



Полие цепочноподобные пучки

Д. Ю. Черепко¹, Н. Д. Кундикова^{1,2}, И. И. Попков²

¹ Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

² Институт электрофизики, Уральское отделение
Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

С целью генерации цепочноподобных пучков с внедренной фазовой сингулярностью рассмотрена дифракция пучка Бесселя первого порядка на зонных пластинках с двумя открытыми нечетными зонами Френеля. Показано, что размер капсулы зависит от номера второй открытой нечетной зоны Френеля и фокусного расстояния зонной пластинки. Изменение относительной освещенности зон приводит к изменению контраста между темными и светлыми областями. Наилучший контраст соответствует одинаковой освещенности зон. Экспериментально сгенерирован цепочноподобный пучок со встроенным вихрем в результате дифракции пучка Бесселя первого порядка на зонной пластинке с первой и девятой открытыми зонами Френеля. Экспериментально доказано присутствие дислокации и исследованы особенности сгенерированного пучка. Обнаружено хорошее соответствие между экспериментальными результатами и результатами моделирования.

Ключевые слова: цепочноподобный пучок, зоны Френеля, бинарная амплитудная дифракционная маска, фазовая сингулярность, пучок Бесселя

Статья получена: 13.05.2023

Статья принята: 02.06.2023

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время структурированное излучение вызывает большой интерес благодаря своим уникальным амплитудным и фазовым характе-

Hollow Chain-Like Beams

D. Yu. Cherepko¹, N. D. Kundikova^{1,2}, I. I. Popkov²

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Institute of Electrophysics, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

We have considered the diffraction of the first-order Bessel beam by zone plates with two odd open Fresnel zone to generate chain-like beams with an embedded phase singularity. We have shown that the capsule size depends on the number of the second odd open Fresnel zone and the zone plate focal length. The change of the zones relative illumination leads to the change of the contrast between dark and light regions. The best contrast corresponds to the equal illumination of the zones. We have experimentally generated a chain-like beam with an embedded vortex by the first-order Bessel beam diffraction by zone plates with the first and the ninth open Fresnel zones. We experimentally proved the dislocation presence and investigated the main beam features. We demonstrated sufficiently good agreement between experimental and numerically calculated results.

Keywords: Chain-like beam, Fresnel zones, binary amplitude diffraction mask, phase singularity, Bessel beam

Article received on: 13.05.2023

Article accepted on: 02.06.2023

INTRODUCTION

Nowadays, structured light beams have gained much interest due to its unique amplitude and phase structures. The attention is also motivated by modern applications for advanced laser material processing [1–3], optical manipulation [4–6], communication [7–9] and for data storage [10].

The beams with the self-similar structure of intensity distribution along a direction of propagation form the class of beams useful for optical microparticle manipulation. The chain-like beam is a result of Gaussian beam diffraction by a zone plate with several open odd zones [11,12]. A diffraction pattern



ристикам. Внимание также вызвано современными возможностями для лазерной обработки материалов [1-3], оптических манипуляций [4-6], связи [7-9] и хранения данных [10].

Пучки с самоподобной структурой распределения интенсивности вдоль направления распространения образуют класс пучков, важных как для оптической манипуляции с микрочастицами, так и для других приложений. Цепочно-образный пучок является результатом дифракции пучка Гаусса на зонной пластинке с несколькими открытыми нечетными зонами [11, 12]. Дифракционная картина пучка Гаусса, прошедшего через фрактальную зонную пластинку, представляет собой световой пучок с самоподобной структурой интенсивности вдоль направления распространения пучка [13]. Использование обобщенных зонных пластинок увеличивает число фокусных точек, сохраняя свойство самоподобия [14]. Основное различие между пучками, описанными в [13, 14], и цепочноподобными пучками [11, 12] заключается в распределении интенсивности между главным и вторичными фокусами и количеством фокусных точек [11-14].

Сочетание свойств пучков Бесселя первого порядка и цепочноподобных пучков порождает новый класс пучков со свойством самоподобия. Пучки такого рода расширяют области применения и позволяют обнаружить новые эффекты спин-орбитального взаимодействия света [15-17]. Пучки с неоднородным распределением интенсивности вдоль направления распространения и последовательностью сфокусированных оптических вихрей вдоль направления распространения можно генерировать, используя спиральную фрактальную зонную пластину [18] и спиральную фазовую маску [19].

В настоящей работе предлагается внедрять дислокацию в пучок с неоднородным распределением интенсивности вдоль направления распространения при дифракции пучка, несущего топологический заряд, на зонной пластинке. Чтобы доказать такую возможность, численно и экспериментально исследованы свойства цепочноподобных пучков с фазовой сингулярностью, генерируемых при дифракции пучка Бесселя первого порядка на амплитудной бинарной зонной пластине с двумя открытыми нечетными зонами Френеля.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛЫХ ЦЕПочноПОДОБНЫХ ПУЧКОВ

Рассмотрена дифракция пучка Бесселя первого порядка на амплитудной зонной пластинке

of a Gaussian beam passing through a fractal zone plate is a light beam with a self-like intensity structure along the beam propagation direction [13]. The usage of generalized zone plates increases the number of focal points, saving the property of self-similarity [14]. The main difference between the beams described in [13, 14] and chain-like beams [11, 12] is the intensity distribution between principal and secondary focal points and the number of focal points [11-14].

The combination of properties of the Bessel beams of the first order and chain-like beams generates a new class of beams with the property of self-similarity. Such kind of beams increase the fields of application and can help to observe new effects of the spin-orbit interaction of light [15-17]. One can generate beams with inhomogeneous intensity distribution along the propagation direction and the sequence of focused optical vortices along the propagation direction using a spiral fractal zone plate [18] and a helical vortex phase mask [19].

We propose to embed dislocation into a beam with inhomogeneous intensity distribution along the propagation direction by the zone plates illumination with a beam carrying a topological charge. To prove that, we investigate the properties of chain-like beams with phase singularity generated by the first-order Bessel beam diffraction by an amplitude binary zone plate with two open odd Fresnel zones numerically and experimentally.

NUMERICAL SIMULATION OF THE HOLLOW CHAIN LIKE BEAM PROPERTIES

We have considered the diffraction of the first-order Bessel beam by an amplitude zone plate with two open odd Fresnel zones. The paraxial approximation was used for numerical simulation. The parabolic equation was solved by the spectral method, based on a two-dimensional Fourier transform. The wavelength of radiation diffracting on the mask was $\lambda=632.8$ nm, and two odd Fresnel zones were open on a zone plate. The radius R_m of the Fresnel zone with the number m is

$$R_m = \sqrt{mF\lambda}, \quad (1)$$

where F is the zone plate focal length. A binary amplitude mask has the first Fresnel zone radius $R_1=0.96$ mm. The main focus is on the distance $z_1=R_1^2/\lambda=F=145$ cm. Additional focal spots were at the distances $z_2=F/3=48$ cm and $z_3=F/5=29$ cm. Figure 1 shows the mask with the first and ninth open Fresnel

с двумя открытыми нечетными зонами Френеля. Для численного моделирования использовалось параксиальное приближение. Параболическое уравнение решалось спектральным методом, основанным на двумерном преобразовании Фурье. Длина волны излучения, дифрагирующего на маске, составляла $\lambda=632,8$ нм, на зонной пластинке были открыты две нечетные зоны Френеля. Радиус зоны Френеля с номером m равен

$$R_m = \sqrt{mF\lambda}, \quad (1)$$

где F – фокусное расстояние зонной пластинки. Радиус первой зоны Френеля бинарной амплитудной маски был равен $R_1=0,96$ мм. Главный фокус располагался на расстоянии $z_1=R_1^2/\lambda=F=145$ см. Дополнительные фокусы располагались на расстоянии $z_2=F/3=48$ см и $z_3=F/5=29$ см. На рис. 1 представлено изображение маски с открытыми первой и девятой зонами Френеля. Аналогичная маска использовалась в работах [11, 12, 20].

Дифракция пучка Гаусса на зонной пластинке, изображенной на рис. 1, приводит к формированию цепочки световых капсул, образующих цепочноподобный пучок. Дифракция Бесселя первого порядка на той же зонной пластинке приводит к образованию цепочноподобного пучка с дислокацией волнового фронта. На рис. 2 показаны «дифракционные деревья» для первого и второго случаев. Как видно из рис. 2, основным различием между двумя пучками является наличие темного канала на оси пучка вдоль направления распространения. Присутствие темного канала свидетельствует о присутствии фазовой сингулярности.

С помощью численного моделирования дифракция пучка Бесселя первого порядка изучалась на зонных пластинах с различными нечетными открытыми зонами Френеля. На рис. 3 показаны «дифракционные деревья» пучка Бесселя первого порядка для зонной пластинки с первой и пятой открытыми зонами Френеля, для зонной пластинки с первой и девятой открытыми зонами Френеля и для зонной пластинки с первой и тринадцатой открытыми зонами Френеля. Параметры пучка Бесселя изменялись таким образом, чтобы обеспечить прохождение одинаковой энергии через каждую из двух открытых зон.

Как следует из рис. 3, номера выбранных зон влияют на продольный и поперечный размер капсул. Увеличение разницы между номерами зон приводит к уменьшению размера капсул. Все последующие численные расчеты проводи-

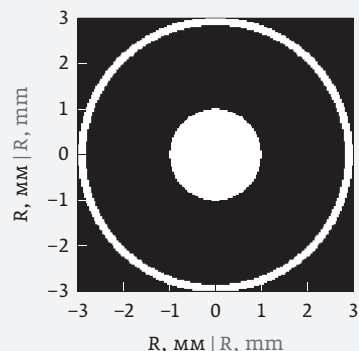


Рис. 1. Изображение бинарной амплитудной маски с первой и девятой открытыми зонами Френеля $F=145$ см
Fig. 1. The image of the binary amplitude mask with the first and ninth open Fresnel zones $F=145$ cm

zones. The same binary amplitude mask was used in [11, 12, 20].

Diffraction of a Gauss beam by the zone plate, depicted in Fig. 1, results in a chain of light capsules forming a chain-like beam. Diffraction of the first-order Bessel by the same zone plate leads to a chain-like beam with a wavefront dislocation. Figure 2

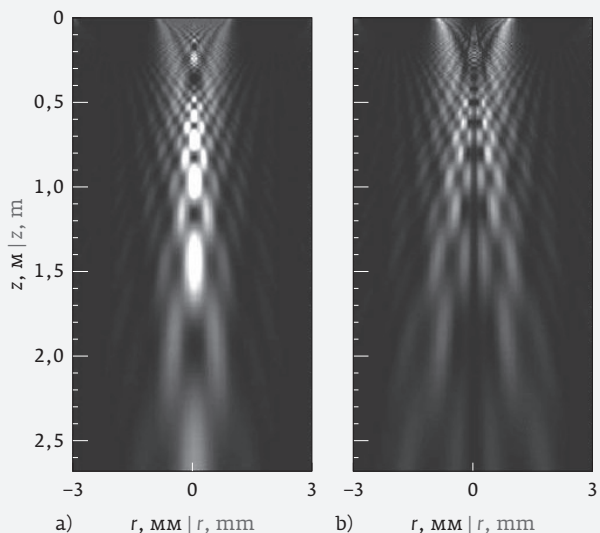


Рис. 2. «Дифракционные деревья» для зонной пластинки с первой и девятой открытыми зонами Френеля: а) дифракция пучка Гаусса; б) дифракция пучка Бесселя первого порядка

Fig. 2. Diffraction trees for the zone plate with the first and ninth open Fresnel zones, a) Gaussian beam diffracts, b) the first-order Bessel beam diffracts

лись с зонными пластинками с первой и девятой открытыми зонами Френеля, чтобы учесть параметры экспериментальной установки.

Относительное количество энергии, прошедшей через две открытые зоны бинарной амплитудной маски, зависит от ширины луча. Численно и экспериментально было показано, что уменьшение ширины пучка Гаусса приводит к увеличению размеров капсулы и глубины фокусировки, уменьшению интенсивности в области фокуса, но не влияет на положение капсулы [12]. Относительные доли энергии, прошедшей через две открытые зоны Френеля зонной пластины, различны для пучка Гаусса и пучка Бесселя первого порядка.

Рассмотрим влияние ширины пучка Бесселя первого порядка на поперечное и продольное распределение интенсивности пучка. Как видно из рис. 4, изменение ширины пучка Бесселя первого порядка приводит к изменению относительной доли энергии, проходящей через две открытые зоны Френеля. Если радиус первого кольца пучка Бесселя первого порядка равен 2,3 мм (рис. 4а), то значение энер-

shows diffraction trees for the first and the second cases. One can see from Fig. 2 that the main difference between the two beams is the presence of a dark channel at the beam axis along the propagation direc-

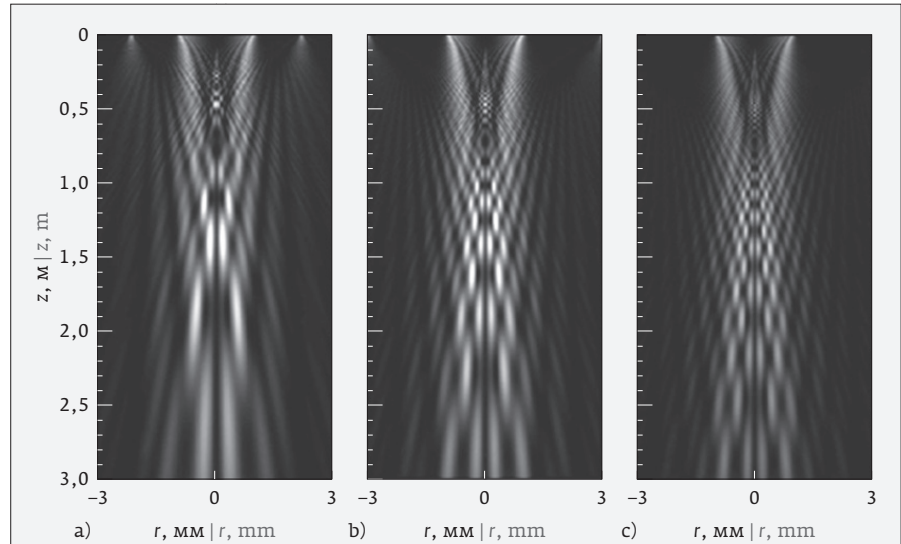


Рис. 3. «Дифракционные деревья» пучка Бесселя первого порядка для зонной пластинки с первой и пятой открытыми зонами Френеля (а), для зонной пластинки с первой и девятой открытыми зонами Френеля (b) и зонной пластинки с первой и тринадцатой открытыми зонами Френеля (с). Равное количество световой энергии проходило через каждую из двух открытых зон

Fig. 3. The first-order Bessel beam diffraction trees for the zone plate with the first and the fifth open Fresnel zones (a), for the zone plate with the first and the ninth open Fresnel zones (b), and the zone plate with the first and the thirteenth open Fresnel zones (c). An equal amount of light energy passes through two open zones

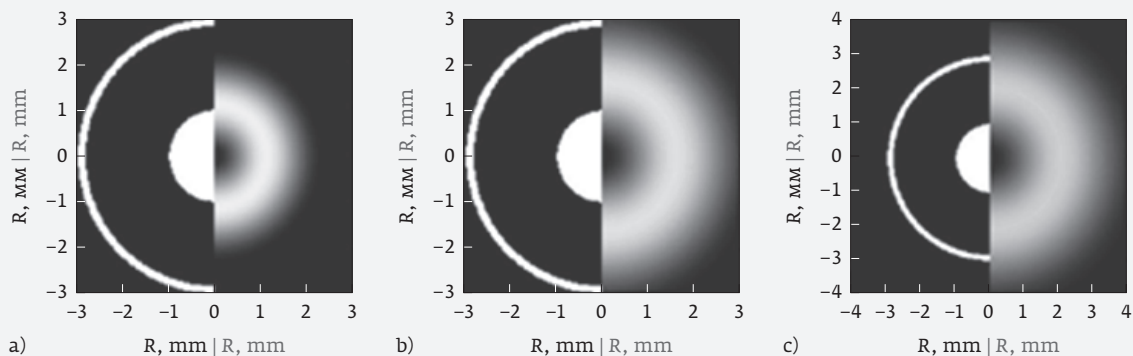


Рис. 4. Освещенность зонных пластинок с первой и девятой открытыми зонами Френеля пучком Бесселя первого порядка: а) $J_9/J_1=0$; б) $J_9/J_1=0,5$; в) $J_9/J_1=2,5$

Fig. 4. The illumination of the zone plates with the first and the ninth open Fresnel zones with the first order Bessel beam: а) $J_9/J_1=0$; б) $J_9/J_1=0.5$; в) $J_9/J_1=2.5$

гии, передаваемой через девятую зону, относительно энергии, передаваемой через первую зону $J_9/J_1=0$, будет равно нулю. Если радиус первого кольца равен 3,45 мм (рис. 4b) и 4,6 мм (рис. 4c), относительная доля энергии будет равна $J_9/J_1=0,5$ и $J_9/J_1=2,5$, соответственно.

На рис. 5 представлены «дифракционные деревья» пучка Бесселя первого порядка для пучка с радиусом первого кольца, равным 2,3 мм (рис. 5a), 3,45 мм (рис. 5b) и 4,6 мм (рис. 5c). Как видно из рис. 5, изменение радиуса первого кольца пучка Бесселя первого порядка, дифрагировавшего на зонной пластинке, приводит к изменению контраста между темными и светлыми участками цепочно-подобного пучка с фазовой сингулярностью. Если пучок Бесселя освещает только первую зону Френеля, «дифракционное дерево» будет похоже на дифракцию на круглой апертуре. Световые капсулы появляются при увеличении радиуса первого кольца пучка Бесселя. Если через первую и девятую зоны Френеля проходит равное количество энергии, то контраст между темными областями и светлыми капсулами будет максимальным.

Профили пучков на расстоянии 1,26 м для двух пучков с «дифракционными деревьями», изображенными на рис. 5b и рис. 5c, представлены на рис. 6. Пунктирные линии на рис. 5 показывают, что центр световой капсулы расположен на расстоянии 1,26 м. Из рис. 6 видно, что при увеличении значения параметра J_9/J_1 контрастность уменьшается.

Исследовано влияние фокусного расстояния зонной пластины на «дифракционное дерево» пучка. Радиусы первой и девятой зон изменялись в соответствии с уравнением (1), а параметры пучка Бесселя изменялись таким образом,

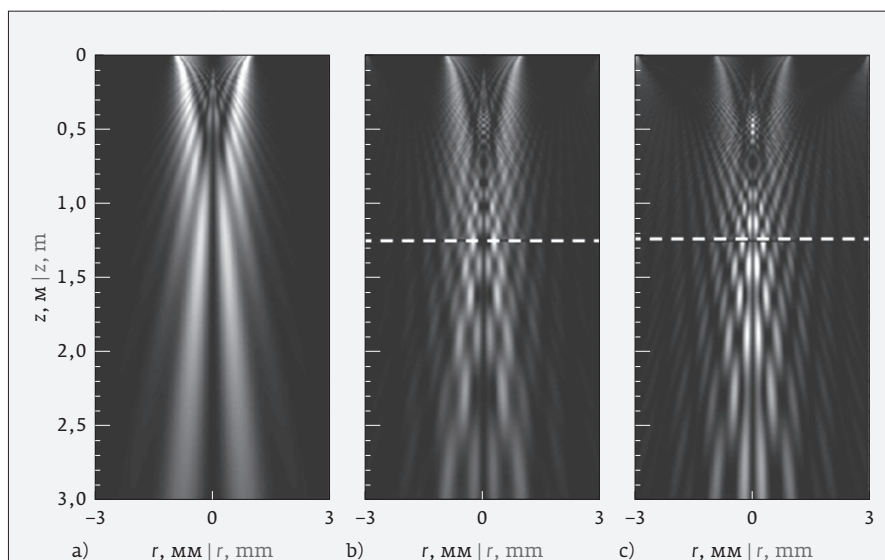


Рис. 5. «Дифракционные деревья» пучка Бесселя первого порядка для пучка с радиусом первого кольца равным 2,3 мм (a); 3,45 мм (b); 4,6 мм (c)

Fig. 5. The first-order Bessel beam diffraction trees for the beam with the radius of the first ring equal to 2.3 mm (a); 3.45 mm (b); 4.6 mm (c)

tion. The dark channel proves the phase singularity presence.

We have studied the first-order Bessel beam diffraction by the zone plates with the different odd open Fresnel zones by numerical simulations. Fig-

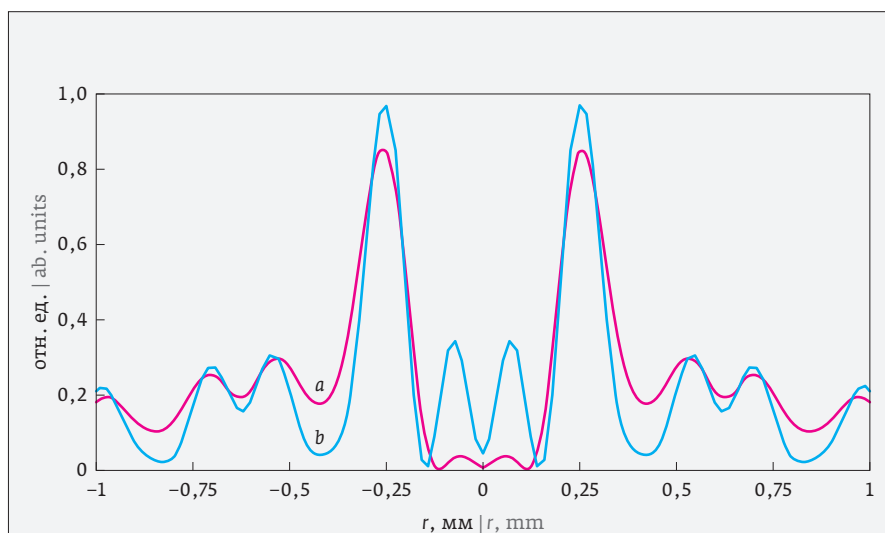


Рис. 6. Профиль цепочноподобного пучка на расстоянии 1,26 м для различного радиуса первого кольца пучка Бесселя: а) $J_9/J_1=0,5$, б) $J_9/J_1=2,5$

Fig. 6. The profile of the chain-like beam at a distance of 1.26 m for the different radius of the first Bessel beam ring: a) $J_9/J_1=0.5$, b) $J_9/J_1=2.5$



чтобы сохранить значение J_9/J_1 неизменным и равным 1. На рис. 7 представлены результаты компьютерного моделирования, пунктирной линией отмечено расстояние 1 метр от зонной пластинки. Из рисунка 7 видно, что увеличение фокусного расстояния зонной пластинки приводит к изменению размеров и положений капсул. Однако основные характеристики луча остаются неизменными. Таким образом, мы можем управлять размером и положением капсул, изменяя фокусное расстояние зонной пластинки.

Результаты компьютерного моделирования позволили выбрать параметры зонной пластинки и пучка Бесселя для генерации полых цепочноподобных пучков.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СОЗДАНИЕ ПОЛОГО ЦЕПЕОБРАЗНОГО ПУЧКА

На рис. 8 представлена схема экспериментальной установки, предназначенной для генерации и изучения свойств цепочноподобных пучков с фазовой сингулярностью.

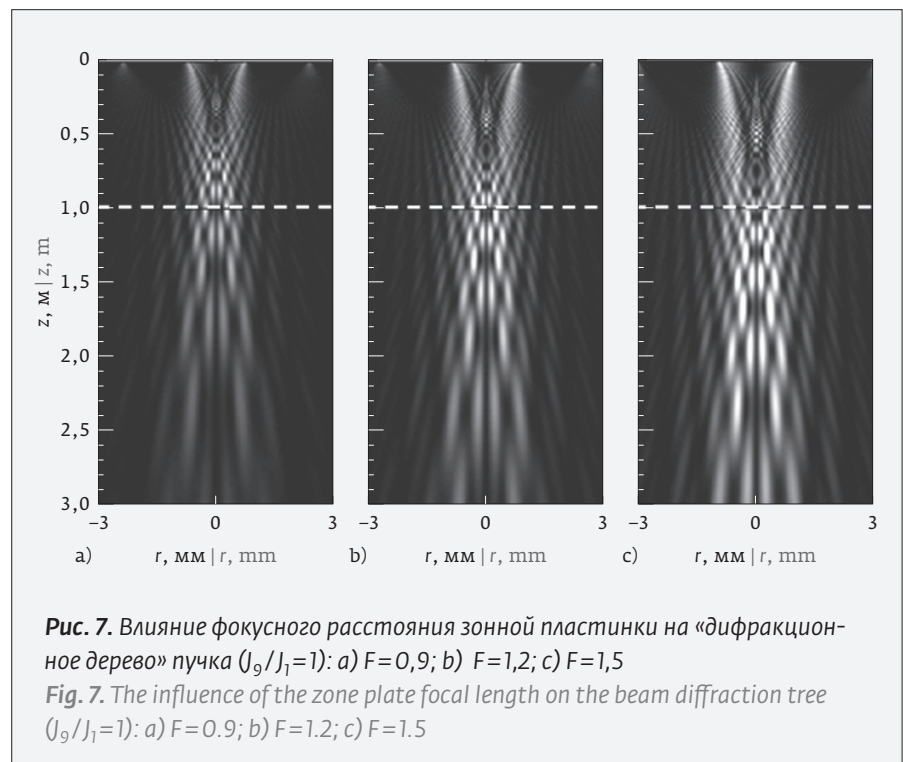
Две амплитудные маски являются ключевыми элементами экспериментальной установки. Первая маска – это амплитудная маска (маска Бесселя), полученная следующим образом. Два пучка, а именно пучок Гаусса и пучок Бесселя первого порядка, интерферировали в компьютерном эксперименте, а затем негативное изображение интерференционной картины печаталось в увеличенном размере. Распечатанное негативное изображение фотографировалось на пленку с высоким разрешением. Чтобы сгенерировать пучок Бесселя первого порядка, использовалась пленка размера $3,5 \times 2,5$ см². Вторая маска представляет собой бинарную амплитудную маску размером $3,5 \times 2,5$ см² с первой и девятой открытыми зонами Френеля и радиусом первой зоны Френеля $R_1 = 0,96$ мм, сгенерированную на компьютере (256×256 пикселей) и напечатанную на прозрачной пленке с разрешением 600 точек на дюйм (рис. 2). Для генерации пучка использовалось излучение He-Ne лазера с длиной волны 632,8 нм и мощностью 1,5 мВт.

Figure 3 shows the first-order Bessel beam diffraction trees for the zone plate with the first and the fifth open Fresnel zones, for the zone plate with the first and the ninth open Fresnel zones, and for the zone plate with the first and the thirteenth open Fresnel zones. We altered the Bessel beam parameters to allow an equal energy amount to pass through each zone.

One can see from Fig. 3 that the number of chosen zones influences the capsule's longitudinal and transversal size. The increase in the difference between the zones numbers results in a decrease in the capsule size. Considering our experimental setup, we have carried out all the following numerical simulations with the zone plates with the first and the ninth open Fresnel zones.

The relative amount of energy passed through two open zones of a binary amplitude mask depends on the beam width. It has been demonstrated numerically and experimentally that a decrease in the Gaussian beam width increases the capsule sizes and the focus depth, decreases the intensity in the focus's region, and does not affect the capsule position [12]. The relative portions of energy passed through two open Fresnel zone of the zone plate are different for a Gaussian beam and the first-order Bessel beam.

Let us consider how the first-order Bessel beam width influences the beam transverse and longitu-



Лазерный пучок с помощью оптической системы расширялся до 3 см. Расширенный коллимированный когерентный монохроматический свет взаимодействовал с маской Бесселя. Дифрагированный пучок фокусировался, и в фокальной плоскости с помощью диафрагмы из дифрагированного пучка выделялся нужный порядок дифракции. Выделенный пучок Бесселя первого порядка коллимировался и взаимодействовал со второй амплитудной маской. Значение J_9/J_1 было равно 7. Поперечное сечение полученного цепочноподобного пучка с фазовой сингулярностью регистрировалось с помощью ПЗС-камеры на различных расстояниях распространения. ПЗС-камера (VEC-545) с площа-

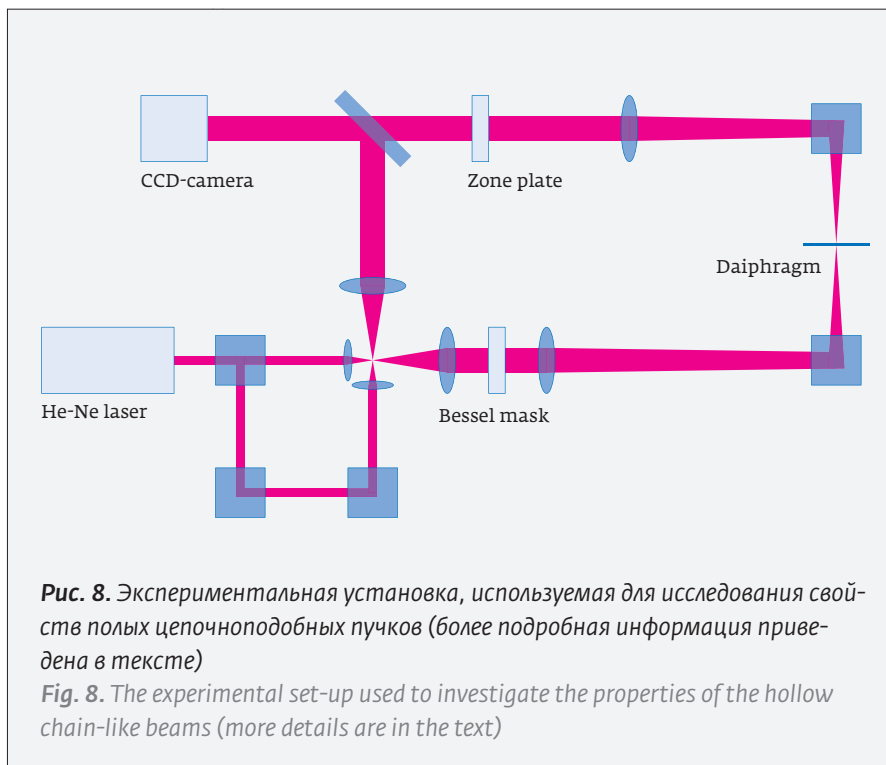


Рис. 8. Экспериментальная установка, используемая для исследования свойств полых цепочноподобных пучков (более подробная информация приведена в тексте)

Fig. 8. The experimental set-up used to investigate the properties of the hollow chain-like beams (more details are in the text)

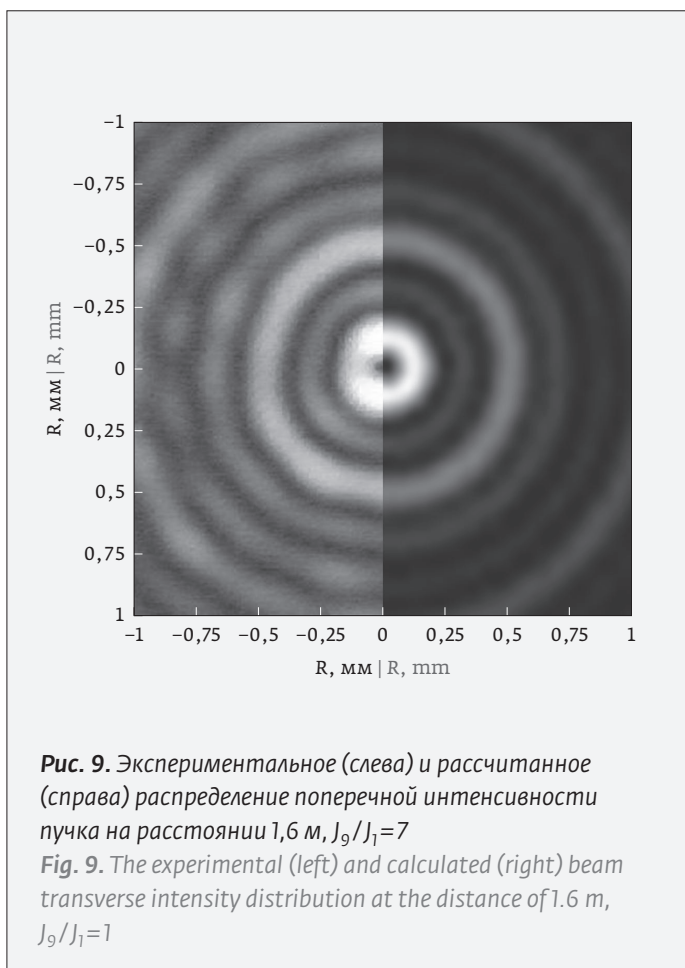


Рис. 9. Экспериментальное (слева) и рассчитанное (справа) распределение поперечной интенсивности пучка на расстоянии 1,6 м, $J_9/J_1=7$

Fig. 9. The experimental (left) and calculated (right) beam transverse intensity distribution at the distance of 1.6 m, $J_9/J_1=7$

dinal intensity distribution. One can see from Fig. 4 that the alteration of the first-order Bessel beam width results in the change of the relative portions of energy passed through two open Fresnel zone. If the radius of the first ring of the first-order Bessel beam is equal to 2.3 mm (Fig. 4a), the value of the energy transmitted through the ninth zone relative to the energy transmitted through the first zone $J_9/J_1=0$ will be equal to zero. If the radius of the first ring is equal to 3.45 mm (Fig. 4b) and 4.6 mm (Fig. 4c), the relative energy will be $J_9/J_1=0.5$ and $J_9/J_1=2.5$, respectively.

Figure 5 shows the first-order Bessel beam diffraction trees for the beam with the radius of the first ring equal to 2.3 mm (Fig. 5a), 3.45 mm (Fig. 5b), and 4.6 mm (Fig. 5c).

One can see from Fig. 5 that the alteration of the first ring radius of a first-order Bessel beam, diffracted by the zone plate, results in the change of the contrast between the dark and the light areas of the chain-like beam with the phase singularity. If the Bessel beam illuminates only the first Fresnel zone, the diffraction tree will be similar to the diffraction by a circular aperture. Light capsules appear if the first ring radius of the Bessel beam increase. If equal energy passes through the first and the ninth Fresnel zones, the contrast between the dark regions and the light capsules will be maximal.

The beam profiles at the distance of 1.26 m for two beams with diffraction trees depicted in Fig. 5b and

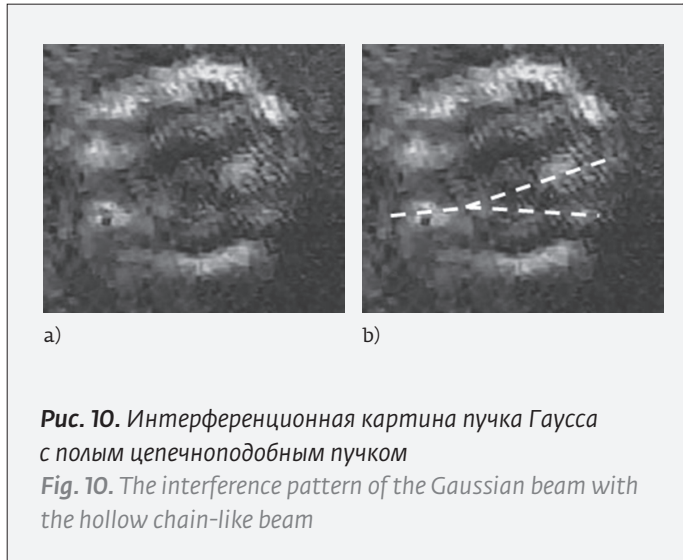


Рис. 10. Интерференционная картина пучка Гаусса с полым цепочноподобным пучком

Fig. 10. The interference pattern of the Gaussian beam with the hollow chain-like beam

дью изображения $5,81 \times 4,29$ мм² и пиксельными элементами 2592×1944 , каждый пиксел размером примерно 2,2 мкм.

На рис. 9 показано поперечное распределение интенсивности пучка на расстоянии 1,6 м. Левая половина изображения – это экспериментальное изображение, а правая половина – рассчитанное изображение на том же расстоянии от маски и $J_9/J_1=7$. Рис. 9 демонстрирует достаточно хорошее соответствие между экспериментальными и рассчитанными распределениями интенсивности.

Чтобы доказать наличие дислокаций в исследуемом пучке, в экспериментальную установку были добавлены оптические элементы, образующие интерферометр. Лазерный пучок был разделен на два пучка. Первый пучок использовался для генерации исследуемого пучка, а второй пучок, расширенный и коллимированный, интерферировал с исследуемым пучком. На рисунке 10 показана интерференционная картина пучка Гаусса с полым цепочноподобным пучком. Интерференционные картины на рис. 10а и 10б одинаковы, но пунктирная линия на рис. 10б показывает положение «вилки». Вилкообразная дислокация (рис. 10) с разницей в одно плечо соответствует фазовому прокручиванию вокруг центра вихря на 2π и доказывает присутствие фазовой дислокации в пучке.

С помощью ПЗС-матрицы было зарегистрировано распределение интенсивности полого цепочноподобного пучка на расстояниях от 100 до 201 см с шагом 1 см. Чтобы получить «дифракционное дерево», экспериментально зарегистрированные распределения интенсивности

Fig. 5c are presented in Fig. 6. The dashed lines in Fig. 5 show that the center of the light capsule is located at a distance of 1.26 m. One can see from Fig. 6 that if the value of J_9/J_1 increases, the contrast decreases.

We have researched the influence of the zone plate focal length on the beam diffraction tree. We have changed the radii of the first and the ninth zone according to Eq. (1) and altered the Bessel beam parameters in such a way as to keep the value J_9/J_1 unchanged and equal to 1. Figure 7 shows the results of the computer simulation. The dashed line marks the distance of 1 meter from the zone plate. One can see from Fig. 7 that the increase in the zone plate focal length leads to a change in the sizes and positions of capsules. However, the main beam features remain unchanged. So, we can control the capsule's size and position by changing the zone plate focal length.

The computer simulation has allowed us to choose the parameter of the zone plate and the Bessel beam to generate the hollow chain-like beams.

EXPERIMENTAL GENERATION OF THE HOLLOW CHAIN-LIKE BEAM

Figure 8 shows the experimental set-up designed to generate and study the properties of the chain-like beams with a phase singularity.

Two amplitude masks are the key elements of the setup. The first mask is an amplitude mask (the Bessel mask) obtained in the following way. We interfered two

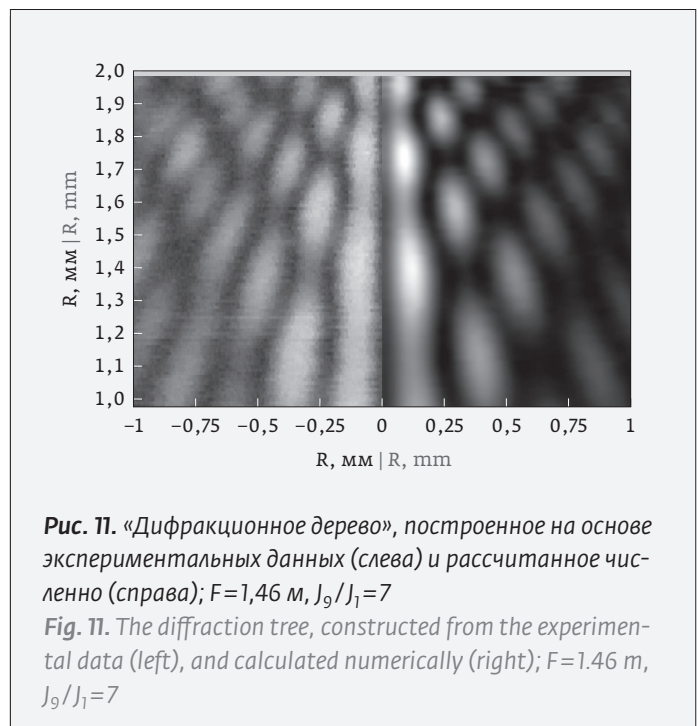


Рис. 11. «Дифракционное дерево», построенное на основе экспериментальных данных (слева) и рассчитанное численно (справа); $F=1,46$ м, $J_9/J_1=7$

Fig. 11. The diffraction tree, constructed from the experimental data (left), and calculated numerically (right); $F=1,46$ м, $J_9/J_1=7$



обрабатывались следующим образом. Из каждого изображения выделялся участок, соответствующий диаметру пучка таким образом, чтобы толщина каждого участка соответствовала одному пикселю ПЗС-камеры (в реальном случае). Затем, размещая их последовательно в порядке возрастания расстояния z , формировали изображение, представляющее часть «дифракционного дерева» исследуемого пучка. В левой части рис. 11 представлены обработанные экспериментальные данные. В правой половине рис. 11 показано «дифракционное дерево», рассчитанное численно при тех же параметрах. Как видно из рис. 11, «дифракционное дерево», построенное на основе экспериментальных данных, отображает основные характеристики «дифракционного дерева», рассчитанного численно, световой пучок напоминает цепочную структуру, а темный канал на оси пучка свидетельствует о наличии вихря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследована дифракция пучка Бесселя первого порядка на зонных пластинках с двумя открытыми нечетными зонами Френеля. Результатом дифракции является цепочноподобный пучок со встроенной дислокацией волнового фронта или полый цепочноподобный пучок. Численно показано, что номер второй открытой нечетной зоны Френеля влияет на продольный и поперечный размер капсулы; а именно увеличение разницы между номерами зон приводит к уменьшению размера капсулы. Изменение фокусного расстояния зонной пластинки приводит к изменению размера капсулы; изменение относительной освещенности двух зон приводит к изменению контраста между темными и светлыми областями. Одинаковое количество энергии, проходящей через каждые две зоны, обеспечивает наилучший контраст. Полый цепочноподобный пучок экспериментально получен в результате дифракции пучка Бесселя первого порядка на зонной пластинке с открытыми первой и девятой зонами Френеля. Экспериментально доказано присутствие дислокации волнового фронта и исследованы основные характеристики пучка; сравнение результатов численного расчета и экспериментально полученных результатов демонстрирует достаточно хорошее соответствие. Итак, предложен новый метод генерации полого цепочноподобного пучка, новый метод реализован экспериментально.

beams, namely, a Gaussian beam and a first-order Bessel beam in a computer experiment and then printed the negative image of the interference pattern in an enlarged size. The printed negative image was photographed using a film with high resolution. To generate the first-order Bessel beam, we used that film $3.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ in size. The second mask is a binary amplitude mask $3.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ in size with the first and ninth open Fresnel zones and the first Fresnel zone radius $R_1 = 0.96 \text{ mm}$, generated on the computer (256×256 pixels) and further printed on the transparency with resolution 600 dpi (Fig. 2). We used the output of a He-Ne laser with a wavelength of 632.8 nm and a power of 1.5 mW.

We expanded the laser beam by an optical system to a width of 3 cm. The expanded collimated coherent monochromatic light interacted with the Bessel mask. The diffracted beam was focused to select the proper order from the diffracted beam in the focal plane by diaphragm. The selected first-order Bessel beam was collimated and interacted with the second amplitude mask. The value J_9/J_1 was equal to 7. We registered the cross section of the resulting chain-like beam with the phase singularity by a CCD camera at different propagation distances. The CCD camera (VEC-545) with an image area of $5.81 \times 4.29 \text{ mm}^2$ and pixel elements of 2592×1944 , each pixel of about $2,2 \text{ }\mu\text{m}$.

Figure 9 shows the beam transverse intensity distribution at a distance of 1.6 m. The left half of the image is the experimental image, and the right half is the calculated image at the same distance from the mask and $J_9/J_1 = 7$. Figure 9 demonstrates a reasonably good agreement between the experimental and calculated intensity distribution.

We have installed additional optical elements forming an interferometer into the experimental setup to prove the dislocation presence in the beam under investigation. We have split the laser beam into two ones. The first beam has been used to obtain the beam under investigation, and the second beam expanded and collimated, has interfered with the beam under investigation. Figure 10 shows the interference pattern of the Gaussian beam with the chain-like beam with the phase singularity. The interference patterns are the same, but a dashed line in Fig. 10 b shows a “fork” position. A fork-like dislocation (Fig. 10) with a difference of one arm corresponds to phase winding by 2π around the vortex core and proves the vortex presence in the beam.

Using a CCD matrix, the intensity distribution of the hollow chain-like beam has been recorded at distances ranging from 100 to 201 cm with a step of 1 cm. We have processed the experimentally recorded diffraction patterns to obtain the diffraction tree in



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Forbes A.** Structured Light from Lasers. *Laser Photonics Rev.* 2019;13(11):1–19. DOI:10.1002/lpor.201900140.
2. **Orlov S, Vosylius V, Gotovski P, Grabusovas A, Baltrukonis J, Gertus T.** Vector beams with parabolic and elliptic cross-sections for laser material processing applications. *J Laser Micro Nanoeng.* 2018;13(3):280–6. DOI:10.2961/jlmn.2018.03.0023.
3. **Möhl A, Kaldun S, Kunz C, Müller FA, Fuchs U, Gräf S.** Tailored focal beam shaping and its application in laser material processing. *J Laser Appl.* 2019;31(4):042019. DOI:10.2351/1.5123051.
4. **Gao D, Ding W, Nieto-Vesperinas M, Ding X, Rahman M, Zhang T, et al.** Optical manipulation from the microscale to the nanoscale: Fundamentals, advances and prospects. *Light Sci Appl.* 2017;6: e17039. DOI:10.1038/lsa.2017.39.
5. **Otte E, Denz C.** Optical trapping gets structure: Structured light for advanced optical manipulation. *Appl Phys Rev.* 2020;7(4): 041308. DOI:10.1063/5.0013276.
6. **Alpmann C, Schöler C, Denz C.** Elegant Gaussian beams for enhanced optical manipulation. *Appl Phys Lett.* 2015;106(24): 241102. DOI:10.1063/1.4922743.
7. **Willner AE, Liu C.** Perspective on using multiple orbital-angular-momentum beams for enhanced capacity in free-space optical communication links. *Nanophotonics.* 2020;10(1):225–33. DOI:10.1515/nanoph-2020-0435.
8. **Willner AE, Pang K, Song H, Zou K, Zhou H.** Orbital angular momentum of light for communications. *Appl Phys Rev.* 2021;8(4):041312. DOI: 10.1063/5.0054885.
9. **Wang J, Liu J, Li S, Zhao Y, Du J, Zhu L.** Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications. *Nanophotonics.* 2022;11(4):645–80. DOI:10.1515/nanoph-2021-0527.
10. **Xian M, Xu Y, Ouyang X, Cao Y, Lan S, Li X.** Segmented cylindrical vector beams for massively-encoded optical data storage. *Sci Bull [Internet].* 2020;65(24):2072–9. DOI:10.1016/j.scib.2020.07.016.
11. **Calvo ML, Rodrigo JA, Alieva T.** Generation of chain like beams. *ICO20 Opt Inf Process.* 2006;6027(60270):60270Z. DOI:10.1117/12.667925.
12. **Kundikova N.D., Ryzhkova A. V., Alieva T., Calvo M. L., Rodrigo J. A.** Экспериментальное создание и исследование структуры «цепочно-образных» пучков. *Оптика и спектроскопия.* 2008;104(5):834–8. Кундикова Н. Д., Рыжкова А. В., Алиева Т., Калво М. Л., Родриго Ж. А. Экспериментальное создание и исследование структуры «цепочно-образных» пучков. *Оптика и спектроскопия.* 2008;104(5):834–8.
13. **Ferrando V., Calatayud A., Giménez F., Furlan W. D., Monsoriu J. a.** Cantor dust zone plates. *Opt Express.* 2013;21(3):2701–6. DOI:10.1364/OE.21.002701.
14. **Mendoza-Yero O., Fernández-Alonso M., Mínguez-Vega G., Lancis J., Climent V., Monsoriu J. A.** Fractal generalized zone plates. *J Opt Soc Am A [Internet].* 2009 May 1;26(5):1161–6. DOI:10.1364/JOSAA.26.001161.
15. **Liberman V. S., Zel'dovich B. Y.** Spin-orbit interaction of a photon in an inhomogeneous medium. *Phys Rev A.* 1992;46(8):5199–207. DOI:10.1103/PhysRevA.46.5199.
16. **Dooghin A. V., Kundikova N. D., Liberman V. S., Zeldovich B. Y.** Optical Magnus effect. *Phys Rev A.* 1992;45(11):8204–8. DOI:10.1103/PhysRevA.45.8204.
17. **Abdulkareem S., Kundikova N.** Joint effect of polarization and the propagation path of a light beam on its intrinsic structure. *Opt Express.* 2016;24(17):19157–65. DOI: 10.1364/OE.24.019157.
18. **Tao S. H., Yuan X. C., Lin J., Burge R. E.** Sequence of focused optical vortices generated by a spiral fractal zone plate. *Appl Phys Lett.* 2006;89(3): 031105. DOI:10.1063/1.2226995.
19. **Heckenberg N. R., McDuff R., Smith C. P., White A. G.** Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms. *Opt Lett.* 1992;17(3):221–3. DOI:10.1364/OL.17.000221.
20. **Cherepko D. Y., Kundikova N. D., Popkov I. I., Alieva T.** Chain-like beams with phase singularity. *Proceedings of SPIE.* 2011;8011:80115Y-7. DOI:10.1117/12.902110.

АВТОРЫ

Черепко Дмитрий Юрьевич, студент магистратуры, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
 Попков Иван Игоревич, к. ф.-м. н., науч. сотр., Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
 ORCID:0009-0008-4259-4376
 Кундикова Наталия Дмитриевна, д. ф.-м. н., профессор, зав лабораторией, Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург; зав кафедрой, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
 ORCID: 0000-0002-5880-9393

the following way. A section fitting the length of the beam diameter has been selected from every diffraction pattern so that the thickness of each section corresponds to one pixel of the CCD camera (in the actual case). Then, placing them consecutively in the growing order of z , the image representing a part of the diffraction tree of the beam under investigation has been built up. The left part of Fig. 11 presents the processed experimental data. The right half of Fig. 11 shows the diffraction tree calculated numerically under the same parameters. One can easily see from Fig. 11 that the diffraction tree, constructed from the experimental data, depicts the main features of the diffraction tree calculated numerically, the light beam resembles a chain-like structure, and the dark channel on the beam axis demonstrates the vortex presence.

CONCLUSIONS

In summary, we have studied the diffraction of the first-order Bessel beam by zone plates with two odd open Fresnel zone. The result of the diffraction is a chain-like beam with embedded wavefront dislocation or a hollow chain-like beam. We have shown numerically that the number of the second odd open Fresnel zone influences the capsule's longitudinal and transversal size; namely, the increase of the difference between the zone numbers leads to a decrease in the capsule size. The change in the focal length of the zone plate results in the capsule size changing; the variation of the relative illumination leads to the alteration of the contrast between dark and light regions. The equal energy passed through each two zone results in the best contrast. We have experimentally generated a hollow chain-like beam using the first-order Bessel beam diffraction by zone plates with the first and the ninth open Fresnel zones. We experimentally have proved the dislocation presence and studied the main features of the beam; a comparison of numerically calculated results and experimentally obtained results demonstrate sufficiently good agreement. So, we proposed a new approach to hollow chain-like beam generation and used this approach to generate the beam experimentally.

AUTHORS

Cherepko Dmitry Yurievich, Graduate Student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
 Popkov Ivan Igorevich, Candidate of Sciences (Phys.&Math.), Researcher, Institute of Electrophysics, Ural Branch of The Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
 ORCID:0009-0008-4259-4376
 Kundikova Natalia Dmitrievna, Dr. of Sciences (Phys.&Math.), professor, Head of laboratories, Institute of Electrophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg; Head of department, South Ural State University,