

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ В ВИДЕ КРИВЫХ НА ОСНОВЕ ОПТИКИ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ

© 2009 К.Н. Афанасьев¹, В.Г. Волостников¹, Е.Н. Воронцов¹, С.П. Котова⁴,
В.В. Патлань², Е.В. Разуева¹

¹Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

²Тольяттинский государственный университет

Поступила в редакцию 30.12.2008

В численных и натуральных экспериментах проведено сравнение двух способов формирования световых полей с распределением интенсивности в виде заданных кривых посредством фазовых элементов. Основной метод является оптика спиральных пучков света. Эксперименты выполнены с помощью отражающего пространственного жидкокристаллического модулятора. Найдено, что однородность световых полей, сформированных фазовыми элементами, полученными на основе итерационного алгоритма, выше в несколько раз (от 1,6 до 4,8) по сравнению со световыми полями, сформированными элементами, реализующими фазовое распределение спирального пучка без итераций. Энергетическая эффективность после итерационной процедуры больше примерно в 1,2 – 2,3 раза, соответственно.

Ключевые слова: дифракционная оптика, спиральные пучки света, дифракционные фазовые элементы.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1-3] развита теория оптических полей, которые сохраняют свою пространственную структуру при распространении с точностью до масштаба и поворота. Данные поля названы авторами спиральными пучками света. В частном случае спиральный пучок может иметь вид произвольной замкнутой кривой (рис. 1).

Авторы показали [4], что с помощью фазовых частей спиральных пучков можно формировать поля, не обладающие структурной устойчивостью, но подобные по структуре соответствующим спиральным пучкам. Распределения интенсивности таких полей в дальней зоне дифракции близки по форме к образующим кривым, но имеют значительные неоднородности. Модифицирование фазового распределения спирального пучка при помощи итерационного алгоритма Герчберга-Сэкстона [5] позволяет улучшить

распределения интенсивности формируемых полей. Авторами выполнено численное моделирование, а также проведены натурные эксперименты по формированию полей с помощью дифракционных оптических элементов, изготовленных на слоях бихромированной желатины. В работе получено достаточное хорошее качественное соответствие теоретических и экспериментальных результатов, однако анализ параметров наблюдаемых полей авторами выполнен не был.

В данной работе проведено численное моделирование особенностей формирования световых полей при помощи фазовых элементов, расчет которых основан на оптике спиральных пучков и исследованы количественные характеристики распределений интенсивностей полей, полученных экспериментально при помощи жидкокристаллического пространственного модулятора. Это позволило сравнить параметры световых полей, формируемых фазовыми элементами, реализующими фазовые части спиральных пучков и фазовыми элементами, полученными на основе оптики спиральных пучков итерационным способом.

1. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОЙ ЧАСТИ СПИРАЛЬНОГО ПУЧКА

В работе [1] рассмотрены основные принципы формирования спиральных пучков с распределением интенсивности в форме замкнутых кривых. Теоретически можно получить пучок с распределением интенсивности в форме любой замкнутой кривой. Для этого необходимо выбрать так называемую порождающую (образую-

Афанасьев Кирилл Николаевич, младший научный сотрудник.

E-mail: afanasiev@fian.smr.ru.

Волостников Владимир Геннадиевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией.

E-mail: coherent@fian.smr.ru

Воронцов Евгений Николаевич, инженер.

E-mail: vorontsoven@fian.smr.ru

Котова Светлана Павловна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией.

E-mail: kotova@fian.smr.ru.

Патлань Всеволод Вадимович, PhD, старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики.

E-mail: seva@tltsu.ru

Разуева Евгения Вадимовна, младший научный сотрудник.

E-mail: eugeniarazieva@yandex.ru

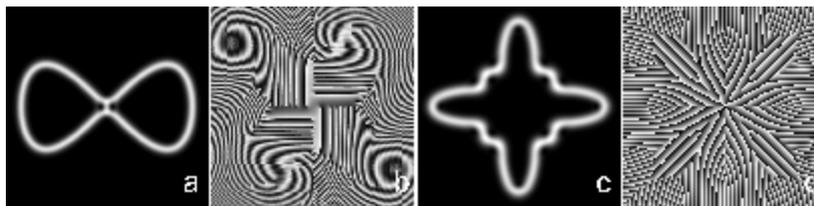


Рис. 1. Примеры спиральных пучков света: а, с – распределения интенсивности, b, d – распределения фазы (чёрный цвет – 0, белый – 2π).

щую) кривую, т.е. кривую, в форме которой мы хотим получить пучок, и задать ее в комплексно-параметрическом виде:

$$\xi(t) = u(t) + iv(t),$$

где t – параметр.

А затем построить поле S согласно формуле:

$$\begin{aligned} S(z, \bar{z} | \xi(t), t \in [0, T]) = & \\ = \exp\left(-\frac{z\bar{z}}{\rho^2}\right) \int_0^T \exp\left\{-\frac{\xi(t)\bar{\xi}(t)}{\rho^2} + \frac{2z\bar{\xi}(t)}{\rho^2} + \right. & \\ \left. + \frac{1}{\rho^2} \int_0^t [\bar{\xi}(\tau)\xi'(\tau) - \xi(\tau)\bar{\xi}'(\tau)] d\tau\right\} |\xi'(t)| dt & \end{aligned}$$

Один из методов практической реализации спиральных пучков света основан на применении амплитудно-фазовых элементов. Ранее в работе [4] было показано, что фазовую часть спирального пучка можно использовать для формирования поля, которое имеет в Фурье-плоскости распределение интенсивности в виде образующей кривой. Очевидно, что такое поле не является спиральным пучком света. В экспериментах, выполненных авторами, было выяснено, что формируемое распределение интенсивности неоднородно.

Из общих соображений следует, что формирование поля в виде заданной кривой предполагает:

А) достижение как можно более высокой однородности интенсивности вдоль заданной кривой;

В) попадание значительной доли мощности сформированного поля в некоторую ε -окрестность кривой.

В соответствии с этим в качестве критериев оценки распределений интенсивностей полей были выбраны следующие параметры:

1. Среднеквадратичное отклонение интенсивности вдоль генерирующей кривой:

$$RMS_I = \frac{1}{\langle I \rangle} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (I_i - \langle I \rangle)^2},$$

где $\langle I \rangle$ – среднее значение интенсивности, I_i – значение интенсивности в i -й точке образующей кривой, N – количество точек. Данный параметр позволяет оценить однородность распределения интенсивности.

2. Отношение минимальной интенсивности I_{\min} к максимальной I_{\max} вдоль кривой:

$$\mu = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}.$$

В случае существования разрывов в распределении интенсивности данный параметр обращается в нуль.

3. Отношения мощности, попадающей в ε -окрестность образующей кривой, к мощности пучка в плоскости наблюдения:

$$\eta = \frac{P_\varepsilon}{P}.$$

Очевидно, что чем выше данный показатель и чем меньше ε -окрестность, тем больше соответствует распределение интенсивности понятию “поле в виде кривой”.

С точки зрения данных параметров были исследованы распределения интенсивности, которые формируются фазовыми частями спиральных пучков в форме границ правильного треугольника и квадрата (рис. 2). Нами рассмотрен практически важный случай освещения данных элементов однородным пучком с круглой апертурой.

Ввиду того, что при формировании спирального пучка наряду с фазовым элементом используется амплитудный транспарант, было сделано предположение о влиянии диаметра освещающего пучка на характер распределения интенсивности поля, получаемого с помощью элемента, реализующего фазовую часть спирального пучка.

На рис. 3 представлены графики зависимости параметров RMS_I , μ и η от безразмерного параметра α , равного отношению радиуса освещающего пучка к радиусу окружности, описанной вокруг образующей кривой. Видно, что в диапазоне значений α от 1,2 до 1,3 наблюдается оптимальное соотношение между однородностью и энергетической эффективностью для пучка с распределением интенсивности в форме треугольника. Для пучка с распределением интенсивности в форме квадрата данный диапазон составляет 1,3-1,5.

Эксперименты по формированию полей рассматриваемым способом были выполнены с помощью жидкокристаллического пространственного модулятора света HOLOEYE NEO 1080 P



Рис. 2. Распределение интенсивности и фазы спиральных пучков в форме треугольника (a, b) и квадрата (c, d)

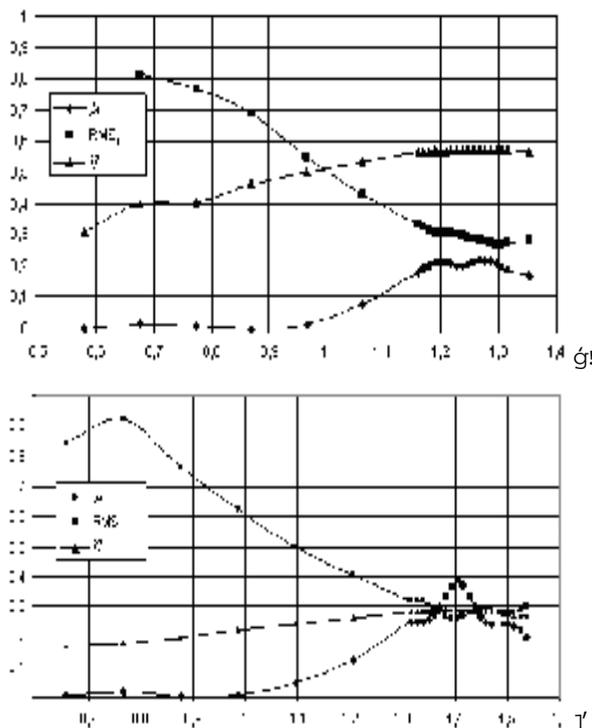


Рис. 3. Зависимость параметров RMS_I , μ и η от отношения радиуса апертуры освещающего пучка к радиусу окружности, описанной вокруг образующей кривой:

а – для пучка с распределением интенсивности в форме треугольника, б – квадрата

(1920 г 1080, шаг пикселей 8 мкм, величина максимальной модуляции фазы 2π , число градаций фазы – 256 (8 bit)) и твердотельного лазера с длиной волны излучения 530 нм. Регистрация интенсивности полей осуществлялась на матрицу цифрового фотоаппарата в линейном режиме. Параметры оценки полученного распределения интенсивности, рассмотренные выше, вычислялись с помощью обработки фотографий посредством специально разработанных программ.

Для дифракционных оптических элементов с фазами, соответствующими спиральным пучкам с распределениями интенсивности в форме треугольника и квадрата, параметры освещающих пучков ξ равнялись 1,26 и 1,4, соответственно. Характеристики полученных распределений интенсивности (рис. 4) приведены в табл. 1 и хорошо согласуются с теоретическими.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ФАЗОВОГО ЭЛЕМЕНТА

Улучшения характеристик получаемых распределений интенсивности можно добиться, если модифицировать фазовые распределения соответствующих спиральных пучков. Авторы предлагают использовать для этого итерационный алгоритм Герчберга-Сэкстона, в котором нулевое приближение фазы поля во входной плоскости выбрано в виде фазы соответствующего спирального пучка [5].

Численный эксперимент и реальная экспериментальная реализация показывают, что поле, формируемое фазовым элементом, рассчитанным итерационным способом, действительно обладает более высокими показателями однородности и энергетической эффективности (см. рис. 5 и табл. 2) при аналогичных параметрах освещающего пучка.

Одной из возможных областей применений полей в виде кривых являются лазерные технологические системы. В этом случае требуется изготовить фазовый элемент, который обладает высокой лучевой прочностью, будет воспроизводить нужное пространственное распределение фазы и формировать в дальней зоне дифракции поле в виде кривой. Такие оптические элементы можно изготовить, например, методом ионной литографии на стекле. При этом важным параметром является число градаций фазы, которое требуется воспроизвести. Ранее численно было показано [5], что для качественного формирования поля требуется реализация 4-х и более уровней дискретизации. В данной работе численно промоделированы и экспериментально сформированы поля при помощи фазовых элементов с дискретным фазовым профилем. Фазовые распределения воспроизводились при помощи ПМС. Полученные результаты (рис. 6) показывают, что для элементов данного типа при реализации 4-х и более уровней градаций фазы среднеквадратичное отклонение интенсивности формируемого поля не превышает 5 %.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено численное моделирование и исследованы количественные харак-

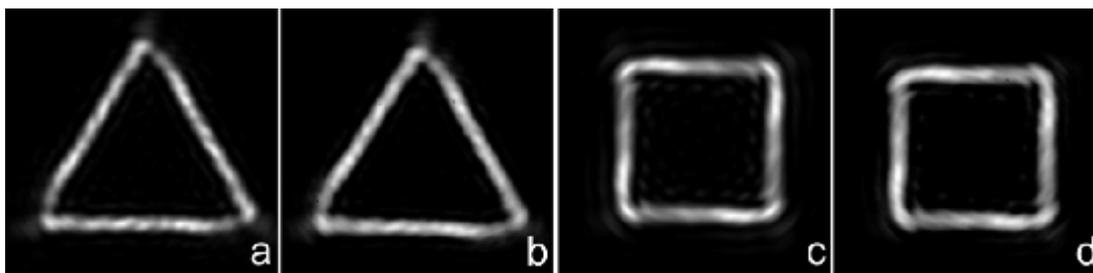


Рис. 4. Распределения интенсивности полей, формируемых с помощью фазовых элементов, реализующих фазовые части спиральных пучков:
а, с – теоретические распределения, b, d – экспериментальные

Таблица 1. Экспериментальные и теоретические характеристики распределений интенсивностей пучков, формируемых с помощью фазовых элементов, реализующих фазовые части спиральных пучков

Параметры	"Треугольник", $\xi=1.26, \varepsilon=0.18\rho$		"Квадрат", $\xi=1.4, \varepsilon=0.10\rho$	
	численно	эксперим.	численно	эксперим.
однородность, μ	0,22	0,28	0,38	0,27
RMS_I	0,28	0,21	0,27	0,26
доля мощности, η^*	0,56	-	0,29	-

* Здесь и в таблице 2 экспериментальные значения доли мощности η не приводятся, т.к. их не удалось достоверно измерить из-за недостаточного динамического диапазона фотоприемника

теристики распределений интенсивностей полей, полученных экспериментально при помощи пространственного модулятора света. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования. Найдено, что однородность световых полей, сформированных фазовыми элементами, полученными на основе итерационного алгоритма, выше в несколько раз (от 1,6 до 4,8) по сравнению со световыми полями, сформированными элементами, реализующими фазовое распределение спирального пучка. Энергетическая эффективность при этом больше примерно в 1,2 – 2,3 раза, соответственно.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 01200805602 и при поддержке грантов РФФИ № 07-02-96614-р_поволжье_a и № 07-02-12221-офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г.* Спиральные пучки света // Успехи физических наук. 2004, т. 174., № 12. С. 1273-1300.
2. *Abramochkin E.G., Volostnikov V.G.* Spiral-type beams // Optics Communication. 1993. V. 102. № 3-4. pp. 336-350.
3. *Abramochkin E.G., Volostnikov V.G.* Spiral-type beams: optical and quantum aspects // Optics Comm. 1996. V. 125. P. 302-323.
4. *Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н.* Световые поля с ненулевым угловым моментом для лазерного микроманипулирования // Известия Самарского научного Центра РАН. 2007. Т. 9. № 3. С. 615-619.
5. *Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г., Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Разуева Е.В.* Формирование вихревых световых полей с заданной формой интенсивности для задач лазерной манипуляции микрообъектами // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2008. Т. 72. № 1. С. 76-79.

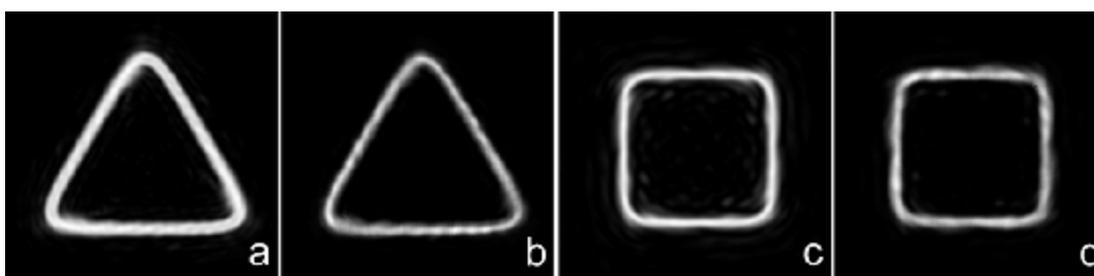


Рис. 5. Экспериментальные распределения интенсивности полей, формируемых с помощью фазовых элементов, рассчитанных итерационным способом:
а, с – теоретические распределения, b, d – экспериментальные

Таблица 2. Экспериментальные и теоретические характеристики распределений интенсивностей пучков, формируемых с помощью фазовых элементов, рассчитанных итерационным способом

Тип поля Параметры	"Треугольник", $\xi=1.26, \varepsilon=0.18 \rho$		"Квадрат", $\xi=1.4, \varepsilon=0.10 \rho$	
	численно	эксперим.	численно	эксперим.
однородность, μ	0,83	0,46	0,88	0,48
RMS_I	0,05	0,15	0,024	0,14
доля мощности, η	0,67	-	0,67	-

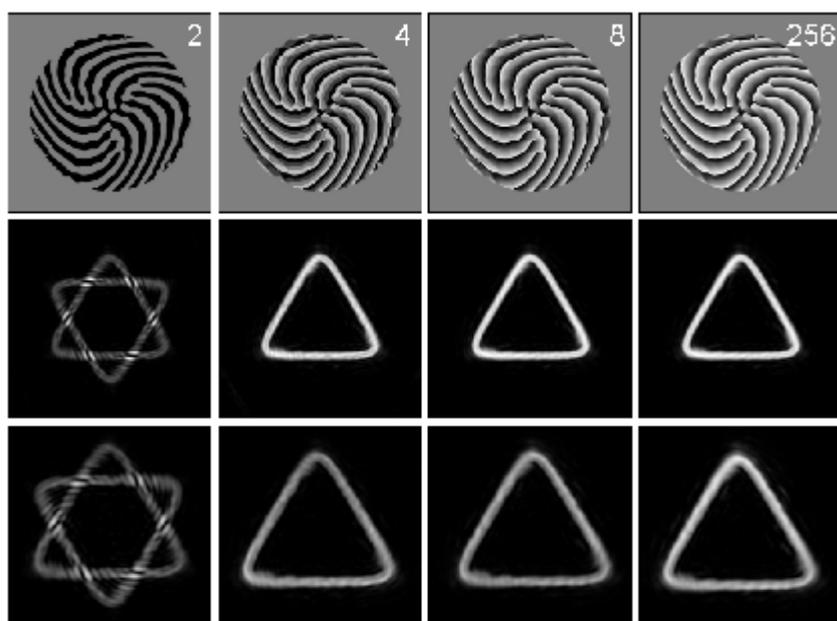


Рис. 6. Зависимость распределения интенсивности от числа уровней градаций фазы: первый ряд – соответствующие фазовые распределения (цифрами обозначено число уровней градаций фазы); второй ряд – результаты численного моделирования; третий ряд – результаты натурального эксперимента

**FORMATION OF THE LIGHT FIELD IN THE SHAPE OF CURVES
ON THE BASE OF SPIRAL-TYPE BEAM OPTICS: DETAILS**

© 2009 K.N. Afanasiev¹, V.G. Volostnikov¹, E.N. Vorontsov¹, S.P. Kotova¹,
V.V. Patlan², E.V. Razueva¹

¹ Samara Branch of Physics Institute named after P.N. Lebedev of Russian Academy of Science
² Togliatti State University

Two methods based on the phase elements use and aimed to form the beams with a predetermined intensity distribution have been compared by numeric simulations and experiments. The basic feature of the methods is the optics of spiral-type beams. The experiments are performed with the aid of reflective spatial liquid crystal modulator. It has been found that for the light fields formed with the phase elements obtained via the iteration algorithm, their heterogeneity is by several times higher (from 1,6 to 4,8) as compared to the light fields formed by the elements ensuring the phase distribution of the spiral beam without iterations. And correspondingly, the energetic efficiency after the iteration procedure is approximately by 1,2 – 2,3 times higher.

Keywords: diffraction optics, spiral-type beam, diffraction optical element.

Kirill Afanasiev, Associate Research Fellow.
E-mail: afanasiev@fian.smr.ru.
Vladimir Volostnikov, Doctor of Physics and Mathematics,
Laboratory Head. E-mail: coherent@fian.smr.ru
Evgeny Vorontsov, engineer. E-mail: vorontsoven@fian.smr.ru
Svetlana Kotova, Candidate of Physics and Mathematics,

Laboratory Head. E-mail: kotova@fian.smr.ru.
Vsevolod Patlan, PhD, senior lecturer at the General and
Theoretical Physics Department.
E-mail: seva@tlt.su.ru
Eugenia Razueva, Associate Research Fellow.
E-mail: eugeniarazueva@yandex.ru