



# Фазовые дифракционные оптические элементы с повышенной эффективностью для наноскопии

Д. В. Прокопова<sup>1,2</sup>, С. П. Котова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский филиал ФИАН, Самара, Россия

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, Самара, Россия

Представлены результаты исследований по созданию фазовых дифракционных элементов, формирующих световые поля, в распределении интенсивности которых наблюдаются два главных максимума, вращающиеся при фокусировке и распространении. Их получение основано на оптике спиральных пучков света. Такие оптические элементы можно использовать для модификации функции рассеяния точки оптического флуоресцентного микроскопа с целью создания наноскопа – устройства, позволяющего проводить трехмерную локализацию излучающих объектов с нанометровой точностью.

**Ключевые слова:** наноскопия, спиральные пучки света, aberrации, фазовый дифракционный оптический элемент, дифракционная эффективность

Статья получена: 28.01.2020

Принята к публикации: 10.02.2020

## ВВЕДЕНИЕ

Люминесцентная трехмерная локализационная микроскопия сверхвысокого разрешения – удобный инструмент для исследования процессов диполь-дипольного взаимодействия между близко расположенными одиночными молекулами [1]; статистики фотонов излучения отдельных молекул и их малых ансамблей [2]; процессов безызлуча-

# Phase Diffraction Optical Elements with Enhanced Efficiency for Nanoscopy

D. V. Prokopova<sup>1,2</sup>, S. P. Kotova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lebedev Physical Institute, Samara, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara

This paper summarizes the studies on creation of the special phase diffraction elements. These elements can be used for forming the light fields with two maxima in the intensity distribution and with the ability to rotate during focusing and propagation. The diffraction optical elements are based on the optics of spiral light beams and can be used to modify the point spread function of an optical fluorescence microscope to create a nanoscope, i.e. a device that allows the three-dimensional localization of emitting objects with nanometer accuracy

**Keywords:** nanoscopy, spiral light beams, aberrations, phase diffractive optical element, diffraction efficiency

Received: 28.01.2020

Accepted: 10.02.2020

## INTRODUCTION

The super-resolution luminescent three-dimensional localization microscopy is a convenient tool for studying the processes of the dipole-dipole interaction between closely spaced single molecules [1]; of statistical data accumulation about the radiation photons of individual molecules and their small ensembles [2]; as well as for studying of non-radiative energy transfer processes [3, 4]; surface, near-surface and interface effects [5]; sensing and mapping of local fields [6, 7], low-temperature oscillating dynamics [8]; tracking single emitting nanoparticles in porous nanomaterials [9] and also for solving many other problems in the field of biology, medicine, materials science, spectroscopy of single molecules [10]. The principle of the method consists in the excitation by

тельного переноса энергии [3, 4]; поверхностных, приповерхностных и интерфейсных эффектов [5]; зондирования и картирования локальных полей [6, 7], низкотемпературной колебательной динамики [8]; трекинга одиночных излучающих наночастиц в пористых наноматериалах [9] и для решения множества других задач в области биологии, медицины, материаловедения, спектроскопии одиночных молекул [10]. Принцип работы метода заключается в возбуждении внешним излучением флуоресцентных меток (молекул, квантовых точек и др.), находящихся в исследуемом образце, сборе излучения от этих меток и последующей обработке полученных изображений. Нобелевская премия 2014 года по химии присуждена Э.Бетцигу (Eric Betzig), Ш.Хеллу (Stefan W. Hell), и У.Мёрнеру (William E. Moerner) за разработку методов флуоресцентной микроскопии высокого разрешения, позволившей достичь разрешения до 1 нм в поперечном направлении [11,12]. Для увеличения пространственного разрешения флуоресцентных оптических микроскопов в продольном направлении (вдоль оси Z) предложен ряд методов [13]. Один из них заключается в модификации функции рассеяния точки (ФРТ) оптической системы микроскопа таким образом, чтобы при изменении расстояния между микрообъективом и образцом вид изображения точечного источника менялся [14–18]. В ходе последующей обработки полученных изображений можно с высокой точностью определить положение объекта в трехмерном пространстве. Модификация ФРТ заключается в превращении пятна Эйри (рис. 1 а нижний ряд), например, в двухлепестковое изображение, два главных максимума в котором поворачиваются при дефокусировке (double-helix point spread function, DHPSF) (рис. 1b нижний ряд) [19–21]. Метод удобен тем, что для превращения флуоресцентного микроскопа в микроскоп с трехмерной локализацией точечных излучателей, в схему необходимо добавить лишь небольшое количество оптических элементов. На рис. 1 изображена принципиальная схема классического микроскопа и микроскопа с модифицированной ФРТ. Главным элементом для изменения формируемого системой изображения является фазовый дифракционный оптический элемент (ДОЭ) (рис. 1 б), производящий преобразование падающего на него пучка в поле, в распределении интенсивности которого наблюдаются два главных максимума, вращающиеся при фокусировке и распространении (двухлепестковое поле). ДОЭ могут быть реализованы как на стационарных масках, так и с помощью управ-

the external radiation of fluorescent labels (molecules, quantum oscillating dots, etc.) located in the test sample, in the collection of radiation from these labels, and the subsequent processing of the obtained images. The 2014 Nobel Prize in Chemistry was awarded to Eric Betzig, Stefan W. Hell, and William E. Moerner for their development of high-resolution fluorescence microscopy methods, which allowed them to achieve resolutions up to 1 nm in transverse direction [11, 12]. A number of methods have been proposed [13] to increase the spatial resolution of fluorescence optical microscopes in longitudinal direction (along the Z axis). One of them consists in modifying the point spread function (PSF) of the microscope optical system, so that to change the image of the point source when the distance between the micro-lens and the sample changes accordingly [14–18]. During the further processing of the obtained images it becomes possible to determine with high accuracy the location of the object in three-dimensional space. The PSF-modification consists in the Airy spot transformation (Fig. 1, a lower line), for example into a two-lobe image, where the two main maxima rotate during defocusing (double-helix point spread function, DHPSF) (Fig. 1 b, lower line) [19–21]. The method is suitable also because only a small number of optical elements is to be added to the set-up, in order to convert a fluorescence microscope into the one with three-dimensional localization of point emitters. Fig. 1 shows a schematic diagram of a classical microscope and microscope with a modified PSF. The main element used for changing the image generated by the image system is a phase diffraction optical element (DOE) (Fig. 1b), which converts the incident beam into a field with two main maxima in the intensity distribution that rotate during focusing and propagation (two-lobe field). The DOEs can be implemented both on stationary masks and using controllable devices, such as multi-pixel liquid crystal spatial light modulators (LC SLM). A mean of formation of field under consideration by modified liquid crystal focusing device of modal type is considered in paper [22].

At the Samara Branch of the Lebedev Physical Institute, comprehensive studies were carried out on the creation of phase diffraction elements based on the optics of spiral light beams [23–25], which convert the incident radiation into a two-lobe field. This review presents the main results obtained in the development of phase DOEs optimized for working with high-aperture micro objective.

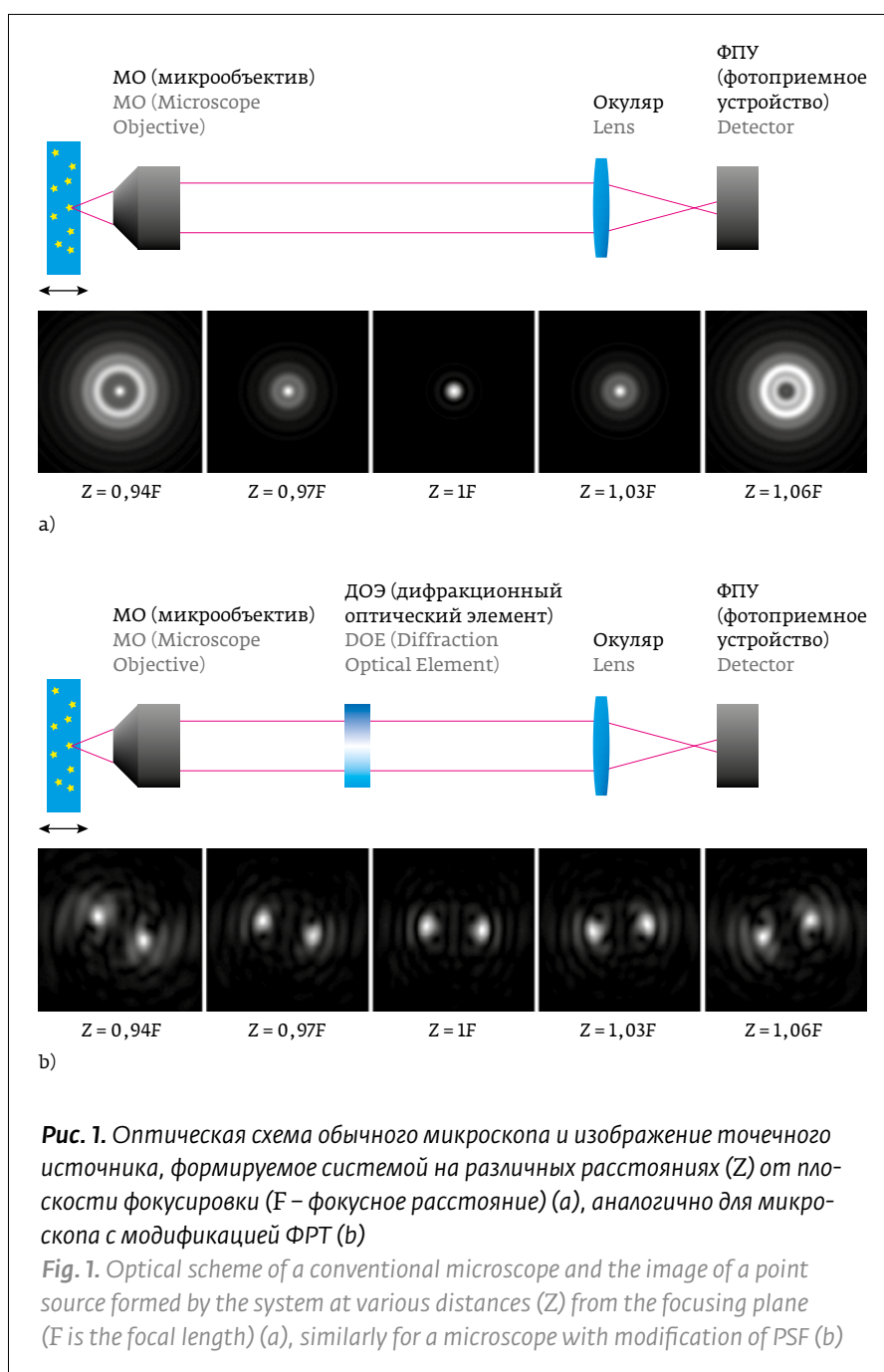
ляемых устройств, таких как многопиксельные жидкокристаллические пространственные модуляторы света (ЖК ПМС). В работе [22] предложен вариант формирования рассматриваемых полей модифицированным жидкокристаллическим фокусатором модального типа.

В Самарском филиале ФИАН были выполнены комплексные исследования по созданию на основе оптики спиральных пучков света [23–25] фазовых дифракционных элементов, преобразующих падающее излучение в двухлепестковое поле. В данной обзорной работе представлены основные полученные результаты по разработке фазовых ДОЭ, оптимизированных для работы со светосильными микробиоъективами.

### ДВУХЛЕПЕСТКОВЫЕ СПИРАЛЬНЫЕ ПУЧКИ СВЕТА

Спиральные пучки света [23–25] – это особый класс световых полей, сохраняющих заданную структуру распределения интенсивности при распространении в пространстве и фокусировке за исключением масштаба и поворота. Они имеют ненулевой орбитальный угловой момент. Спиральные пучки света находят свое применение в оптической манипуляции [26], в системах квантовой передачи информации [27]. На основе математического формализма спиральных пучков разработан новый метод распознавания и анализа контурных изображений [28]. Здесь рассмотрено их приложение в задаче увеличения продольного разрешения флуоресцентных оптических микроскопов.

Спиральные пучки характеризуются параметром поворота  $\theta_0$ , определяющим на какой угол  $\Theta$  повернется распределение интенсивности при распространении от ближней до дальней зоны дифракции:  $\Theta = \theta_0 \frac{\pi}{2}$ . Они могут иметь различные формы распределения интенсивности: в виде



**Рис. 1.** Оптическая схема обычного микроскопа и изображение точечного источника, формируемое системой на различных расстояниях ( $Z$ ) от плоскости фокусировки ( $F$  – фокусное расстояние) (а), аналогично для микроскопа с модификацией ФРТ (б)

**Fig. 1.** Optical scheme of a conventional microscope and the image of a point source formed by the system at various distances ( $Z$ ) from the focusing plane ( $F$  is the focal length) (a), similarly for a microscope with modification of PSF (b)

### TWO-LOBE SPIRAL LIGHT BEAMS

The spiral light beams [23–25] mean a special class of light fields that maintains a given structure of the intensity distribution while propagating in space and focusing, with the exception of scale and rotation. These fields have a nonzero orbital angular momentum. The spiral light beams find their application in optical manipulation [26], in systems for the quantum information transmission [27]. Based on the mathematical formalism of spiral beams, a new method for the recognition and analysis of contour

ансамбля пятен, замкнутых и разомкнутых кривых, областей заданной формы. Для увеличения продольного разрешения микроскопа представляют интерес двухлепестковые спиральные пучки, распределение интенсивности которых имеет вид пары пятен (главных максимумов), вращающихся вокруг общего центра. Спиральные пучки света можно получать с помощью различных методов. Моды Эрмита-Гаусса и Лагерра-Гаусса (собственные колебания лазерных резонаторов) являются частными случаями спиральных пучков с нулевым вращением интенсивности. Было показано [24], что спиральный пучок можно представить в виде разложения по модам Лагерра-Гаусса

$$F(x,y) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{nm} LG_{n,m} \left( \frac{x}{\rho}, \frac{y}{\rho} \right), \quad (1)$$

индексы которых удовлетворяют условию

$$2n + |m| + \theta_0 m = \text{const}, \quad (2)$$

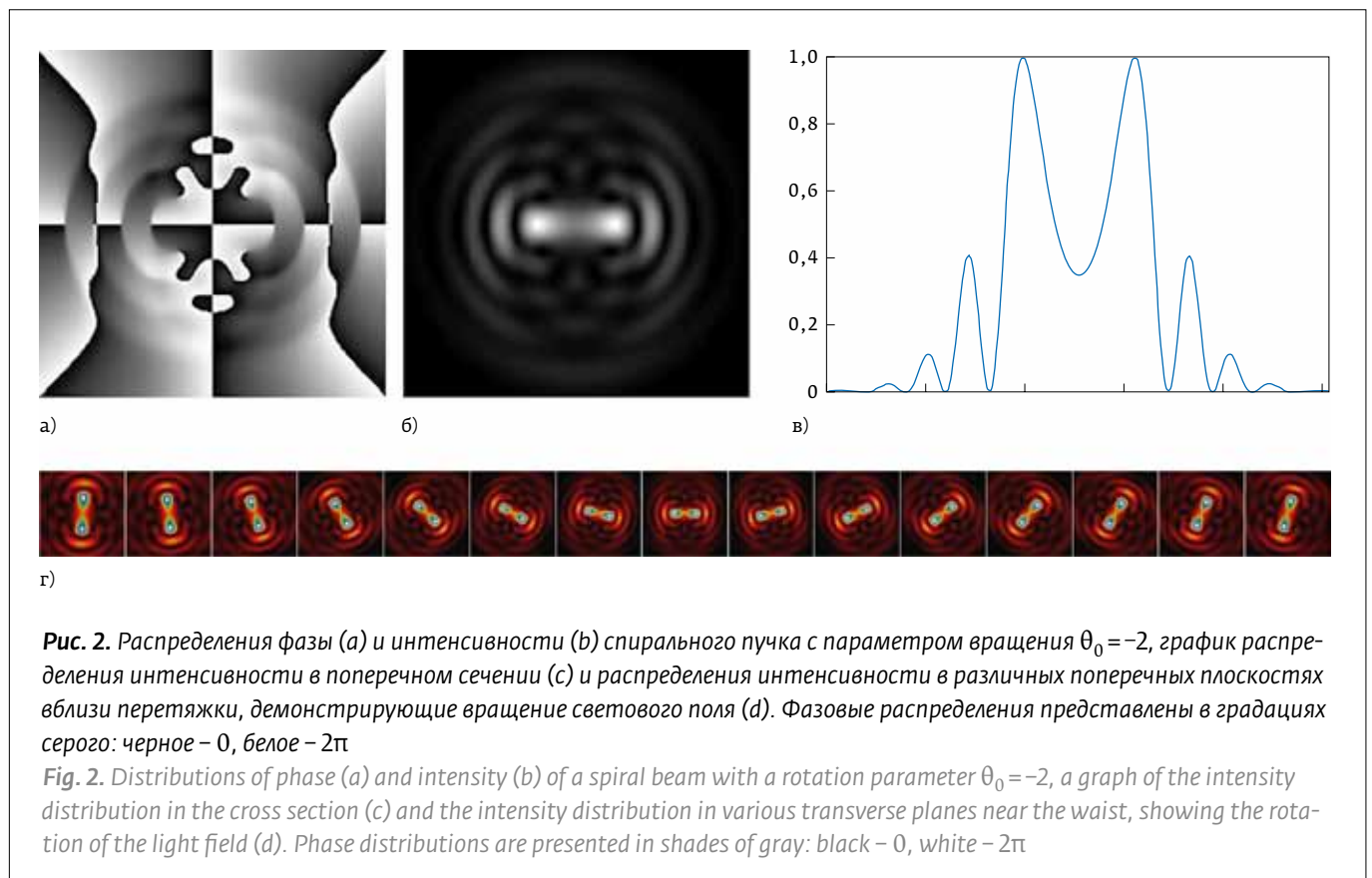
$\rho$  – параметр поперечного размера пучка.

Выбирая значение параметра вращения пучка  $\theta_0$ , можно задать скорость вращения пучка и определить его функциональный вид. Распреде-

images has been developed [28]. Within our review we consider their application for the problem of increase of the longitudinal resolution in fluorescence optical microscopes.

Spiral beams are characterized by a rotation parameter  $\theta_0$ , which determines the angle of rotation of the intensity distribution when propagating from the near to far diffraction zones:  $\Theta = \theta_0(\pi/2)$ . They can have various forms of the intensity distribution, such as a cluster of spots, closed and open curves, and regions of a given shape. The two-lobe spiral beams with the intensity distribution having the form of a pair of spots (main maxima) rotating around a common center, are especially suitable where the increase in the longitudinal resolution of the microscope is required. The spiral light beams can be obtained by means of various methods. The Hermite-Gauss and Laguerre-Gauss modes (i.e. natural oscillations of laser resonators) are particular cases of spiral beams with zero intensity rotation. It was shown in [24] that the spiral beam can be represented as a Laguerre-Gauss decomposition

$$F(x,y) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{nm} LG_{n,m} \left( \frac{x}{\rho}, \frac{y}{\rho} \right), \quad (1)$$



ления интенсивности и фазы спирального пучка с параметром вращения  $\theta_0 = -2$ , описываемого выражением

$$F = LG_{0,0} + LG_{1,2} + LG_{2,4} + LG_{3,6} + LG_{4,8}, \quad (3)$$

показаны на рис. 2 [29].

Суперпозиция мод Лагерра-Гаусса:

$$F = LG_{0,0} + LG_{3,2} + LG_{6,6} \quad (4)$$

является спиральным пучком с параметром вращения  $\theta_0 = -4$ . Распределения фазы и интенсивности показаны на рис. 3 [30].

На рис. 4 представлены зависимости угла поворота распределения интенсивности двухлепестковых спиральных пучков с различными параметрами  $\theta_0$  от расстояния в области фокусировки (фокусное расстояние линзы равнялось  $F = 300$  мм).

В работах [31–33] предложен другой подход построения спиральных пучков, который является весьма привлекательным для дальнейшего исследования. В нем распределение интенсивности поля зависит только от выбора подынтегральной функции, а величина параметра вращения  $\theta_0$  определяется видом аргумента этой функции.

В этом случае можно получить поле с заданными характеристиками сразу, не перебирая суперпозиции мод (1) и подбирая для них весовые коэффициенты.

Итак, двухлепестковые спиральные пучки, поворачивающиеся при распространении, позволяют установить однозначную связь между углом поворота распределения интенсивности и продольным положением источника излучения. Однако из-за необходимости задания амплитуды пучка, например, с помощью поглощающей амплитудной маски, их формирование энергетически малоэффективно. В частности, для спирального пучка, представленного на рис. 2, лишь 5% падающего на маску светового потока остается в пучке. Поэтому был проведен цикл исследований по формированию двухлепестко-

whose indices satisfy the condition

$$2n + |m| + \theta_0 m = \text{const}, \quad (2)$$

$\rho$  is the transverse beam size.

By choosing the value of the beam rotation parameter  $\theta_0$ , we can set the beam rotation speed and determine its functional form. The intensity and phase distributions of the spiral beam with the rotation parameter  $\theta_0 = -2$  described by the expression

$$F = LG_{0,0} + LG_{1,2} + LG_{2,4} + LG_{3,6} + LG_{4,8}, \quad (3)$$

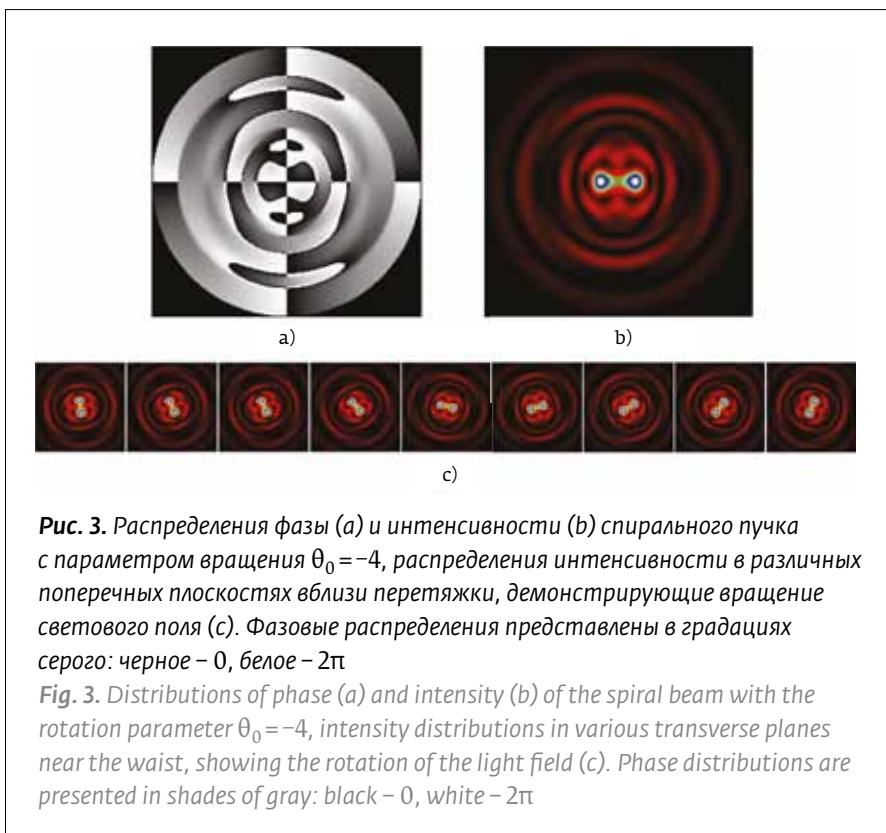
are shown in fig. 2 [29].

Superposition of Laguerre – Gauss modes:

$$F = LG_{0,0} + LG_{3,2} + LG_{6,6} \quad (4)$$

is a spiral beam with a rotation parameter  $\theta_0 = -4$ . The phase and intensity distributions are shown in Fig. 3 [30].

Fig. 4 shows the dependences of the rotation angle of the intensity distribution of two-lobe spiral beams with various parameters  $\theta_0$  on the distance in the focusing region (the focal length of the lens was  $F = 300$  mm).



**Рис. 3.** Распределения фазы (а) и интенсивности (б) спирального пучка с параметром вращения  $\theta_0 = -4$ , распределения интенсивности в различных поперечных плоскостях вблизи перетяжки, демонстрирующие вращение светового поля (с). Фазовые распределения представлены в градациях серого: черное – 0, белое –  $2\pi$

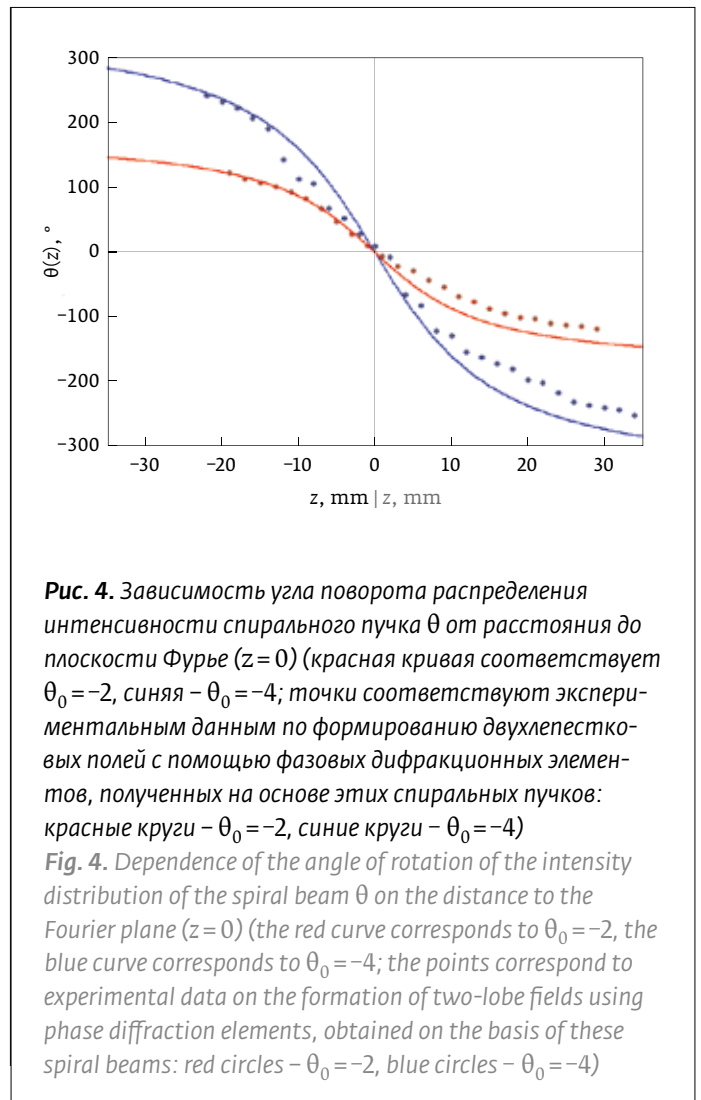
**Fig. 3.** Distributions of phase (a) and intensity (b) of the spiral beam with the rotation parameter  $\theta_0 = -4$ , intensity distributions in various transverse planes near the waist, showing the rotation of the light field (c). Phase distributions are presented in shades of gray: black – 0, white –  $2\pi$

вых световых полей только с помощью фазовых ДОЭ, профиль которых задавался фазовым распределением найденных спиральных пучков. При этом световые поля остаются структурно устойчивыми в ограниченной части пространства (рис. 4).

### СОЗДАНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ДВУХЛЕПЕСТКОВОГО СПИРАЛЬНОГО ПУЧКА

С помощью численного моделирования были исследованы световые поля, сформированные масками, фазовое пропускание которых задается фазовым распределением спиральных пучков. Освещающий пучок предполагался однородным по интенсивности. Как видно из рис. 4, распределение светового поля в виде двух вращающихся максимумов сохраняется в значительной области пространства вблизи перетяжки. Энергетическая эффективность формирования, под которой понимается отношение энергии, локализованной вблизи главных максимумов интенсивности, ко всей энергии в плоскости регистрации, находится в диапазоне от 15 до 32%. Таким образом, используя фазовые распределения спиральных пучков, можно получить требуемое преобразование светового поля. Однако, при работе с одиночными источниками, когда для формирования изображения важен каждый фотон, необходимы методы, формирующие световые поля с большей эффективностью. Она может быть увеличена за счет изменения фазовой структуры маски с помощью итерационной процедуры.

При помощи модифицированного алгоритма Герчберга-Секстона были получены дифракционные элементы, обладающие эффективностью более 60%. Подробно алгоритм расчета описан в работе [29]. На рис. 5а представлен фазовый профиль ДОЭ, полученный в результате работы итерационной процедуры, начальным приближением которой являлось распределение фазы спирального пучка с  $\theta_0 = -2$  (рис. 2а). Расчетные в плоскости Фурье и экспериментально полученные распределения интенсивности в области фокусировки показаны на рисунках 5б и 5с. В экспериментах фазовые элементы для генерации двухлепестковых световых полей формировались при помощи ЖК-модулятора света Нолеуе НЕО-1080Р со следующими характеристиками: разрешение  $1920 \times 1080$  пикселей, разрядность 8 бит – 256 уровней серого для фазового преобразования, 60%-отражение в 0-й порядок дифракции.



**Рис. 4.** Зависимость угла поворота распределения интенсивности спирального пучка  $\theta$  от расстояния до плоскости Фурье ( $z=0$ ) (красная кривая соответствует  $\theta_0=-2$ , синяя –  $\theta_0=-4$ ; точки соответствуют экспериментальным данным по формированию двухлепестковых полей с помощью фазовых дифракционных элементов, полученных на основе этих спиральных пучков: красные круги –  $\theta_0=-2$ , синие круги –  $\theta_0=-4$ )

**Fig. 4.** Dependence of the angle of rotation of the intensity distribution of the spiral beam  $\theta$  on the distance to the Fourier plane ( $z=0$ ) (the red curve corresponds to  $\theta_0=-2$ , the blue curve corresponds to  $\theta_0=-4$ ; the points correspond to experimental data on the formation of two-lobe fields using phase diffraction elements, obtained on the basis of these spiral beams: red circles –  $\theta_0=-2$ , blue circles –  $\theta_0=-4$ )

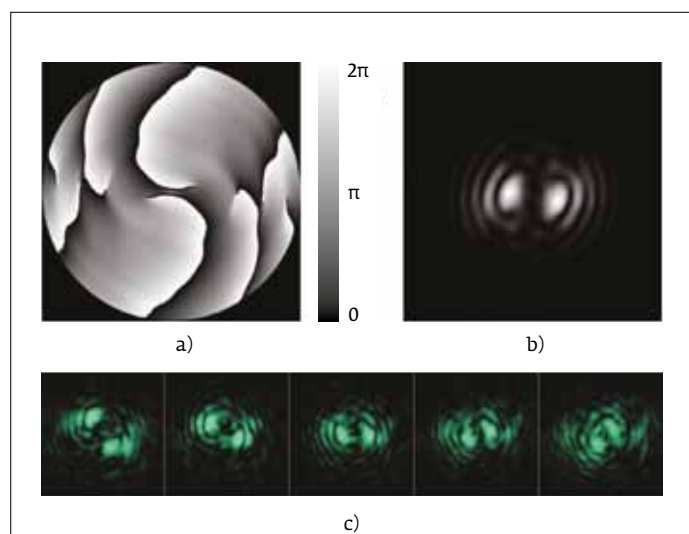
In papers [31–33], another approach was proposed for the spiral beams construction, which seems rather attractive for further researches. In it, the distribution of the field intensity depends only on the choice of the integrand, and the value of the rotation parameter  $\theta_0$  is determined by the form of the argument of this function. In this case, it is possible to obtain a field with given characteristics immediately, without sorting through the superposition of modes (1) and selecting weight coefficients for them.

Thus, the two-lobe spiral beams rotating during their propagation make it possible to establish an unambiguous relationship between the angle of rotation of the intensity distribution and the longitudinal position of the radiation source. However, since it is necessary to set the beam amplitudes, for example by means of an absorbing amplitude mask, the formation of this type beams is energetically inefficient. In particular, for the spiral beam shown

Модулятор освещался коллимированным пучком твердотельного лазера с  $\lambda=532$  нм. Для наблюдения поворота распределения интенсивности к фазовому распределению ДОЭ добавлялась положительная линза. Измерения сформированных полей проводились вблизи фокальной плоскости этой линзы, где угол поворота распределения интенсивности быстрее всего меняется с изменением расстояния (рис. 4).

### УЧЕТ ИСКАЖЕНИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАБОТУ ДОЭ

Условия формирования двухлепестковых световых полей в реальной оптической системе микроскопа могут отличаться от условий, используемых для расчета и создания фильтра. Нами была проведена серия исследований, связанных с анализом влияния амплитудных и фазовых искажений регулярного и хаотического характера на формирование двухлепесткового поля [34–36]. Перечислим наиболее важные для практической работы результаты, полученные в ходе моделирования и экспериментов.



**Рис. 5.** Результат работы алгоритма после 6 итераций: а) распределение фазы ДОЭ; б) расчетное распределение интенсивности в плоскости Фурье; в) экспериментально полученные распределения интенсивности в области фокусировки (фазовое распределение представлено в градациях серого: черное – 0, белое –  $2\pi$ )

**Fig. 5.** Result of the algorithm after 6 iterations: a) distribution of the DOE phase; b) the calculated intensity distribution in the Fourier plane; c) experimentally obtained intensity distributions in the focusing region (the phase distribution is presented in gray gradations: black – 0, white –  $2\pi$ )

in Fig. 2, only 5% of the light beam falling on the mask remains inside the beam. That's why a series of studies was carried out on the formation of the two-lobe light fields by means of only those phase DOEs, whose profile was determined by the phase distribution of the found spiral beams. Meanwhile, the light fields remain structurally stable in a limited part of space (Fig. 4).

### CREATING A DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT BASED ON A TWO-LOBE SPIRAL BEAM

Numerical modeling was used to study the light fields formed by masks whose phase transmission was determined by the phase distribution of spiral beams. The illuminating beam was assumed to be uniform in intensity. As can be seen from Fig. 4, the distribution of the light field in the form of the two rotating maxima remains in a significant portion of space near the waist. The energy efficiency of formation, which is understood as the ratio of the energy localized near the main intensity maxima to the total energy in the registration plane ranges from 15 to 32%. Thus, using the phase distributions of spiral beams, one can obtain the required transformation of the light field. However, when working with single sources, where each photon is important for the image formation, the methods with greater efficiency are needed for the light fields generation. The efficiency can be increased by changing the phase structure of the mask through an iterative procedure.

Using a modified Herchberg-Sexton algorithm, the diffraction elements having an efficiency of more than 60% have been obtained. The calculation algorithm is described in detail in [29]. Fig. 5a shows the phase profile of the DOE obtained as a result of the iterative procedure, where the initial approximation was the distribution of the spiral beam phase with  $\theta_0=-2$  (Fig. 2a). The intensity distributions, both the one calculated in the Fourier plane, and experimentally obtained one in the focusing region are shown in Figs. 5b and 5c. In the experiments, the phase elements for generating the two-lobe light fields were formed using a Holoeye HEO-1080P LCD light modulator with the following characteristics: resolution of  $1920 \times 1080$  pixels, 8-bit resolution – 256 gray levels for phase conversion, 60% reflection to zero order diffraction. The modulator was illuminated by a collimated beam of a solid-state laser with  $\lambda = 532$  nm. To observe the rotation of the intensity distribution, a positive lens was added to the DOE phase distribution. The measurements of the formed fields were carried out near the focal plane of this lens, where the rotation

Установлены следующие требования к распределению интенсивности освещающего фазовый элемент пучка. Ширина пучка должна быть  $\geq 0,8$  диаметра фазового элемента. Допустимое отклонение центра освещающего пучка относительно центра ДОЭ менее 20% от ширины освещающего пучка [35].

Рассмотрен случай, когда часть пикселей модулятора или маски являются недействующими. Найдено, что допустимая площадь таких элементов не должна превышать 10% от площади фазового элемента (рис. 6) [36]. При этом генерируемое поле практически не отличается от поля, сформированного идеальным фазовым элементом (все пиксели исправны). Допустимые отклонения глубины фазовой модуляции от  $2\pi$  лежат в интервале от -10% до +20%.

Проведен также ряд экспериментов, посвященных исследованию влияния aberrаций, представленных в виде полиномов Цернике в соответствии с нормировкой стандартов OSA (комы, астигматизма и сферической aberrации) на исследуемые поля [34, 35]. Установлено, что при величине сферической aberrации  $\lambda/16$ , комы  $\lambda/16$  и астигматизма  $\lambda/8$  из распределения интенсивности исследуемых световых полей с вращением ещё можно извлечь информацию об угловом положении максимумов распределения интенсивности.

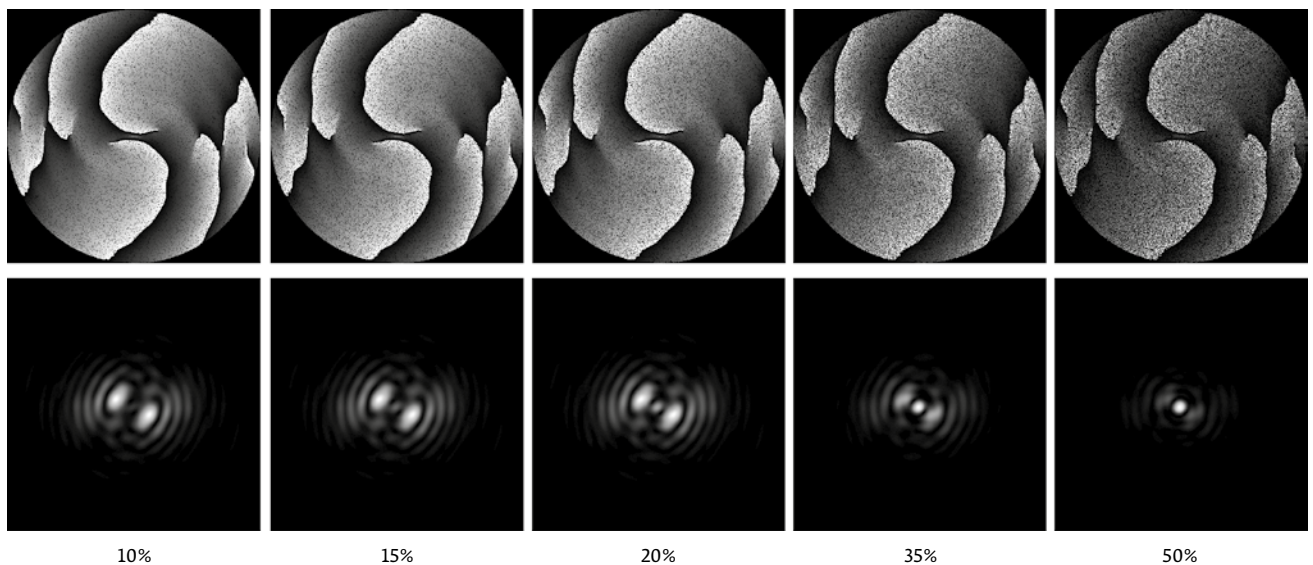
angle of the intensity distribution most rapidly varies with the distance change (Fig. 4).

### CONSIDERING DISTORTIONS AFFECTING THE DOE OPERATION

The conditions for the formation of two-lobe light fields in a real microscopic system may differ from the conditions used to calculate and create a filter. We conducted a series of studies related to the analysis of the influence of the amplitude and phase distortions of a regular and chaotic nature on the formation of a two-lobe field [34-36]. Let's denote the results obtained in the course of modeling and experiments that are most important for practical work.

The following requirements are identified for the intensity distribution of the beam illuminating the phase element. It is necessary to maintain the ratio between the aperture of the illuminating beam and the phase element aperture, the beam width must be  $\geq 0.8$  of the diameter of the phase element. The permissible deviation of the center of the illuminating beam relative to the center of DOE is less than 20% of the illuminating beam width [35].

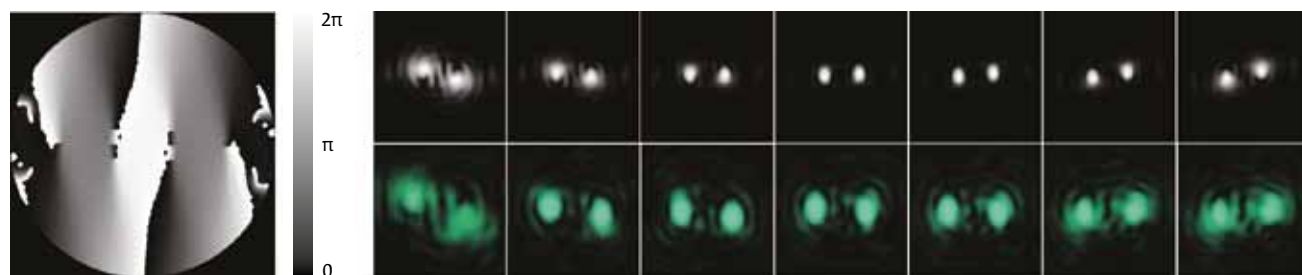
The case is considered when a portion of the pixels of the modulator or mask are invalid. It was found that the permissible area of such elements should not exceed 10% of the phase element area (Fig.6) [36]. In this case, the generated field practically does not differ from the field formed by the ideal phase element (all



**Рис. 6.** Изменение картины в плоскости фокусировки с ростом числа не работающих (испорченных) пикселей фазового элемента в процентах

**Fig. 6.** Change of the pattern in the focusing plane with increase of the number of phase element inactive (damaged) pixels in percent





**Рис. 7.** Распределение фазы полученного ДОЭ в градациях серого (а) и распределения интенсивности формируемого поля (b) по результатам численного моделирования (верхний ряд) и эксперимента (нижний ряд)

**Fig. 7.** Phase distribution of the obtained DOE in gray gradations (a) and intensity distribution of the generated field (b) according to the results of numerical simulation (upper row) and experiment (lower row)

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФАЗОВЫХ МАСОК

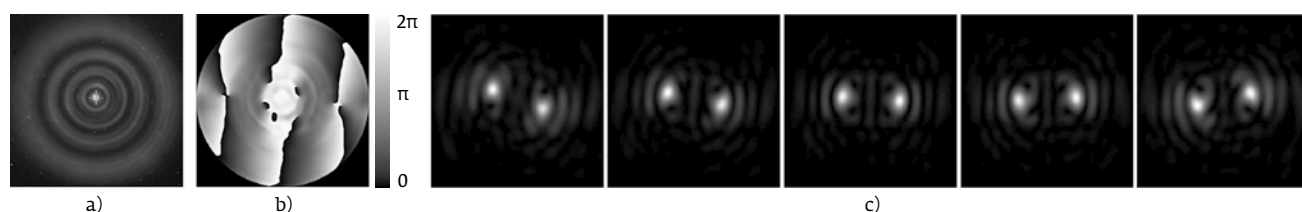
С целью дальнейшего увеличения эффективности формирования двухлепесткового поля было уменьшено расстояние между плоскостями, в которых происходит коррекция поля, и увеличено число плоскостей, используемых при расчете. На рис. 7 представлен полученный фазовый элемент и результаты численного и натурного моделирования. Отметим, что модификация алгоритма привела к уменьшению области, в которой полученное поле сохраняет свою структуру распределения интенсивности в виде двух ярких пятен. Фазовый элемент, предложенный нами ранее в работах [29, 30], формирует двухлепестковое поле, распределение интенсивности которого поворачивается на  $200^\circ$  при сохранении пространственной структуры. Новый элемент (рис. 7а) формирует поле, поворачивающееся на  $60^\circ$ . Такой элемент можно применять для исследования тонких образцов. Генерация поля происходит со средней дифракционной эффективностью 73%. Усреднение проводится по зарегистрированным сечениям поля, в которых

pixels are operable). Permissible deviations of the depth of phase modulation from  $2\pi$  lie within the range from  $-10\%$  to  $+20\%$ .

A number of experiments have also been conducted to study the effect of aberrations represented as Zernike polynomials in accordance with the normalization of OSA standards (coma, astigmatism, and spherical aberration) on the fields under study [34, 35]. It has been revealed that for spherical aberration  $\lambda/16$ , coma  $\lambda/16$ , and astigmatism  $\lambda/8$ , information on the angular position of the intensity distribution maxima can still be extracted from the intensity distribution of the studied light fields with rotation.

### IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF PHASE MASKS

In order to further increase the efficiency of the formation of a two-lobe field, the distance was reduced between the planes where the field was corrected, while the number of planes used in the calculation was increased. Fig. 7 shows the obtained phase element and the results of numerical and experimental modeling. Note that the modification



**Рис. 8.** Распределение интенсивности, формируемое микрообъективом (а); распределение фазы рассчитанного ДОЭ (b); поле, формируемое полученным ДОЭ (с)

**Fig. 8.** Intensity distribution formed by the micro-lens (a); phase distribution of the calculated DOE (b); field formed by the received DOE (c)

структура распределения интенсивности поля сохраняется [37, 38].

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ ФАЗОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ РАБОТЫ С КОНКРЕТНЫМ МИКРООБЪЕКТИВОМ

В процессе работы было обнаружено, что каждый микрообъектив формирует свою картину распределения интенсивности в Фурье плоскости, в которой происходит преобразование изображения фазовым ДОЭ. Эти картины отличаются от однородного распределения, для которого проводился расчет элементов (рис. 5a). Пример распределения интенсивности, формируемого микрообъективом Carl Zeiss 100x 1.3NA, показан на рис. 8a. В таком случае деформируется изображение и уменьшается эффективность преобразования. Учитывая это распределение, мы получили фазовый элемент, показанный на рис. 8b. Результат оптимизации отличается от ранее рассчитанного (рис. 7a) для однородного распределения интенсивности. Данный ДОЭ формирует требуемое изображение с эффективностью 86%. Поворот распределения интенсивности формируемого поля осуществляется на  $64^\circ$ .

При помощи полученного фазового ДОЭ производилось экспериментальное детектирование изображений одиночной флуоресцирующей наночастицы (с характерным размером  $\sim 50$  нм), размещенной на стеклянной подложке [38]. Для модификации ФРТ использовался ЖК-модулятор света Holoeye PLUTO-VIS со следующими характеристиками: разрешение  $1920 \times 1080$  пикселей, разрядность 8 бит – 256 уровней серого для фазового преобразования, 60%-отражение в 0-й порядок дифракции. Детектирование наночастицы производилось в широком диапазоне глубин залегания точечного источника, от  $-300$  до  $300$  нм [37,38]. Использование оптимизированного элемента позволило достичь разрешения вдоль оптической оси системы (вдоль оси Z) в 18 нм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное исследование по созданию фазовых ДОЭ для модификации ФРТ микроскопа с целью увеличения разрешения в продольном направлении. Метод создания основан на оптике спиральных пучков света. С помощью численного моделирования и экспериментально исследованы эффективность и диапазон устойчивого формирования двухлепесткового распределения интенсивности, поворачивающегося при распространении, для различных вариантов фазовых масок. Опреде-

of the algorithm led to a decrease in the region where the obtained field retains its intensity distribution structure in the form of two bright spots. The phase element earlier proposed by the authors in [29, 30] forms a two-lobe field, the intensity distribution of which rotates by  $200^\circ$  while maintaining the spatial structure. The new element (Fig. 7a) forms a field that rotates by  $60^\circ$ . Such an element can be used to study thin samples. The field generation occurs with an average diffraction efficiency of 73%. The averaging is made over the recorded cross sections of the field in which the structure of the field intensity distribution is preserved [37, 38].

### OPTIMIZATION OF THE PHASE FILTER PROFILE FOR WORKING WITH A SPECIFIC MICRO LENS

In the course of our study, it was found that each micro-lens forms its own picture of the intensity distribution in the Fourier plane, where the image is converted by a phase DOE. These patterns differed from those for the homogeneous distribution for which the elements were calculated (Fig. 5a). An example of the intensity distribution formed by the Carl Zeiss 100x 1.3NA micro lens is shown in Fig. 8a. In this case, the image is deformed and the conversion efficiency decreases. Given this distribution, we obtained the phase element shown in Fig. 8b. The optimization result differs from the one previously calculated (Fig. 7a) for a uniform intensity distribution. This DOE forms the desired image with the efficiency of 86%. The rotation angle of the formed field intensity distribution is  $64^\circ$ .

By using the obtained phase DOE, we experimentally detected images of a single fluorescent nanoparticle (with a characteristic size of  $\sim 50$  нм) placed on a glass substrate [38]. To modify the PSF, a Holoeye PLUTO-VIS LCD light modulator was used with the following characteristics: resolution of  $1920 \times 1080$  pixels, 8-bit resolution – 256 gray levels for phase conversion, 60% reflection to the 0-th diffraction order. Nanoparticles were detected in a wide range of depths of a point source, from  $-300$  to  $300$  нм [37, 38]. The use of the optimized element allowed us to achieve a resolution along the optical axis of the system (along the Z axis) of 18 нм.

### CONCLUSION

A comprehensive study aimed to create phase DOEs for modifying the PSF microscope in order to increase the resolution in the longitudinal direction was carried out. The method is based on the optics of spiral light beams. Both the numerical modeling



лены допустимые величины амплитудных и фазовых искажений (имеющих регулярную и хаотичную структуру) световой волны, освещающей ДОО, при формировании двухлепесткового поля.

Получены элементы со значениями энергетической эффективности от 30 до 86% и различным диапазоном углов поворота для работы с образцами различной толщины. Также проведена оптимизация фазовых элементов под распределение интенсивности, формируемое светосильным микрообъективом, что позволяет избавиться от амплитудных искажений при работе в микроскопе. С использованием рассчитанных фазовых профилей удалось локализовать наночастицу с точностью 18 нм в диапазоне глубин 600 нм.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллег из Института спектроскопии Российской академии науки (ИСАН) А.В. Наумова, А.А. Горшелева, И.Ю. Еремчева за инициализацию этих исследований, полезные обсуждения и интерес к работе, а также сотрудников Самарского филиала ФИАН Е.Г. Абрамочкина В.Г. Волостникова, Е.Н. Воронцова, Н.Н. Лосевского, С.А. Самагина, Е.В. Разуеву, А.М. Майорову за вклад в проведение исследований по данной теме.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-29-11809, № 19-32-90078 и № 20-02-00671.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hettich C., Schmitt C., Zitzmann J., Kuhn S., Gerhardt I., Sandoghdar V. Nanometer resolution and coherent optical dipole coupling of two individual molecules. *Science*. 2002. 298(5592); 385–389. DOI: 10.1126 / science.1075606.
2. Eremchev I. Y., Lozing N. A., Baev A. A., Tarasevich A. O., Gladush M. G., Rozhentsov A. A., Naumov A. V. Luminescence Microscopy of Single Quantum Dot Pairs with Nanometer Spatial Resolution. *Jetp Letters*. 2018. 108(1); 30–37. DOI: 10.1134 / S0021364018130076.
3. Gerasimova M. A., Szykh A. G., Slyusareva E. A. The role of energy transfer in bioluminescence quenching by xanthene dyes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*. 2009. 97(3); 117–122. DOI: 10.1016 / j.jphotobiol.2009.08.007
4. Osad'ko I. S. Determination of the Efficiency and Energy Transfer Rate in the Fluorescence of a Single Donor-Acceptor Pair Attached to a Biomolecule. *Jetp Letters*. 2018. 107(11); 725–727. DOI: 10.1134 / S0021364018110127
5. Vainer Y. G., Sobolev Y. I., Naumov A. V., Osad'ko I. S., Kador L. Fluorescence microscopy and spectroscopy of subsurface layer dynamics of polymers with nanometer resolution in the axial direction. *Faraday Discussions*. 2015. 184; 237–249. DOI: 10.1039 / c5fd00055f.
6. Naumov A. V., Gorshchev A. A., Gladush M. G., Anikushina T. A., Golovanova A. V., Kohler J., Kador L. Micro-Refractionmetry and Local-Field Mapping with Single Molecules. *Nano Letters*. 2018. 18(10); 6129–6134. DOI: 10.1021 / acs.nanolett.8b01753.
7. Gladush M. G., Anikushina T. A., Gorshchev A. A., Plakhotnik T. V., Naumov A. V. Dispersion of Lifetimes of Excited States of Single Molecules in Organic Matrices at Ultralow Temperatures. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2019. 128(5); 655–663. DOI: 10.1134 / s1063776119030038.

and experimental investigations were fulfilled to study the effectiveness and range of stable formation of a two-lobe intensity distribution, which rotates during propagation, for various types of phase masks. The permissible values of the amplitude and phase distortions (having a regular and chaotic structure) of the light wave illuminating the DOE during the formation of a two-lobe field are determined.

Phase elements with the energy efficiency values from 30 to 86% and a different range of rotation angles for working with samples of various thicknesses are obtained. Besides, the elements were optimized for the intensity distribution formed by a high-aperture micro lens, which eliminates the amplitude distortions while working in a microscope. With the use of the calculated phase profiles, it became possible to localize the nanoparticle with an accuracy of 18 nm in the depth range of 600 nm.

### ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to their colleagues from the Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Science (ISAN) A. V. Naumov, A. A. Gorshchev, I. Yu. Yermchev for the initialization of these studies, useful discussions and interest in the work, as well as to the staff of the Samara Branch of the LPI E. G. Abramochkin, V. G. Volostnikov, E. N. Vorontsov, N. N. Losevsky, S. A. Samagin, E. V. Razueva, A. M. Mayorova for their contribution to the research on this topic.

The study was carried out with the financial support of the Russian Federal Property Fund in the framework of scientific projects No. 16-29-11809, No. 19-32-90078 and No. 20-02-00671.

### REFERENCES

1. Hettich C., Schmitt C., Zitzmann J., Kuhn S., Gerhardt I., Sandoghdar V. Nanometer resolution and coherent optical dipole coupling of two individual molecules. *Science*. 2002. 298(5592); 385–389. DOI: 10.1126 / science.1075606.
2. Eremchev I. Y., Lozing N. A., Baev A. A., Tarasevich A. O., Gladush M. G., Rozhentsov A. A., Naumov A. V. Luminescence Microscopy of Single Quantum Dot Pairs with Nanometer Spatial Resolution. *Jetp Letters*. 2018. 108(1); 30–37. DOI: 10.1134 / S0021364018130076.
3. Gerasimova M. A., Szykh A. G., Slyusareva E. A. The role of energy transfer in bioluminescence quenching by xanthene dyes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*. 2009. 97(3); 117–122. DOI: 10.1016 / j.jphotobiol.2009.08.007
4. Osad'ko I. S. Determination of the Efficiency and Energy Transfer Rate in the Fluorescence of a Single Donor-Acceptor Pair Attached to a Biomolecule. *Jetp Letters*. 2018. 107(11); 725–727. DOI: 10.1134 / S0021364018110127
5. Vainer Y. G., Sobolev Y. I., Naumov A. V., Osad'ko I. S., Kador L. Fluorescence microscopy and spectroscopy of subsurface layer dynamics of polymers with nanometer resolution in the axial direction. *Faraday Discussions*. 2015. 184; 237–249. DOI: 10.1039 / c5fd00055f.
6. Naumov A. V., Gorshchev A. A., Gladush M. G., Anikushina T. A., Golovanova A. V., Kohler J., Kador L. Micro-Refractionmetry and Local-Field Mapping with Single Molecules. *Nano Letters*. 2018. 18(10); 6129–6134. DOI: 10.1021 / acs.nanolett.8b01753.



8. Savostianov A. O., Eremchev I. Y., Gorshelev A. A., Orlov S. V., Starukhin A. S., Naumov A. V. Direct Observation of a Quasilocated Low-Frequency Vibrational Mode in the Fluorescence Excitation Spectrum of a Single Impurity Molecule in a Polymer Matrix. *Optics and Spectroscopy*. 2019. 126(1); 44–48. DOI: 10.1134 / s0030400x19010156.
9. Kulik S. I., Eremchev I. Y., Apel P. Y., Zagorski D. L., Naumov A. V. Fluorescence Imaging for Ultrafiltration of Individual Nanoparticles from a Colloidal Solution in Track Membranes. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2018. 85(5); 916–922. DOI: 10.1007 / s10812-018-0739-9.
10. Sahl S. J., Schönle A., Hell S. W. Fluorescence Microscopy with Nanometer Resolution. 2019. In: Hawkes P. W., Spence J. C. H. (eds) *Springer Handbook of Microscopy*. Springer, Cham. DOI: 10.1007 / 978-3-030-00069-1\_22.
11. Moerner W. E. Single-Molecule Spectroscopy, Imaging, and Photocontrol: Foundations for Super-Resolution Microscopy (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie-International Edition*. 2015. 54 (28); 8067–8093. DOI: 10.1002 / anie.201501949.
12. Betzig E. Single Molecules, Cells, and Super-Resolution Optics (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie-International Edition*. 2015. 54 (28); 8034–8053. DOI: 10.1002 / anie.201501003.
13. Huszka G., Gijis M. A. M. Super-resolution optical imaging: A comparison. *Micro and Nano Engineering*. 2019 2; 7–28. DOI: 10.1016 / j.mne.2018.11.005.
14. Diezmann A., Shechtman Y., Moerner W. E. Three-Dimensional Localization of Single Molecules for Super Resolution Imaging and Single-Particle Tracking. *Chemical Reviews*. 2017. 117 (11); 7244–7275. DOI: 10.1021 / acs.chemrev.6b00629.
15. Gahlmann A., Ptacin J. L., Grover G., Quirin S. von Diezmann A. R. S., Lee M. K., Backlund M. P., Shapiro L., Piestun R., Moerner W. E. Quantitative Multicolor Subdiffraction Imaging of Bacterial Protein Ultrastructures in Three Dimensions. *Nano Letters*. 2013. 13(3); 987–993.
16. Gustavsson A., Petrov P. N., Moerner W. E. Light sheet approaches for improved precision in 3D localization-based super-resolution imaging in mammalian cells. *Optics Express*. 2018. 26(10); 13122–13147. DOI: 10.1364 / OE.26.013122.
17. Huang B., Wang W., Bates M., Zhuang X. Three-dimensional super-resolution imaging by stochastic optical reconstruction microscopy. *Science* 2008, 319; 810–813. DOI: 10.1126 / science.1153529
18. Shechtman Y., Weiss L., Backer A., Sahl S., Moerner W. Precise 3D scan-free multiple-particle tracking over large axial ranges with Tetrapod point spread functions. *Nano Letters*. 2015. 15 (6); 4194–4199. DOI: 10.1021 / acs.nanolett.5b01396.
19. Pavani S. R. P., Piestun R. Three dimensional tracking of fluorescent microparticles using a photon-limited double-helix response system. *Optics Express*. 2008. 16 (26); 22048–22057. DOI: 10.1364 / OE.16.022048.
20. Backlund M. P., Lew M. D., Backer A. S., Sahl S. J., Grover G., Agrawal A., Piestun R., Moerner W. E. The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and
7. Gladush M. G., Anikushina T. A., Gorshelev A. A., Plakhotnik T. V., Naumov A. V. Dispersion of Lifetimes of Excited States of Single Molecules in Organic Matrices at Ultralow Temperatures. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2019. 128(5); 655–663. DOI: 10.1134 / s1063776119030038.
8. Savostianov A. O., Eremchev I. Y., Gorshelev A. A., Orlov S. V., Starukhin A. S., Naumov A. V. Direct Observation of a Quasilocated Low-Frequency Vibrational Mode in the Fluorescence Excitation Spectrum of a Single Impurity Molecule in a Polymer Matrix. *Optics and Spectroscopy*. 2019. 126(1); 44–48. DOI: 10.1134 / s0030400x19010156.
9. Kulik S. I., Eremchev I. Y., Apel P. Y., Zagorski D. L., Naumov A. V. Fluorescence Imaging for Ultrafiltration of Individual Nanoparticles from a Colloidal Solution in Track Membranes. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2018. 85(5); 916–922. DOI: 10.1007 / s10812-018-0739-9.
10. Sahl S. J., Schönle A., Hell S. W. Fluorescence Microscopy with Nanometer Resolution. 2019. In: Hawkes P. W., Spence J. C. H. (eds) *Springer Handbook of Microscopy*. Springer, Cham. DOI: 10.1007 / 978-3-030-00069-1\_22.
11. Moerner W. E. Single-Molecule Spectroscopy, Imaging, and Photocontrol: Foundations for Super-Resolution Microscopy (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie-International Edition*. 2015. 54 (28); 8067–8093. DOI: 10.1002 / anie.201501949.
12. Betzig E. Single Molecules, Cells, and Super-Resolution Optics (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie-International Edition*. 2015. 54 (28); 8034–8053. DOI: 10.1002 / anie.201501003.
13. Huszka G., Gijis M. A. M. Super-resolution optical imaging: A comparison. *Micro and Nano Engineering*. 2019 2; 7–28. DOI: 10.1016 / j.mne.2018.11.005.
14. Diezmann A., Shechtman Y., Moerner W. E. Three-Dimensional Localization of Single Molecules for Super Resolution Imaging and Single-Particle Tracking. *Chemical Reviews*. 2017. 117 (11); 7244–7275. DOI: 10.1021 / acs.chemrev.6b00629.
15. Gahlmann A., Ptacin J. L., Grover G., Quirin S. von Diezmann A. R. S., Lee M. K., Backlund M. P., Shapiro L., Piestun R., Moerner W. E. Quantitative Multicolor Subdiffraction Imaging of Bacterial Protein Ultrastructures in Three Dimensions. *Nano Letters*. 2013. 13(3); 987–993.
16. Gustavsson A., Petrov P. N., Moerner W. E. Light sheet approaches for improved precision in 3D localization-based super-resolution imaging in mammalian cells. *Optics Express*. 2018. 26(10); 13122–13147. DOI: 10.1364 / OE.26.013122.
17. Huang B., Wang W., Bates M., Zhuang X. Three-dimensional super-resolution imaging by stochastic optical reconstruction microscopy. *Science* 2008, 319; 810–813. DOI: 10.1126 / science.1153529
18. Shechtman Y., Weiss L., Backer A., Sahl S., Moerner W. Precise 3D scan-free multiple-particle tracking over large axial ranges with Tetrapod point spread functions. *Nano Letters*. 2015. 15 (6); 4194–4199. DOI: 10.1021 / acs.nanolett.5b01396.
19. Pavani S. R. P., Piestun R. Three dimensional tracking of fluorescent microparticles using a photon-limited double-helix response system. *Optics Express*. 2008. 16 (26); 22048–22057. DOI: 10.1364 / OE.16.022048.
20. Backlund M. P., Lew M. D., Backer A. S., Sahl S. J., Grover G., Agrawal A., Piestun R., Moerner W. E. The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and



**Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники**



**Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»**



**Програмное обеспечение и автоматизация**

**Изготовление технологических устройств**

ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845

**Разработка и изготовление тонкопленочных изделий**

**Разработка технологий формирования тонких пленок**

**Оптические элементы**

**Напылительный сервис**

**Сложные и уникальные покрытия**

www.izovac.com  
www.izovac-coatings.com









- orientation. *Proceedings of SPIE*. 2013. 8590; 85900L. DOI: 10.1117/12.2001671.
21. Ghosh S., Grover G., Piestun R., Preza C. Effect of double-helix point-spread functions on 3D imaging in the presence of spherical aberrations. *Proceedings of SPIE*. 2011. 7904; 79041D. DOI: 10.1117/12.874111.
  22. Котова С. П., Майорова А. М., Самагин С. А. Возможность формирования двухпестковых вихревых световых полей с помощью модифицированного ЖК фокусатора. *Оптика и спектроскопия*. 2019. 126(1); 18–23. DOI: 10.21883/OS.2019.01.47047.256–18.
  23. Abramochkin E., Volostnikov V. Spiral-type beams. *Optics Communications*. 1993. 102(3–4); 336–350. DOI: 10.1016/0030-4018(93)90406-U.
  24. Абрамочкин Е. Г., Волостников В. Г. Современная оптика гауссовых пучков. М.: ФизМатЛит. 2010. 184 с.
  25. Разуева Е. В. Свет, сохраняющий форму. *Фотоника*. 2016. 55(1); 122–130.
  26. Abramochkin E. G., Kotova S. P., Korobtsov A. V., Losevsky N. N., Mayorova A. M., Rakhmatulin M. A., Volostnikov V. G. Microobject Manipulations Using Laser Beams with Nonzero Orbital Angular Momentum. *Laser Physics*. 2006. 16(5); 842–848. DOI 10.1134/S1054660X06050161
  27. Wang J. Advances in communications using optical vortices. *Photonics Research*. 2016 4 (5); B14–B28. DOI: 10.1364/PRJ.4.000B14.
  28. Волостников В. Г., Кишкин С. А., Котова С. П. Анализ контурных изображений с помощью оптики спиральных пучков. *Квантовая электроника*. 2018. 48(3); 268–274. DOI: 10.1070/QEL16553.
  29. Волостников В. Г., Воронцов Е. Н., Котова С. П., Лосевский Н. Н., Прокопова Д. В. Дифракционный элемент на основе спиральных пучков для определения глубины залегания излучающих объектов. *Известия РАН. Серия Физическая*. 2016. 80(7); 841–845. DOI: 10.7868/S0367676516070243.
  30. Воронцов Е. Н., Лосевский Н. Н., Прокопова Д. В., Разуева Е. В., Самагин С. А. Исследование формирования световых полей с различной скоростью вращения интенсивности. *Компьютерная оптика*. 2016. 40(2); 158–163. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-158-163.
  31. Разуева Е. В. Параметрические семейства параксиальных световых полей: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. – М., 2015. – 106 с.
  32. Razuева E., Abramochkin E. Multiple-twisted spiral beams. *Journal of the Optical Society of America A*. 2019. 36(6); 1089–1097. DOI: 10.1364/JOSAA.36.001089.
  33. Razuева E. V., Abramochkin E. G. Fast rotating spiral light beams. *EPJ Web of Conferences*. 2015. 103; 10011. DOI: epjconf/201510310011.
  34. Kotova S. P., Losevsky N. N., Prokopova D. V., Samagin S. A., Volostnikov V. G., Vorontsov E. N. Aberration influenced generation of rotating two-lobe light fields. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. 740; 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/740/1/012013.
  35. Volostnikov V. G., Vorontsov E. N., Losevsky N. N., Kotova S. P., Prokopova D. V., Samagin S. A. Phase Filters for 3D Localization of Point Light Sources. in VII International Conference on Photonics and Information Optics, *KNE Energy & Physics*. 2018. 469–481. DOI 10.18502/ken.v3i3.2061.
  36. Воронцов Е. Н., Котова С. П., Лосевский Н. Н., Прокопова Д. В., Самагин С. А. Влияние амплитудных и фазовых искажений на формирование световых полей с вращением распределения интенсивности. *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2018. 45(3); 9–14. DOI: 10.3103/S1068335618030028.
  37. Прокопова Д. В., Воронцов Е. Н., Котова С. П., Лосевский Н. Н., Самагин С. А., Мынжасаров И. Т., Горшелев А. А., Еремчев И. Ю., Наумов А. В. Дифракционные оптические элементы с повышенной эффективностью для наноскопии. XIII международные чтения по квантовой оптике (IWQO – 2019): Сборник тезисов. г. Владимир, 9–14 сентября 2019 г. [Электронное издание]. Москва: Тривант. 2019. с. 198–200.
  38. Прокопова Д. В., Воронцов Е. Н., Котова С. П., Лосевский Н. Н., Самагин С. А., Мынжасаров И. Т., Горшелев А. А., Еремчев И. Ю., Наумов А. В. Повышение энергетической эффективности дифракционных оптических элементов для задач трехмерной наноскопии. *Известия РАН. Серия физическая*. 2019. 83(12); 1612–1617. DOI: 10.1134/S036767651912024X.
  - Piestun R., Moerner W. E. The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and orientation. *Proceedings of SPIE*. 2013. 8590; 85900L. DOI: 10.1117/12.2001671.
  21. Ghosh S., Grover G., Piestun R., Preza C. Effect of double-helix point-spread functions on 3D imaging in the presence of spherical aberrations. *Proceedings of SPIE*. 2011. 7904; 79041D. DOI: 10.1117/12.874111.
  22. Kotova S. P., Maiorova A. M., Samagin S. A. The Possibility of Forming Two-Lobe Vortex Light Fields Using a Modified Liquid-Crystal Focusator. *Optics and Spectroscopy*. 2019. 126(1); 10–15. DOI: 10.1134/S0030400X19010089.
  23. Abramochkin E., Volostnikov V. Spiral-type beams. *Optics Communications*. 1993. 102(3–4); 336–350. DOI: 10.1016/0030-4018(93)90406-U.
  24. Abramochkin E. G., Volostnikov V. G. *Modern optics of Gaussian beams*. Moscow: "FizMatLit" Publisher, 2010.
  25. Razuева E. The Light Maintaining Its Shape. *Photonics Russian*. 2016. 55(1); 122–130.
  26. Abramochkin E. G., Kotova S. P., Korobtsov A. V., Losevsky N. N., Mayorova A. M., Rakhmatulin M. A., Volostnikov V. G. Microobject Manipulations Using Laser Beams with Nonzero Orbital Angular Momentum. *Laser Physics*. 2006. 16(5); 842–848. DOI 10.1134/S1054660X06050161
  27. Wang J. Advances in communications using optical vortices. *Photonics Research*. 2016 4 (5); B14–B28. DOI: 10.1364/PRJ.4.000B14.
  28. Volostnikov V. G., Kishkin S. A., Kotova S. P. Analysis of contour images using optics of spiral beams. *Quantum Electronic*. 2018. 48(3); 268–274. DOI: 10.1070/QEL16553.
  29. Volostnikov V. G., Vorontsov E. N., Kotova S. P., Losevskiy N. N., Prokopova D. V. Diffractive Elements Based on Spiral Beams as Devices for Determining the Depth of Bedding of Radiation Sources. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2016. 80(7); 766–769. DOI: 10.3103/S1062873816070248.
  30. Vorontsov E. N., Losevskiy N. N., Prokopova D. V., Razuева E. V., Samagin S. A. Study on Generating Light Fields with the Intensity Patterns Characterized by Different Rotational Rates. *Computer Optics*. 2016. 40(2); 158–163. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-158-163.
  31. Razuева E. V. Parametric families of paraxial light fields: dis. ... cand. Phys.-Math. Sciences: 01.04.05. Moscow. 2015.
  32. Razuева E., Abramochkin E. Multiple-twisted spiral beams. *Journal of the Optical Society of America A*. 2019. 36(6); 1089–1097. DOI: 10.1364/JOSAA.36.001089.
  33. Razuева E. V., Abramochkin E. G. Fast rotating spiral light beams. *EPJ Web of Conferences*. 2015. 103; 10011. DOI: epjconf/201510310011.
  34. Kotova S. P., Losevsky N. N., Prokopova D. V., Samagin S. A., Volostnikov V. G., Vorontsov E. N. Aberration influenced generation of rotating two-lobe light fields. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. 740; 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/740/1/012013.
  35. Volostnikov V. G., Vorontsov E. N., Losevsky N. N., Kotova S. P., Prokopova D. V., Samagin S. A. Phase Filters for 3D Localization of Point Light Sources. in VII International Conference on Photonics and Information Optics, *KNE Energy & Physics*. 2018. 469–481. DOI 10.18502/ken.v3i3.2061.
  36. Vorontsov E. N., Kotova S. P., Losevsky N. N., Prokopova D. V., Samagin S. A. Effect of Amplitude and Phase Distortions on the Formation of Light Fields with Rotating Intensity Distribution. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2018. 45(3); 71–74. DOI: 10.3103/S1068335618030028.
  37. Prokopova D. V., Vorontsov E. N., Kotova S. P., Losevsky N. N., Samagin S. A., Mynzhasarov I. T., Gorshelev A. A., Eremchev I. Y., Naumov A. V. Diffractive optical elements with enhanced efficiency for nanoscopy. XIII International Readings on Quantum Optics (IWQO – 2019): Abstracts. Vladimir, September 9–14, 2019. Moscow: Trovant. 2019. 198–200.
  38. Prokopova D. V., Vorontsov E. N., Kotova S. P., Losevsky N. N., Samagin S. A., Mynzhasarov I. T., Gorshelev A. A., Eremchev I. Y., Naumov A. V. Improving the Energy Efficiency of Diffraction Optical Elements for 3D Nanoscopy. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2019. 83(12); 1453–1458. DOI: 10.3103/S1062873819120232.

## ОБ АВТОРАХ

Дарья В. Прокопова, prokopovadv@gmail.com, Самарский филиал ФИАН, laser@fian.smr.ru, Самара, Россия Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, ssau@ssau.ru, Самара, Россия  
ORCID: 0000-0002-6955-8390  
Светлана П. Котова, Самарский филиал ФИАН, laser@fian.smr.ru, Самара, Россия  
ORCID: 0000-0003-2865-333X

## ABOUT AUTHORS

Darya V. Prokopova, prokopovadv@gmail.com, Lebedev Physical Institute, Samara, Russia, e-mail: laser@fian.smr.ru, Samara National Research University, Samara, Russia ssau@ssau.ru.  
ORCID: 0000-0002-6955-8390  
Svetlana P. Kotova, Lebedev Physical Institute, Samara, Russia, e-mail: laser@fian.smr.ru.  
ORCID: 0000-0003-2865-333X



# VII ТРОИЦКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ "МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА" (ТКМФ-7)

г. Троицк, г. Москва, 15–18 июня 2020 г.

## СЕКЦИИ В РАМКАХ КОНФЕРЕНЦИИ



### СЕКЦИЯ 1

Биомедицинская фотоника: взаимодействие электромагнитного излучения с биотканями; оптическая и оптоакустическая диагностика биотканей; фотодинамические процессы; терагерцовая медицина и биология.  
Руководители: Гордиенко В.М., Тучин В.В., Шкуринов А.П.



### СЕКЦИЯ 2

Нанотехнологии для медицины: наномедицина; наносенсорика; нанодиагностика и наноскопия; наноплазмоника; наночастицы; манипулирование биологическими микро- и нанообъектами; тераностика.  
Руководители: Чичков Б.Н., Наумов А.В.



### СЕКЦИЯ 3

Новые биомедицинские методы, приборы и материалы: новые оптические биосенсорные платформы; перспективные фотосенсибилизаторы; физические воздействия на микробиологические системы; новые материалы для медицины; информационно-когнитивные технологии в медицине.  
Руководители: Гончуков С.А., Минаев В.П.



### СЕКЦИЯ 4

Регенеративные технологии, тканевая инженерия: тканевая инженерия в регенерации тканей; бескафолдные технологии в регенеративной медицине; индуцированные плюрипотентные стволовые клетки.  
Руководитель: Каган В.Е., Yuanyuan Zhang, Ефименко А.Ю., Комлев В.С., Тимашев П.С.



### СЕКЦИЯ 5

Ядерная и лучевая диагностика и терапия: терапия и диагностика с радионуклидными источниками; лучевая терапия; трансляционная медицина.  
Руководители: Акулиничев С.В., Черняев А.П.



### СИМПОЗИУМ

«Перспективные методы МРТ для прецизионной медицины»  
Руководители: Макуренков А.М., Пирогов Ю.А., Польшаков В.И.

**В РАМКАХ КОНФЕРЕНЦИИ ПРОЙДУТ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ ШКОЛА  
ПО МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКЕ И КОНКУРС РАБОТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ.**

#### МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ

Детская школа искусств имени М.И.Глинки  
г. Троицк, г. Москва, Октябрьский проспект, д. 12  
Курорт «Красная Пахра» (размещение участников)  
г. Москва, поселение Краснопахорское, с. Красное, ул. Парковая, 10, 1

Технический секретариат Конференции:

Тел.: +7 (499) 390-34-38  
E-mail: tkmf@confreg.org

Подробная информация на сайте Конференции:

[www.medphys.troitsk.ru](http://www.medphys.troitsk.ru)

#### ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



Институт фотонных технологий ФИЦ  
«Кристаллография и фотоника»  
РАН (ИФТ РАН)



Троицкий научный центр РАН



Администрация г. Троицка



Троицкий инновационный кластер  
«НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ЛАЗЕРНЫЕ  
И РАДИОАКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»