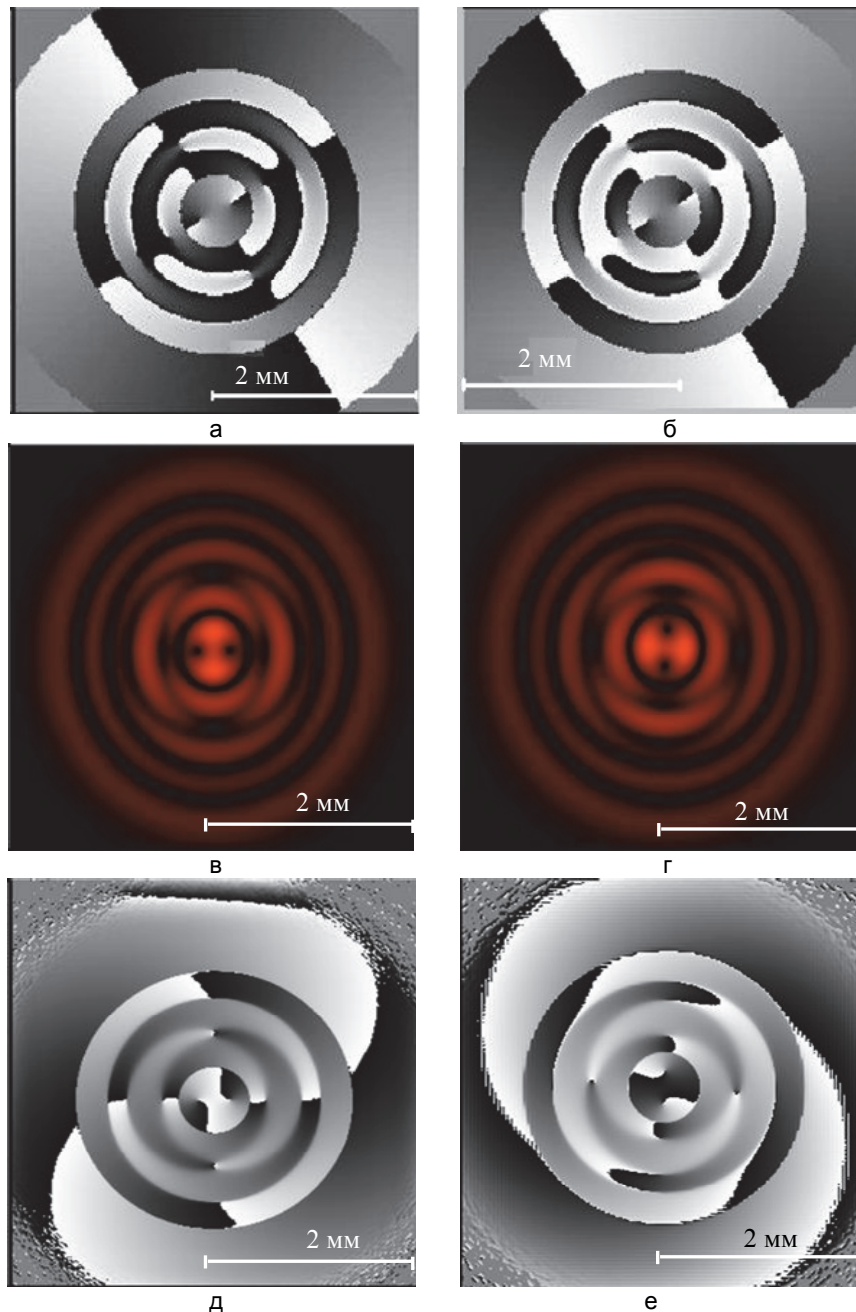


Рис. 3. Распределение интенсивности и фазы в поперечном сечении спирального пучка, составленного из двух мод Лагерра–Гаусса. Распределение фазы, соответствующее распределению интенсивности, показанному на рис. 2, а, (а); инверсное распределение фазы (б). Изменение распределения интенсивности и фазы при повороте пучка в процессе распространения по часовой стрелке, (в) и (д), и против часовой стрелки, (г) и (е). Размер изображений 4 мм. На изображениях (а), (б), (д) и (е), черный цвет соответствует нулевому сдвигу фазы, белый цвет соответствует сдвигу фазы на 2π

Организация эксперимента

В эксперименте спиральный пучок формировался вне лазерного резонатора, с использованием статических масок, задающих распределение интенсивности и фазы в поперечном сечении пучка [2]. Для каждого типа спирального пучка требуется свой комплект амплитудных и фазовых масок, поэтому использованы жидкокристаллические пространственные модуляторы света. В этом случае можно динамически изменять параметры спирального пучка.

Экспериментальная установка содержит два ЖК ПМС, формирующие по отдельности интенсивность и фазу спирального лазерного пучка. Схема установки показана на рис. 4. Луч гелий-неонового лазера 1 ($\lambda = 632,8$ нм) пропускают через коллиматор 2, линейный поляризатор 3, плоскость поляризации которого расположена вертикально, и амплитудный ЖК ПМС 4, который формирует распределение интенсивности спирального пучка.

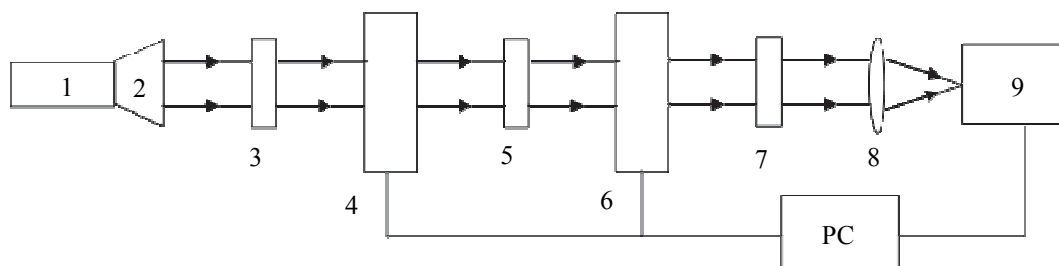


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Плоскость поляризации второго поляризатора 5, расположенного за амплитудным пространственным модулятором света (ПМС), ориентирована перпендикулярно первому. Работающий в режиме управления фазы ПМС 6 обеспечивает требуемое распределение фаз. Плоскость поляризации третьего поляризатора 7 совпадает с плоскостью поляризации первого 3. В фокальной плоскости линзы 8 расположена ПЗС-камера 9. Персональный компьютер (PC) управляет ПМС и получает изображение с камеры 9.

Размеры ПЗС-матрицы камеры 23,6×15,6 мм. Максимальное разрешение 4928×3264. Размер пиксела 4,78 мкм.

Перед проведением эксперимента распределения интенсивности и фазы, полученные из уравнений (1) или (2), нормировались на максимальное значение 255 и сохранялись в виде графических файлов в формате BMP. Для распределения интенсивности значение 255 соответствовало максимальному пропусканию, а для фазового распределения – изменению фазы на 2π . Такие графические файлы позволяют задавать величину пропускания и фазового сдвига в соответствующих ЖК ПМС. Изображения, полученные на различных расстояниях для пучка с поперечным сечением в форме отрезка прямой, представлены на рис. 5 и 6.

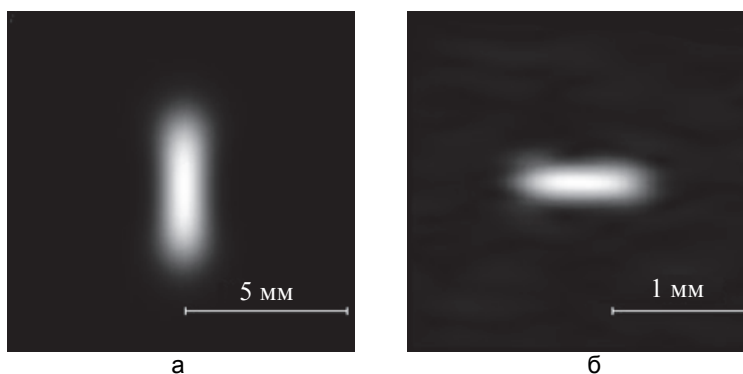


Рис. 5. Поперечное сечение спирального пучка в форме прямой линии на выходе из второго пространственным модулятором света и в фокальной плоскости линзы

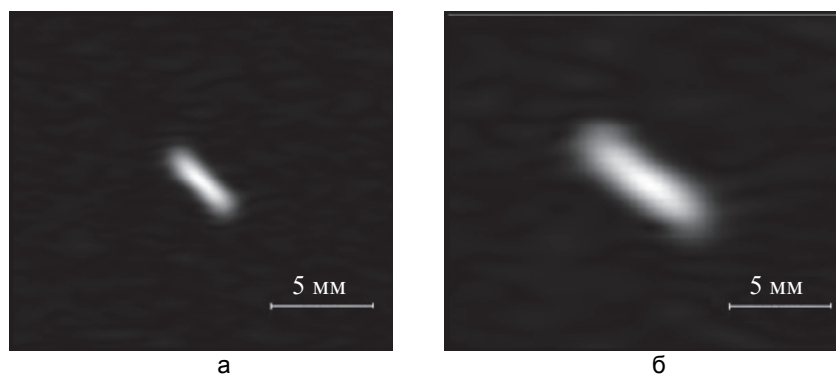


Рис. 6. Изменение размеров и угла поворота поперечного сечения спирального пучка в форме отрезка прямой с увеличением расстояния. Расстояния соответственно 3 м (а), 5 м (б)

Обсуждение результатов

Поперечные сечения экспериментально полученных пучков фиксировались на различных расстояниях. Рис. 5 показывает экспериментально полученные изображения поперечного сечения спирального пучка на выходе из второго ПМС и в фокальной плоскости объектива. Видно, что изображение попереч-

ного сечения пучка при распространении вращается и стремится к максимальному углу поворота 90° , что полностью соответствует теоретическим расчетам.

Рис. 6 показывает экспериментально полученные изображения поперечного сечения спирального пучка на различных расстояниях. Угол поворота поперечного сечения пучка соответствует теоретически полученным результатам, приведенным на рис. 1.

Полученные экспериментально изображения поперечного сечения сравнивались с результатами компьютерного моделирования. Для этого изображения нормировались по интенсивности, и определялся коэффициент корреляции. Коэффициенты корреляции для трех видов пучков приведены в таблице.

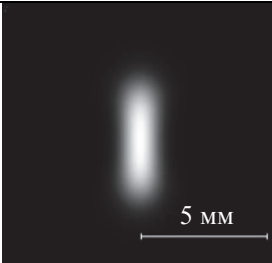
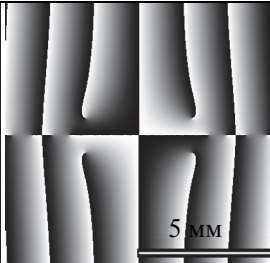
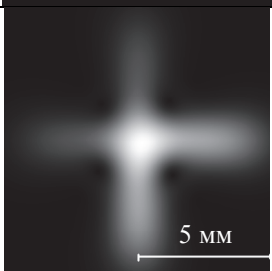
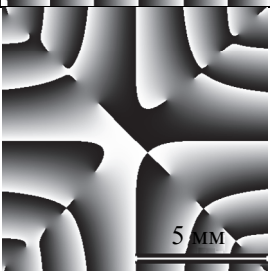
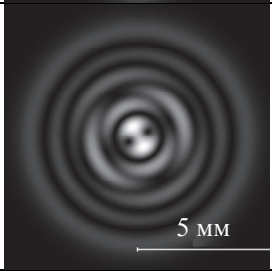

Тип пучка	Интенсивность и фаза пучка		Коэффициент корреляции
«Отрезок»			0,95
«Крест»			0,81
Сумма двух мод Лагерра-Гаусса			0,7

Таблица. Коэффициенты корреляции между теоретически рассчитанными и экспериментально полученными спиральными пучками

Наиболее высокий коэффициент корреляции имеет самый простой пучок с поперечным сечением в виде отрезка прямой. Уменьшение коэффициента корреляции у более сложных пучков связано с более сложной фазовой структурой последних. Дополнительные погрешности в структуру пучка вносятся расстоянием между амплитудной и фазовой масками.

Заключение

Как известно, сингулярной оптикой называют область исследования, связанную со световыми полями с дислокациями волнового фронта или оптическими вихрями. Поля указанного вида формируются и наблюдаются как в линейных, так и нелинейных оптических средах и являются предметом довольно интенсивных исследований. Вихревые световые поля, сохраняющие свою структуру с точностью до масштаба и вращения при распространении, обладая весьма разнообразной формой распределения интенсивности, тем не менее, описываются явными аналитическими выражениями. В работе рассмотрено численное моделирование спиральных лазерных пучков и экспериментальное их получение. Представлен метод экспериментального формирования спиральных пучков с различными характеристиками. Для экспериментального получения спиральных пучков использовались два жидкокристаллических пространственных модулятора света, формирующих отдельно амплитудную и фазовую компоненты результирующего лазерного пучка. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования. Показано, что использование жидкокристаллических пространственных модуляторов света позволяет динамически изменять параметры спирального пучка, такие как структура и направление вращения. В частности, инвертирование фазового распределения ведет к изменению направления вращения лазерного пучка, а следовательно, к изменению направления его орбитального момента.

References

1. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. Spiral-type beams. *Optics Communication*, 1993, vol. 102, no. 3–4, pp. 336–350. doi: 10.1016/0030-4018(93)90406-U
2. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. Spiral type beams: optical and quantum aspects. *Optics Communication*, 1996, vol. 125, no. 4–6, pp. 302–323.
3. Abramochkin E.G., Afanasiev K.N., Volostnikov V.G., Korobtsov A.V., Kotova S.P., Losevsky N.N., Mayorova A.M., Razueva E.V. Formation of vortex light fields of specified intensity for laser micromanipulation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2008, vol. 72, no. 1, pp. 68–70. doi: 10.1007/s11954-008-1017-4
4. Kotlyar V.V., Almazov A.A., Khonina S.N., Soifer V.A., Elfstrom H., Turunen J. Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, vol. 22, no. 5, pp. 849–861. doi: 10.1364/JOSAA.22.000849
5. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. *Modern Optics of Gaussian Beams*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 184 p. (In Russian)
6. Garces-Chavez V., McGloin D., Melville H., Sibbett W., Dholakia K. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam. *Nature*, 2002, vol. 419, no. 6903, pp. 145–147. doi: 10.1038/nature01007
7. MacDonald M.P., Paterson L., Volke-Sepulveda K., Arlt J., Sibbett W., Dholakia K. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures. *Science*, 2002, vol. 296, no. 5570, pp. 1101–1103. doi: 10.1126/science.1069571
8. Abramochkin E.G., Volostnikov V.G. Spiral light beams. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2004, vol. 174, no. 12, pp. 1273–1300.
9. Afanasiev K.N., Volostnikov V.G., Vorontsov E.N., Kotova S.P., Patlan V.V., Razueva E.V. Formation of the light field in the shape of curves on the base of spiral type beam optics: details. *Physics and Electronics*, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 71–75.
10. Volostnikov V., Kotova S., Kishkin S. Spiral light beams: characteristics and applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 536, no. 1, art. 012001. doi: 10.1088/1742-6596/536/1/012001
11. Afanasiev K.N., Korobtsov A.V., Kotova S.P., Losevsky N.N. Light fields with nonzero angular momentum for laser micromanipulation. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*, 2007, vol. 9, no. 3, pp. 615–619. (In Russian)
12. Kotlyar V.V., Khonina S.N., Skidanov R.V., Soifer V.A. Rotation of laser beam with zero of the orbital angular momentum. *Optics Communication*, 2007, vol. 274, no. 1, pp. 8–14. doi: 10.1016/j.optcom.2007.01.059
13. Kotlyar V.V., Kovalev A.A. Hermite-Gaussian modal laser beams with orbital angular momentum. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, vol. 31, no. 2, pp. 274–282. doi: 10.1364/JOSAA.31.000274
14. Pavlov P.V., Petrov N.V., Malov A.N. Roughness parameters and surface defects detection of aircraft parts with spiral laser beams. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 6(76), pp. 84–88. (In Russian)
15. Volostnikov V.G., Kishkin S.A., Kotova S.P. New method of contour image processing based on the formalism of spiral light beams. *Quantum Electronics*, 2013, vol. 43, no. 7, pp. 646–650. doi: 10.1070/QE2013v043n07ABEH015189

Зинчик Александр Адольфович – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, zinchik_alex@mail.ru

Alexander A. Zinchik – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, zinchik_alex@mail.ru