



СВЕТ, СОХРАНЯЮЩИЙ ФОРМУ

Е.В.Разуева,
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН,
Самара,
dev@fian.smr.ru

Световые поля со спиральными фазовыми фронтами, или фазовыми сингулярностями, составляют предмет изучения сингулярной оптики. Начиная с 90-х годов XX века, в этой области достигнут значительный прогресс как в плане теоретического конструирования вихревых световых полей, интенсивность которых не изменяет свою форму при распространении, так и в методах их оптической реализации. В настоящее время вихревые световые поля, благодаря наличию фазовых сингулярностей и разнообразию форм распределения интенсивности, используются для бесконтактного манипулирования микробиологическими объектами в биологии и электронике.

СПИРАЛЬНЫЕ ПУЧКИ СВЕТА

Сингулярная оптика, начавшаяся с эпизодических публикаций в 70-е годы прошлого века и пройдя период становления в 80-е годы, к настоящему времени полностью оформилась как самостоятельная область оптики, занимающаяся теоретическим и экспериментальным исследованием световых полей с фазовыми сингулярностями. Изучение таких полей при распространении в различных средах, способов их преобразования, возможностей формирования сингулярных световых полей с априорно заданными свойствами, а также прикладные аспекты, связанные, например, с конструированием дифракционных оптических элементов (ДОЭ), имеют большое значение как в научном плане, так и в плане применения в современных технологиях. Новый импульс развития это направление оптики получило после обнаружения взаимосвязи между угловым моментом световых полей и наличием у них фазовых сингулярностей.

Большая часть работ по сингулярной оптике ведется в параксиальном приближении, которое широко используется в современных исследованиях, поскольку является хорошей

THE LIGHT MAINTAINING ITS SHAPE

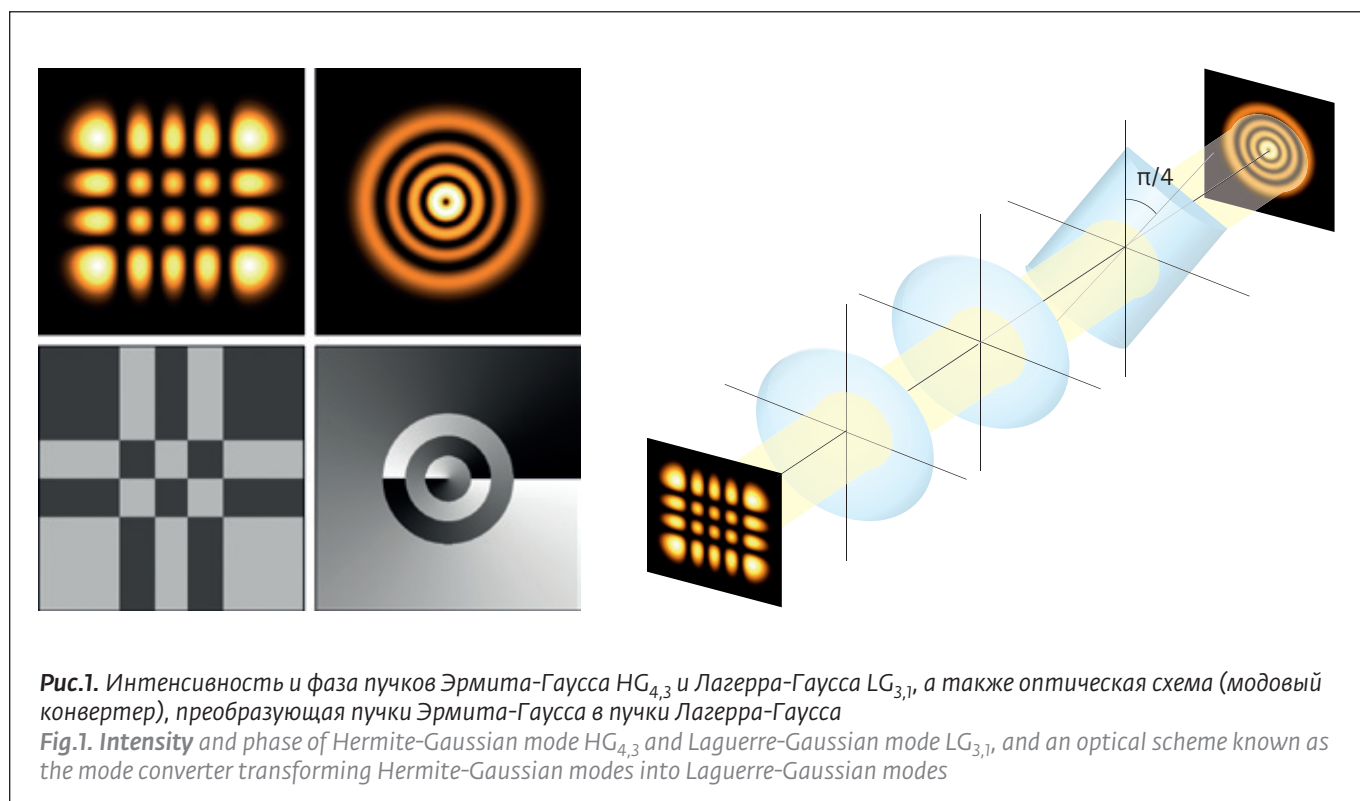
E.V.Razueva, P.N.Lebedev
Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara,
dev@fian.smr.ru

The light fields with spiral phase fronts or phase singularities compose the subject matter of singular optics. Starting from the 90th of the 20th century, the significant progress has been achieved in this area in terms of theoretical design of vortex light fields, intensity of which does not change its shape during the propagation, and in terms of the methods of their optical implementation. At the present time, the vortex light fields are used for contactless manipulation of microscopic objects in biology and electronics due to the presence of phase singularities and variety of the forms of intensity distribution.

SPIRAL LIGHT BEAMS

The singular optics started from the occasional publications in the 70th of the last century and underwent the period of establishment in the 80th of the last century; at the present time the singular optics has become independent area of optics, which is involved in the theoretical and experimental studies of light fields with phase singularities. Study of such fields during the propagation in various media and methods of their transformation, capabilities of the formation of singular light fields with initially set properties and applied aspects connected with the design of diffraction optical elements (DOE), for instance, are very important in terms of science and application in modern technologies. The new pulse in the development of this area of optics was obtained after the discovery of interconnection between the angular momentum of light fields and presence of phase singularities in them.

Majority of works in singular optics is performed in the paraxial approximation, which is widely used in modern research because it is good model for the description of laser radiation. With the development of coherent optics the experimental and theoretical papers showing that the laser can radiate the light beams, which are self-consistent in such manner that they maintain their structure during the propagation and focusing with the accuracy up to scale, have occurred. Such beams refer to the modes of laser cavities; they have strictly set shape and are described with two families of special functions with the various types of symmetry: Hermite-Gaussian and Laguerre-Gaussian beams (see



моделью для описания лазерного излучения. С развитием когерентной оптики появились экспериментальные и теоретические работы, показывающие, что лазер может излучать световые пучки, которые самосогласованы таким образом, что сохраняют свою структуру при распространении и фокусировке с точностью до масштаба. Такие пучки являются модами лазерных резонаторов, имеют жестко заданную форму и описываются двумя семействами специальных функций с различными типами симметрии: пучки Эрмита-Гаусса и Лагерра-Гаусса (рис.1). Простейшим представителем обоих семейств является гауссов пучок, поэтому пучки, построенные на его основе, часто

Fig. 1). The simplest representative of both families includes Gaussian beam, and therefore the beams constructed on its basis are commonly called generalized Gaussian beams. When propagating in free space and focusing such beams, only dimensions of transverse distribution of intensity vary, and the intensity form remains constant. The set of spherical and cylindrical lenses with the specifically selected focal distances (mode converter) allows transforming Hermite-Gaussian beams into Laguerre-Gaussian beams [1].

The scientists managed to expand the family of considered beams significantly when they thought about the construction of such light fields, the intensity distribution of which will not only vary in the scale but it will turn too. The image shape in transverse plane will be



называют обобщенными гауссовыми пучками. При распространении в свободном пространстве и фокусировке таких пучков изменяются только размеры поперечного распределения интенсивности, а форма интенсивности остается постоянной. Набор сферических и цилиндрических линз со специально подобранными фокусными расстояниями (модовый конвертор) позволяет преобразовать пучки Эрмита-Гаусса в пучки Лагерра-Гаусса [1].

Значительно расширить семейство рассматриваемых пучков удалось, когда задумались о построении таких световых полей, распределение интенсивности которых будет не только изменяться в масштабе, но и поворачиваться. Форма изображения в поперечной плоскости при этом по-прежнему будет сохраняться. Такие поля называют "вращающимися" или "спиральными". Название "спиральные пучки света" подчеркивает спиралевидный характер изменения светового поля при распространении в свободном пространстве.

Первые опубликованные работы по вращающимся световым полям относятся к 1993 году. В работе [2] проблема существования вращающихся полей теоретически исследована в общей постановке: были получены свойства спиральных пучков, характеризующие их распространение (масштаб, скорость поворота, фазовое смещение), и найдено разложение комплексной амплитуды таких пучков по модам Лагерра-Гаусса. В последующие годы разработка теории вращающихся световых полей продолжалась. Кроме того, были предложены различные варианты оптических схем для экспериментальной реализации вращающихся световых полей [3]. Следует также отметить работы [4–6], в которых рассматривались различные вопросы, связанные с вращением световых полей (перетекание энергии, орбитальный угловой момент).

ПАРАМЕТРЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И РАЗНООБРАЗИЕ ФОРМ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ

Моды Лагерра-Гаусса можно использовать как базис для разложения произвольных параксиальных световых пучков с конечной энергией. В формировании спиральных пучков участвуют только те моды, индексы которых удовлетворяют условию

$$2n + |m| + v_0 m = \text{const.}$$

maintained as before. Such fields are called "rotating" or "spiral" fields. The title "spiral light beams" emphasizes on the spiral character of variation of light field during the propagation in free space.

The first papers on rotating light fields were published in 1993. In the paper [2] the issue of existence of rotating fields was theoretically studied in general formulation: the properties of spiral beams characterizing their propagation (scale, rotation speed, phase displacement) were obtained, and the expansion of complex amplitude of such beams by Laguerre-Gaussian modes was found. In the following years, the development of the theory of rotating light fields was continued. In addition, the different variants of optical circuits for experimental implementation of rotating light fields were suggested (see review [3]). Also, the papers [4–6] should be noted because they considered different issues connected with the rotation of light fields (energy flow, orbital angular momentum).

PROPAGATION PARAMETERS AND SHAPE VARIETY OF SPIRAL BEAMS

Laguerre-Gaussian modes can be used as the basis for the expansion of arbitrary paraxial light beams with final energy. Only those modes, indexes of which meet the following condition, participate in the formation of spiral beams

$$2n + |m| + v_0 m = \text{const.}$$

Here v_0 is the parameter which defines the rotation speed of beam intensity distribution:

$$v(z) = v_0 \arctg(z/z_R),$$

where z_R is Rayleigh length. The full rotation angle of beam intensity distribution upon the evolution in free space from waist plane to Fourier plane

$$v(+\infty) - v(0) = \pi v_0 / 2.$$

If $v_0 = 0$, then upon beam propagation the intensity distribution does not turn. Laguerre-Gaussian and Hermite-Gaussian modes refer to the instances of such fields.

One of the most interesting cases is the selection $v_0 = \pm 1$ because it combines the simplicity of theoretical concept and enhanced variety of the capabilities for spiral beams construction. In particular, such option can be selected that the intensity of spiral beam will have the form of some initially set plane curve. The intensity of spiral beam in the form of square boundary is shown in Fig. 2. During the propagation of such beam its intensity rotates by $\pi/2$ radians.

Здесь v_0 – параметр, который определяет скорость поворота распределения интенсивности пучка:

$$v(z) = v_0 \arctg(z/z_R),$$

где z_R – длина Рэлея. Полный угол поворота распределения интенсивности пучка при эволюции в свободном пространстве от плоскости перетяжки до плоскости Фурье составляет

$$v(+\infty) - v(0) = \pi v_0 / 2.$$

Если $v_0 = 0$, то при распространении пучка распределение интенсивности не поворачивается. Частными случаями таких полей являются моды Лагерра-Гаусса и Эрмита-Гаусса.

Одним из наиболее интересных случаев является выбор $v_0 = \pm 1$, поскольку он сочетает в себе простоту теоретического представления и богатое разнообразие возможностей для построения спиральных пучков. В частности, можно выбрать такой вариант, что интенсивность спирального пучка будет иметь вид некоторой априорно заданной плоской кривой. На рис.2 показана интенсивность спирального пучка в форме границы квадрата. При распространении такого пучка его интенсивность поворачивается на $\pi/2$ радиан.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ

Спиральные пучки были реализованы экспериментально несколькими способами. Во-первых, непосредственно с помощью амплитудно-фазовых масок. Другой, менее очевидный метод синтеза таких пучков [3], основан на обобщении преобразования пучков Эрмита-Гаусса в пучки Лагерра-Гаусса и сводится к синтезу одномерного по структуре поля ("штрихкод"), которое преобразуется в оптической системе, показанной на рис.3, 4.

Эти пучки оказались полезны для создания высокоэффективных дифракционных фазовых элементов, позволяющих получить в плоскости фокусировки распределение интенсивности в виде априорно заданной плоской кривой (рис.5). На основе теории спиральных пучков могут быть построены фазовые элементы для фокусировки лазерного излучения с высокой эффективностью (разработан численный алгоритм). Сформированные таким образом поля

METHODS OF EXPERIMENTAL IMPLEMENTATION OF SPIRAL BEAMS

The spiral beams were implemented experimentally by several methods. First of all, with the direct assistance of amplitude-phase masks. The other, less obvious method of synthesis of such beams [3] is based on the generalization of transformation of Hermite-Gaussian beams and consists in the synthesis of the field which is one-dimensional by the structure (bar code), and which is transformed in the optical system shown in Fig. 3, 4.

These beams turned out to be useful for the creation of high-efficiency diffraction phase elements, which allow obtaining the intensity distribution in focusing plane in the form of initially set plane curve (see Fig. 5). The phase elements of laser radiation focusing with high efficiency can be constructed on the basis of the theory of spiral beams (the numerical algorithm has been developed).

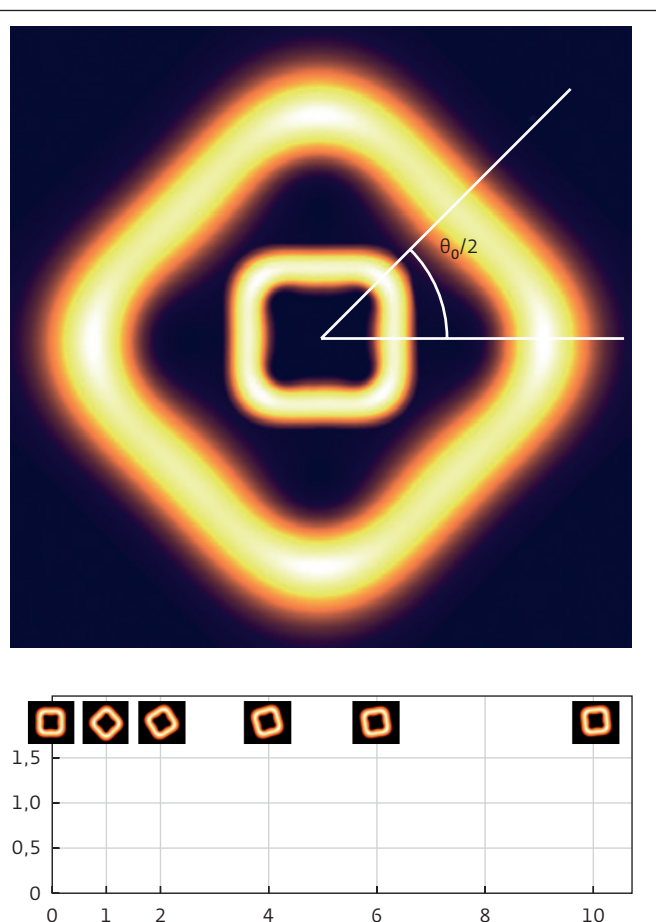


Рис.2. Эволюция распределения интенсивности спирального пучка в свободном пространстве при распространении пучка в зоне Френеля

Fig.2. Evolution of transverse intensity distribution of a spiral beam shaped like a square boundary during the beam propagation in the Fresnel diffraction zone

также являются вихревыми и обладают угловым моментом.

ОПТИЧЕСКИЙ ПИНЦЕТ

Наличие углового момента у спиральных пучков предоставляет возможность создания в области фокусировки заданных распределений интенсивности и орбитального углового момента (ОУМ), что представляет удобный инструмент для бесконтактного мани-

The fields, which were formed in such manner, are also vertical and have angular momentum.

OPTICAL TWEEZERS

The availability of angular momentum in spiral beams grants opportunity to create the set intensity distributions and orbital angular momentum (OAM) in focusing area, and this fact provides the convenient tool for contactless manipulations of microscopic objects in electronics and microbiology.

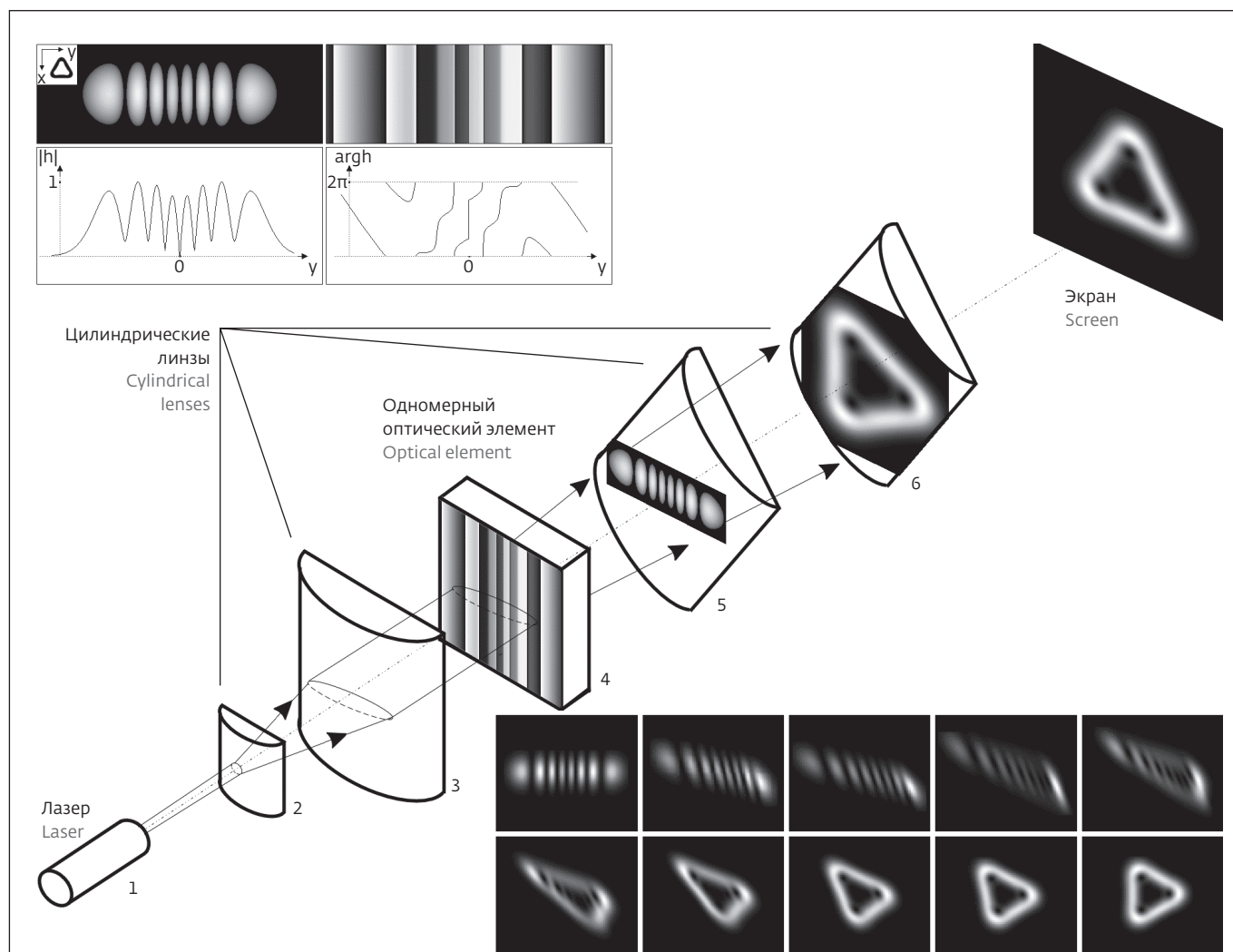


Рис.3. Оптическая схема синтеза спиральных пучков посредством одномерных по структуре оптических элементов. В верхней части рисунка показана структура амплитудно-фазового элемента для спирального пучка в форме границы треугольника. Полутоновые изображения представляют собой амплитуду и фазу распределения; графики соответствуют амплитуде и фазе одномерных распределений. В нижней части рисунка показана динамика изменения светового поля между линзами 5,6. За линзой 6 пучок форма распределения интенсивности сохраняется, поворачиваясь при распространении

Fig. 3. Optical scheme for synthesizing a spiral beam using a one-dimensional optical element. Frames at the top show the element for a spiral beam shaped like a regular triangle: grayscale frames present 2D distributions of the beam intensity and phase, the curves below correspond to their 1D sections. Frames at the bottom demonstrate a light field transformation during propagation between lenses 5 and 6. At the output of lens 6 the beam keeps its intensity structure and rotates during propagation



пулирования микрообъектами в электронике и микробиологии.

Эксперимент, позволяющий продемонстрировать возможность передачи ОУМ от светового пучка материальному телу, был проведен в 1995 году на основе так называемого оптического пинцета. Оптические пинцеты используют жестко сфокусированные пучки света для захвата микроскопических частиц в трех измерениях внутри окружающей их жидкости. Манипуляция микроскопическими объектами с помощью оптических пинцетов в настоящее время превратилась в индустрию коммерческого производства пространственных модуляторов света, которые способны генерировать оптические ловушки произвольной формы.

Способность спиральных пучков сохранять форму распределения интенсивности при распространении пучка оказалась полезной и при решении других задач. В 2014 году Нобелевская премия по химии была присуждена Э.Бетцигу, Ш.Хеллю и У.Мернеру "за развитие методов флуоресцентной микроскопии сверхвысокого разрешения" [8]. Один из этих методов, который позволяет преодолеть классический дифракционный предел и определить пространствен-

The experiment, which allows demonstrating the capability of OAM transmission from light beam to material body, was carried out in 1995 on the basis of so-called optical tweezers. Optical tweezers use strictly focused light beams for the capture of microscopic particles in three dimensions inside surrounding liquid. At the present time, manipulation of microscopic objects by means of optical tweezers has turned into the industry of commercial production of spatial light modulators, which are capable to generate the optical traps with arbitrary shape.

Capability of spiral beams to maintain the form of intensity distribution during the propagation turned out to be useful even when solving other tasks. In 2014, E. Betzig, S. Hell and W. Moerner were awarded the Nobel Prize in chemistry "for the development of super-resolved fluorescence microscopy" [8]. One of these methods, which allows moving beyond the classic diffraction limit and determining the spatial coordinates of radiators, is based on the use of spiral beams [9].

THREE-DIMENSIONAL LOCALIZATION OF RADIATORS

In the tasks of optical microscopy, the light source includes luminescent molecules, dimensions of which are much lower than the wavelength. Opportunity to

ные координаты излучателей, основан на использовании спиральных пучков [9].

ТРЕХМЕРНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В задачах оптической микроскопии источником света являются люминесцентные молекулы, размеры которых намного меньше длины волны. Возможность наблюдения таких частиц с помощью фокусирующей оптики ограничена дифракционным пределом: примерно равным длине волны регистрируемого изображения. Аппроксимация зарегистрированного изображения гауссовым пучком позволяет получить только поперечные координаты точечного источника, третья координата – глубина залегания источника в пленке – остается неизвестной. Кроме того, если пленка достаточно толстая, то на детектор попадает расходящийся световой пучок, и восстановить координаты с приемлемой точностью уже невозможно. Решение этой задачи было предложено коллективом сотрудников, в который входит нобелевский лауреат 2014 года Мернер. Излучение источника можно преобразовать с помощью фазовой маски в двухлепестковое изображение, распределение интенсивности которого будет поворачиваться в поперечной плоскости по мере движения источника. Регистрируя с помощью двумерного детектора эти изображения, по углу поворота распределения интенсивности можно определить глубину залегания точечного источника в пленке. Появляется возможность опре-

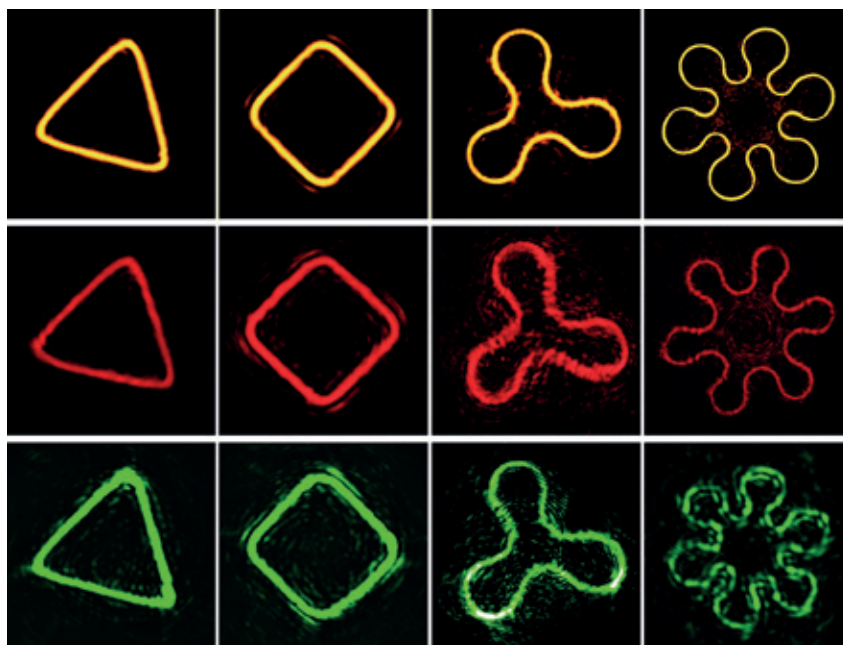


Рис. 4. На основе теории спиральных пучков были построены фазовые элементы для фокусировки лазерного излучения с высокой эффективностью. Сформированные таким образом поля также являются вихревыми и обладают угловым моментом. Показано распределение интенсивности полей, сформированных с помощью фазовых элементов, в плоскости фокусировки. Верхний ряд – поля получены численно, второй и третий – экспериментально
Fig. 4. Spiral beams theory provides a theoretical base for construction of phase elements focusing a Gaussian beam irradiation into a predetermined planar curve. The elements effectiveness is very high. Resulting light fields are vortical ones and have a nonzero orbital angular momentum. For some planar curves the distribution of the field intensities in the focal region is shown (top – theory, middle – numerical simulation, bottom – experiment)

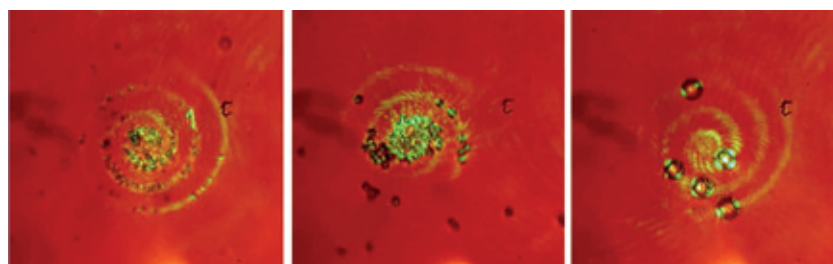


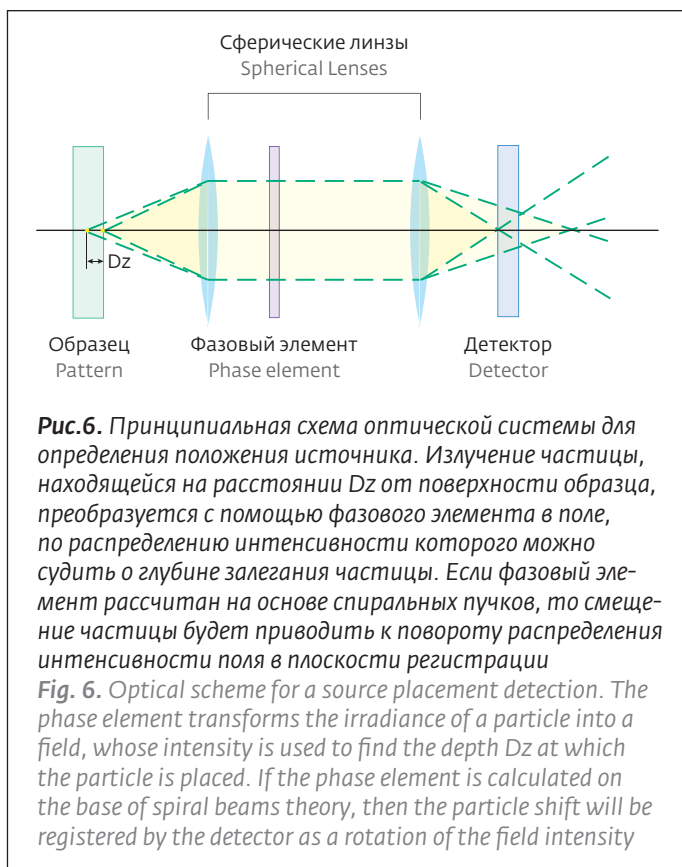
Рис. 5. Перемещение частиц латекса вдоль заданной кривой под действием лазерного излучения. Частицы латекса микронных размеров (0,46 мкм, 1,2 мкм и 3,2 мкм) освещаются жестко сфокусированным спиральным пучком в форме спирали Архимеда. В зависимости от знака параметра вращения пучок работает как пылесос (собирает частицы в центре), или как вентилятор (очищая центр)
Fig. 5. Motion of latex microparticles along a predetermined curve by a laser irradiance illumination. Microparticles with a size of 0.46 mkm, 1.2 mkm and 3.2 mkm (left to right) are illuminated by a strong focused spiral beam shaped like an Archimedean spiral. Depending on the sign of the rotation parameter of the beam, its influence on the particles is similar to an action of a vacuum cleaner (particles are gathered into a central pile) or a fan (particles are thrown away the center)

делить пространственное положение молекул в тонкой пленке и посмотреть спектр каждой из этих молекул (рис.6). Все это можно сделать с помощью спиральных пучков, угол поворота распределения интенсивности которых при распространении пучка достаточно большой (например, π радиан) [10].

Существование световых полей, распределение интенсивности которых поворачивается на угол больше прямого – само по себе необычно (рис.7). Поворот распределения интенсивности на прямой угол мы можем себе объяснить с помощью геометрической оптики. Но можно представить себе, по крайней мере с помощью математики, пучки, в которых этот поворот больше, чем $\pi/2$ (например, π). Такой поворот необъясним с точки зрения геометрической оптики, он является более сложным и происходит за счет интерференции определенных областей друг с другом. Этот результат представляет интерес не только с прикладной, но и с фундаментальной точки зрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. E.Abramochkin and V.Volostnikov. Beam transformations and nontransformed beams. –



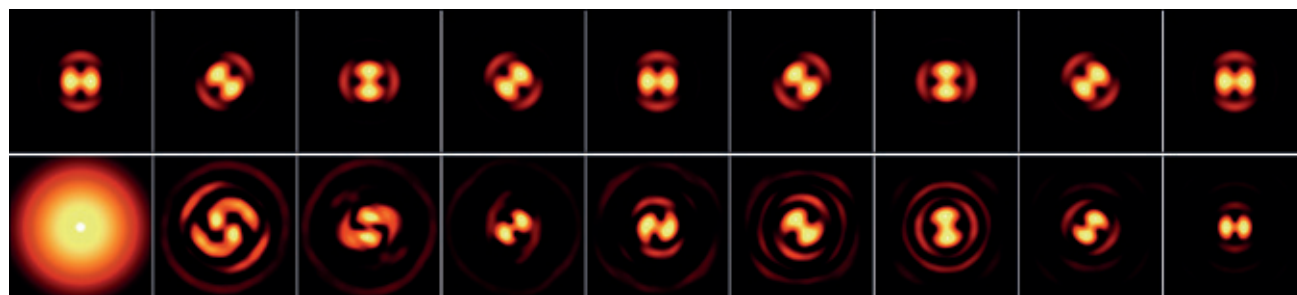


Рис.7. Эволюция распределения интенсивности спирального пучка и пучка, сформированного с помощью фазового элемента, при распространении в зоне Френеля

Fig. 7. Transformation of intensity distributions of a spiral beam (top) and a Gaussian beam with the spiral beam phase component (bottom) during propagation in the Fresnel zone

- Optics Comm., 1991, v.83, № 1-2, p.123-135.
2. **Е.Абрамочкин and В.Волостников.** Spiral-type beams. – Optics Comm., 1993, v.102, № 3-4, p.336-350.
 3. **Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников.** Спиральные пучки света. – Успехи физ. наук, 2004, т. 174, № 12, с. 1273-1300.
 4. **G. Indebetouw.** Optical vortices and their propagation. – J. Mod. Optics, 1993, v.40, p. 73-87.
 5. **А.Я. Бекшаев, М.С. Soskin, М.В. Vasnetsov.** Centrifugal transformation of the transverse structure of freely propagating paraxial light beams. – Optics Letters, 2006, v.31, № 6, p. 694-696.
 6. **А. Бекшаев, М. Soskin.** Rotational transformations and transverse energy flow in paraxial light beams: linear azimuthons. – Optics Letters, 2006, v.31, № 14, p. 2199-2201.
 7. **Т. Alieva, Е. Abramochkin, А. Asenjo-Garcia, Е. Razueva.** Rotating beams in isotropic optical system. – Optics Express, 2010, v.18, № 4, p. 3568-3573.
 8. **А.В. Наумов.** Спектроскопия органических молекул в твердых матрицах при низких температурах: от эффекта Шпольского к лазерной люминесцентной спектроскопии всех эффективно излучающих одиночных молекул. – Успехи физ. наук, 2013, т. 56, № 6, с. 633-652.
 9. **S.R.P. Pavani, R. Piestun.** High-efficiency rotating point spread functions. – Optics Express., 2008, v.16, № 5, p. 3484-3489.
 10. **Е.В. Razueva, Е.Г. Abramochkin.** Fast rotating spiral light beams. – Proc. of XII Int. Workshop on Quantum Optics (IWQO-2015) (Moscow, Troitsk, August 11-16, 2015), ID 10011 (2 pp.).

observe such particles by means of focusing optics is limited by diffraction limit: approximately 1/2 of the wavelength of recorded image. Approximations of recorded image by Gaussian beam allow obtaining only transverse coordinates of point source, the third coordinate – depth of source location in film – remains unknown. In addition, if the film is not sufficiently thick then the divergent light beam gets on the detector, and it is impossible to restore coordinates with the acceptable accuracy. The solution of this task was suggested by the team of employees which included Moerner, the Nobel Prize Laureate of 2014. The source radiation can be transformed by means of phase mask into bidirectional image, the intensity distribution of which will be rotated in transverse plane according to the source movement. Recording these images by means of two-dimensional detector, the depth of point source location in film can be determined on the basis of rotation angle. The opportunity to determine the spatial position of molecules in thin film and see the spectrum of each molecule occurs (Fig.6). All these actions can be performed by means of the spiral beams, the rotation angle of intensity distribution of which is sufficiently high during the beam propagation (for example, π radians) [10].

Existence of light fields, the intensity distribution of which turns by the angle which is higher than right angle, is unusual by itself (Fig.7). We can explain the turn of intensity distribution by the right angle with the help of geometrical optics. But at least using the mathematics, we can imagine the beams, in which this turning angle is higher than $\pi/2$ (for example, π). Such turn is unexplainable from the point of view of geometrical optics; it is more complex and occurs at the expense of interference of certain regions with each other. This result is of interest not only from the applied point of view but also from the fundamental point of view.