

УДК 535.42

ФОРМИРОВАНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ ПРИ ПОМОЩИ ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММ

© 2012 К.Н. Афанасьев¹, С.А. Кишкин^{1,2}

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

² Самарский государственный университет

Поступила в редакцию 25.01.2012

Сpirальные лазерные пучки сохраняют вид распределения интенсивности при распространении в зоне Френеля и могут иметь вид произвольной заранее заданной плоской кривой. Такие пучки обладают орбитальным угловым моментом, что позволяет использовать их в качестве ловушек в оптических пинцетах. В работе представлены результаты высококачественного формирования спиральных пучков при помощи только фазового пространственного модулятора света на основе голограммического подхода.

Ключевые слова: спиральный лазерный пучок, структурная устойчивость, пространственный модулятор света, фазовая голограмма.

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические пинцеты позволяют манипулировать объектами от нескольких нанометров до десятков микрометров, например, металлическими наночастицами, диэлектрическими сферами, вирусами, бактериями и клетками. Хотя одиночный остросфокусированный гауссов пучок остается эффективным инструментом для манипуляции, дальнейшее развитие инструментария возможно по пути использования особым образом сформированных в пространстве световых полей [1]. Управление пространственным распределением интенсивности и фазы светового поля позволяет создавать ловушки сложной конфигурации, обладающие новыми уникальными свойствами. Примером таких полей являются спиральные пучки света [2, 3], которые сохраняют вид распределения интенсивности при распространении в зоне Френеля и, например, могут иметь вид произвольной заранее заданной плоской кривой. Такие пучки обладают орбитальным угловым моментом, что позволяет использовать их для захвата и перемещения микроскопических объектов в поперечном сечении пучка вдоль траектории, заданной распределением интенсивности [4].

В общем случае для формирования спирального пучка требуется реализовать одновременно пространственную модуляцию интенсивности и фазы исходного поля (рис. 1). Например, амплитудную модуляцию можно осуществить при помощи полутонового фотошаблона, а фа-

зовую – при помощи дифракционного оптического элемента (ДОЭ), изготовленного методом литографии на стекле или реализованном на слое бихромированной желатины [4]. Помимо технических сложностей данного подхода, существует ряд принципиальных ограничений: значительная доля энергии освещдающего пучка поглощается амплитудным фотошаблоном, например, в случае пучка в форме “треугольной” гипоциклоиды доля энергии прошедшего излучения не превышает 23 %, а из-за погрешностей реализации фазового профиля дифракционная эффективность составляет 40 60 %. Таким образом, результирующая эффективность составляет около 9 14 %.

Одним из путей повышения энергетической эффективности является отказ от структурной устойчивости поля. В эксперименте, представленном на рис. 1, вместо амплитудно-фазового можно использовать только фазовый ДОЭ, фазовый профиль которого основан на фазовом распределении исходного спирального пучка и несколько модифицирован в ходе итерационного процесса [5]. При этом поле с заданным распределением интенсивности формируется только в одной заданной плоскости, а эффективность составляет более 60 %.

В данной работе мы предлагаем реализовывать спиральные пучки (структурно устойчивые при распространении) при помощи фазовых голограмм, рассчитанных на компьютере. К преимуществам данного подхода следует отнести простоту расчета и экспериментальной реализации при помощи фазовых пространственных модуляторов света (ПМС), получивших в последнее время большое распространение, к недостаткам невысокую дифракционную эффективность.

Афанасьев Кирилл Николаевич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник.

E-mail: afanasiy@fian.smr.ru

Кишкин Сергей Александрович, инженер.

E-mail: kishkin.sergey@gmail.com

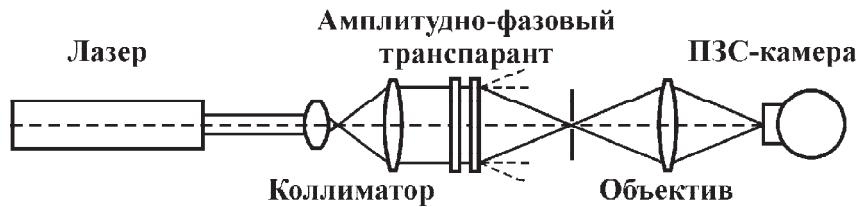


Рис. 1. Схема получения спиральных пучков методом амплитудно-фазовых масок.

Спиральный пучок получается в процессе пространственной фильтрации дифракционных порядков

2. РАСЧЕТ ГОЛОГРАММ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ

Комплексная амплитуда спирального пучка в виде кривой $\xi(t) = u(t) + iv(t)$, $t \in [0, T]$ задается интегралом [2, 3]:

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

где ρ – гауссов параметр, черта означает комплексное сопряжение.

Пример спирального пучка в форме “треугольной” гипоцилоиды с девятью сингулярностями внутри контура представлен на рис. 2. Энергетическая эффективность формирования такого пучка амплитудно-фазовым методом составляет 8 – 13 %.

Запишем комплексную амплитуду спирального пучка в терминах амплитуды и фазы:

$$S = A_S \exp[i\varphi_S], \quad (2)$$

здесь A_S и φ_S соответственно пространственное распределение амплитуды и фазы спирального пучка. Аналогично запишем комплексную амплитуду плоской волны, распространяющуюся под углом α к оптической оси:

$$F = A_F \exp[i\varphi_F], \quad (3)$$

где $\varphi_F = (2\pi / \lambda)x \sin(\alpha)$, λ – длина волны лазерного излучения. Результатом интерференции этих двух полей является поле H :

$$H = S + F = A_S \exp[i\varphi_S] + A_F \exp[i\varphi_F] \quad (3)$$

с интенсивностью:

$$H\bar{H} = A_S^2 + A_F^2 + 2A_S A_F \cos(\varphi_S - \varphi_F). \quad (4)$$

Пространственное распределение фазы голограммы определяется выражением:

$$\varphi_H = A_S A_F \cos(\varphi_S - \varphi_F) \cdot \frac{\pi}{2}, \quad (5)$$

при этом при расчетах следует выбирать $A_F = 1$, а A_S нормировать на 1. При этом

$\cos(\varphi_S - \varphi_F) \in [-1, 1]$, а множитель $\pi/2$ обеспечивает глубину максимальной фазовой модуляции π . На рис. 3 представлен пример голограммы, рассчитанной для формирования спирального пучка в форме “треугольной” гипоцилоиды, представленного на рис. 2 и результат моделирования её восстановления. Интенсивность поля в нулевом порядке (на рис. 3б в центре) примерно в 1000 раз больше, интенсивности в первом, расчетное значение дифракционной эффективности в первом порядке – 9 %. Другие примеры спиральных пучков и голограмм, рассчитанных для их формирования, представлены на рис. 4, 5. Наклон плоской волны (формула 3) выбирался таким образом, чтобы избежать перекрытия различных дифракционных порядков: 1-го, 2-го порядка дифракции и порядков дифракции излучения на крае апертуры.

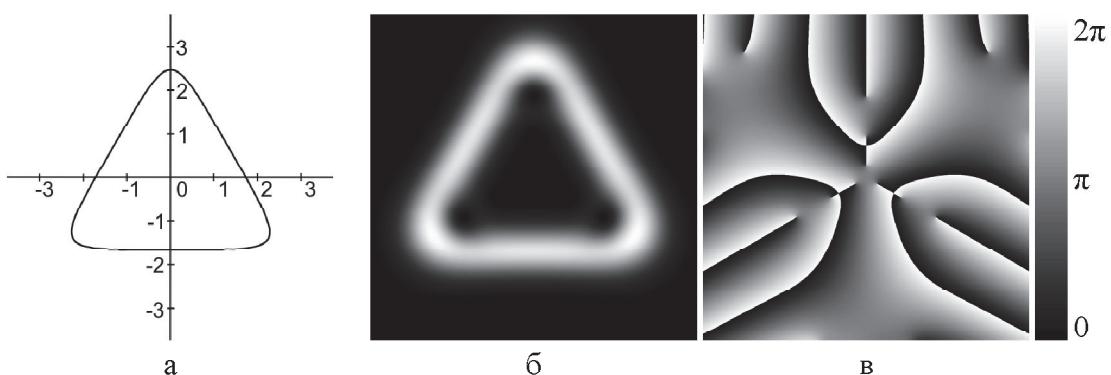


Рис. 2. Спиральный пучок в виде “треугольной” гипоцилоиды:

а – образующая кривая, б – пространственное распределение интенсивности, в – пространственное распределение фазы

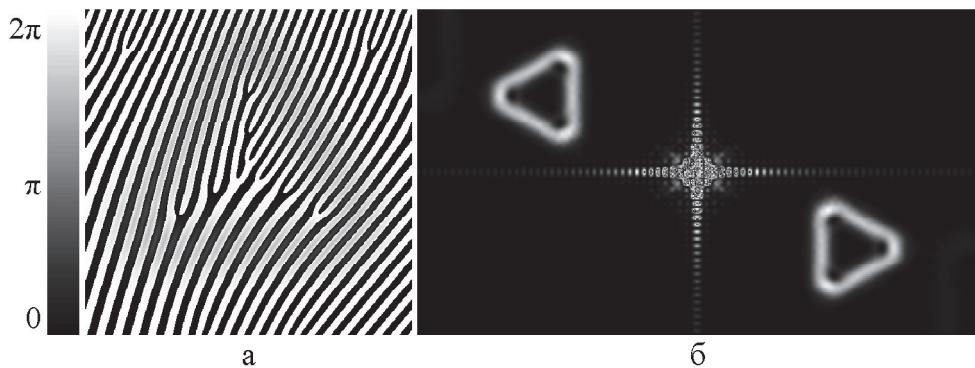


Рис. 3. Голографма для формирования спирального пучка в форме “треугольной” гипоциклоиды (а) и результат моделирования её восстановления (б): интенсивность в +1, 0 и -1 порядках дифракции

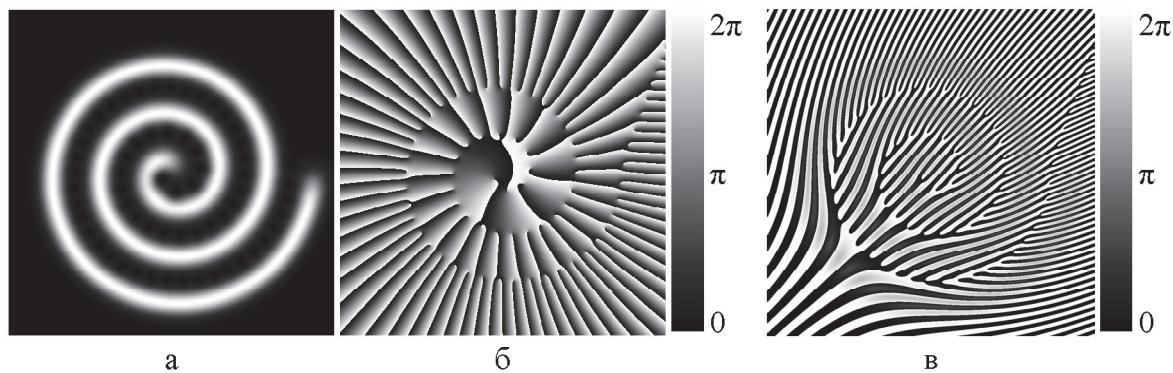


Рис. 4. Спиральный пучок в форме спиралей Архимеда и голографма для его формирования:
а – пространственное распределение интенсивности спирального пучка, б – пространственное распределение фазы спирального пучка, в – пространственное распределение фазового пропускания голограммы

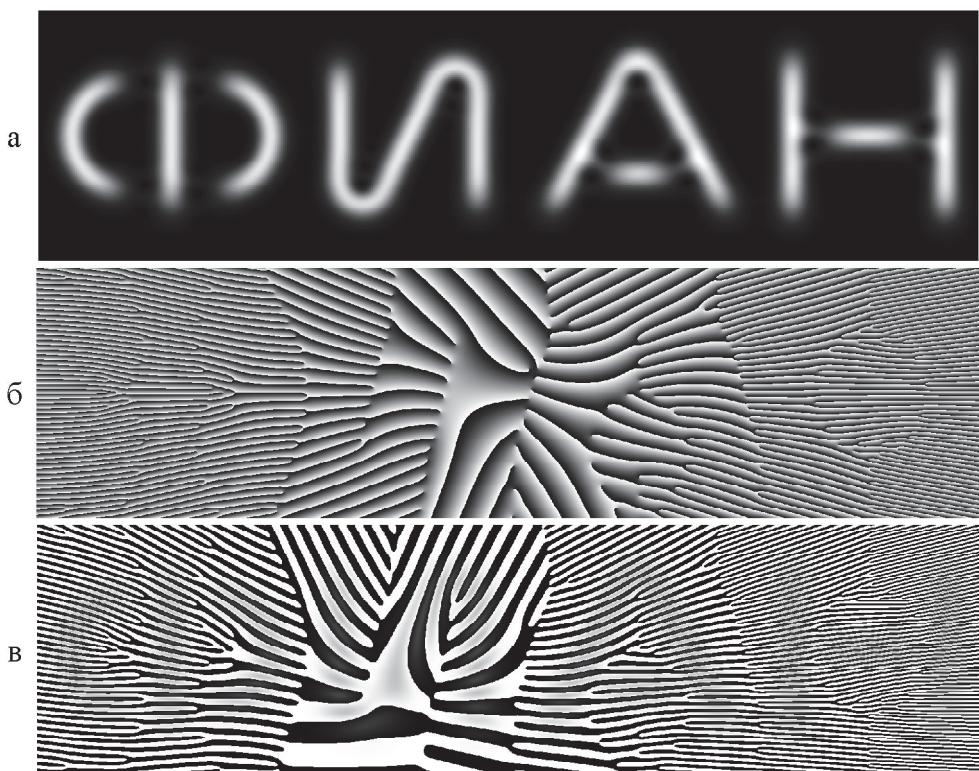


Рис. 5. Спиральный пучок “ФИАН” и голографма для его формирования:
а – пространственное распределение интенсивности спирального пучка, б – пространственное распределение фазы спирального пучка, в – пространственное распределение фазового пропускания голограммы

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАММ

Для проведения экспериментов использовался He Ne лазер и управляемый фазовый модулятор HOLOEYE HEO 1080 P. Его основные характеристики: число элементов 1920×1080 , шаг пикселей 8 мкм, величина максимальной модуляции фазы 2π , число градаций фазы – 256 (8 bit). В ходе эксперимента на модуляторе формировалось фазовое распределение голограммы, которое восстанавливалось пучком лазера, расширенным при помощи коллиматора. Регистрация интенсивности полей осуществлялась на матрицу цифрового фотоаппарата в линейном режиме. Схема эксперимента представлена на рис. 6. В результате дифракции в +1 и -1 порядках восстанавливались спиральные пучки заданного вида. При этом начиная с некоторого расстояния, после пространственного разделения порядков, наблюдалось вращение спиральных пучков при распространении с сохранением вида

распределения интенсивности при изменении масштаба. Примеры распределений интенсивности восстановленных полей представлены на рис. 7 и рис. 8.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен способ формирования спиральных пучков на основе фазовых голограмм, рассчитанных на компьютере. Экспериментальные результаты, полученные при помощи ЖК ПМС, хорошо согласуются с результатами численного моделирования. Показано, что при сравнимой энергетической эффективности, голографический метод формирования спиральных пучков более прост в реализации и позволяет получить более качественные спиральные пучки, чем метод амплитудно-фазовых масок.

Работа выполнена при поддержке грантов Минобрнауки 16.120.11.3965-МК, ГК 14.740.11.0063 и Учебно-научного комплекса ФИАН.

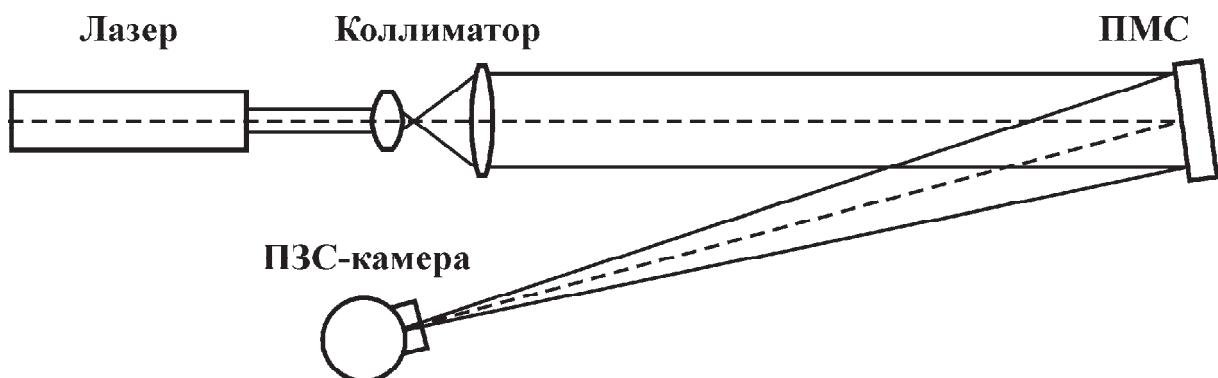


Рис. 6. Схема эксперимента по формированию световых полей при помощи пространственного модулятора света

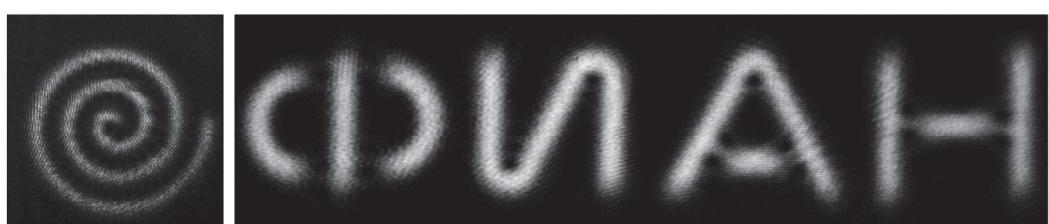


Рис. 7. Распределение интенсивности спиральных пучков, восстановленных экспериментально на основе голограмм, реализованных при помощи пространственного модулятора света

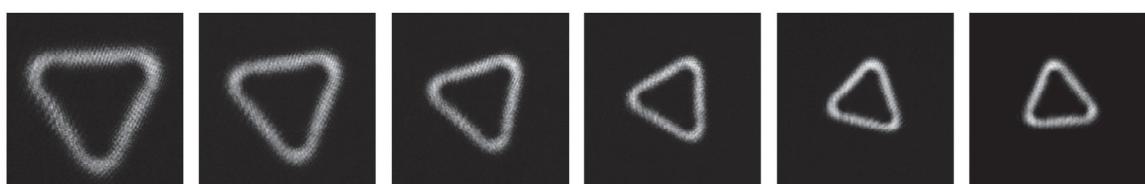


Рис. 8. Пример изменения поперечного распределения интенсивности спирального пучка в форме «треугольника» при распространении. Наблюдаются вращение и масштабирование при неизменной форме пучка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dholakia K., Cizmar T.* Shaping the future of manipulation // *Nature Photonics*, 2011. V. 5. No. 6. P. 335–342.
2. *Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г.* Спиральные пучки света // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 12. С. 1273–1300.
3. *Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г.* Современная оптика гауссовых пучков. М.: Физматлит. 2010. 188 с.
4. Microobject manipulations using laser beams with nonzero orbital angular momentum / *Abramochkin E.G., Kotova S.P., Korobtsov A.V., Losevsky N.N., Mayorova A.M., Rakhmatulin M.A., Volostnikov V.G.* // *Laser Physics*. 2006. V. 16. No. 5. P. 842–848.
5. Формирование вихревых световых полей с заданной формой интенсивности для задач лазерной манипуляции микрообъектами / *Абрамочкин Е.Г., Афанасьев К.Н., Волостников В.Г., Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Разуева Е.В.* // *Известия РАН. Серия физическая*. 2008. Т. 72. № 1. С. 76–79.

SPIRAL BEAMS SYNTHESIS BY MEANS OF PHASE HOLOGRAMS

© 2012 K.N. Afanasiev¹, S.A. Kishkin^{1,2}

¹ Samara Branch of Lebedev Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

² Samara State University

The spatial intensity distribution of spiral laser beams remains unchanged during propagation in the Fresnel zone. It may be in the shape of an arbitrary predetermined plane curve. Such beams have an orbital angular momentum, allowing their use as traps in optical tweezers. The results of high-quality formation of spiral beams with phase only spatial light modulator based on holographic approach are presented.

Key words: spiral laser beam, structural stability, a spatial light modulator, phase hologram