

УДК 535.42

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КВАНТОВАНИЯ ФАЗЫ НА КАЧЕСТВО СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА¹

© 2005 К.Н. Афанасьев, В.Г. Волостников²

В работе проводится анализ влияния количества уровней квантования фазы дифракционного оптического элемента на качество синтезируемого с помощью него светового поля как приближения спирального пучка света. Задача решается путем численного эксперимента. Полученные результаты говорят о том, что практический интерес представляет реализация от 4 до 16 уровней градации фазы, а использование 2-уровневых пластинок приводит к утрате спиральной структуры пучка.

Введение

Для нужд биологии, микроэлектроники, атомной физики разрабатываются методы манипуляции микро- и наночастицами, а также отдельными атомами с помощью лазерных пучков. Функциональные возможности лазерных манипуляторов могут быть существенно расширены за счет использования так называемых спиральных пучков, сохраняющих свою структуру при распространении и фокусировке с точностью до масштаба и поворота. Благодаря вихревому характеру распространения световой энергии в этих пучках, они несут ненулевой орбитальный момент количества движения. Такие пучки позволяют не только вращать микроскопические частицы вокруг оси пучка, но и перемещать их по заданной траектории.

В работе [1] найден и полностью описан такой класс лазерных пучков. Известные типы лазерных мод Эрмита—Гаусса и Лагерра—Гаусса являются частными случаями спиральных пучков с нулевым вращением. Отличие найденных пучков от известных в том, что они обладают принципиально новыми свойствами. Сохраняя форму при распространении и фокусировке,

¹Представлена доктором физико-математических наук профессором В.Г. Волостниковым.

²Афанасьев Кирилл Николаевич (afanasiev@fian.smr.ru), Волостников Владимир Геннадиевич (coherent@fian.smr.ru), лазерно-измерительная лаборатория Самарского филиала Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 443011, Россия, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 221.

они могут иметь весьма разнообразную структуру распределения интенсивности. В частности, в семействе спиральных пучков теоретически найдены и на отдельных примерах реализованы экспериментально спиральные пучки в форме произвольных плоских кривых или их совокупности [2]. Плоская кривая, определяющая форму пучка, названа порождающей или генерирующей для данного пучка и задается в комплексной параметрической форме $\zeta(t) = x(t) + iy(t)$, $t \in [0, T]$. Распределение комплексной амплитуды поля пучка в форме кривой определяется выражением

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

Здесь $z = x + iy$ — точка на комплексной плоскости, ρ — гауссов параметр, верхняя черта означает комплексное сопряжение.

Используя распределение (1) для фиксированной плоскости, мы можем получить комплексную амплитуду поля в любом другом сечении пучка при помощи интегрального преобразования Френеля—Кирхгофа.

Для структуры фазового распределения спиральных пучков характерно наличие изолированных нулей, так называемых оптических вихрей. Количество и расположение таких нулей однозначно определяют структуру пучка.

1. Методы экспериментального получения пучков

Существуют два принципиально различных способа экспериментального синтеза спиральных пучков. Первый, внутриврезонаторный, когда пучок синтезируется внутри специфического резонатора с точечными центрами поглощения [3]. Второй, более очевидный способ реализации спиральных пучков заключается в использовании амплитудно-фазовых масок. При этом в пределах выбранной апертуры формируют интенсивность (амплитудная маска) и фазу поля (1). Амплитудная маска и фотошаблон для фазовой маски могут быть изготовлены на фотоплоттере. Фотошаблон используется для изготовления фазового элемента на дихромированной желатине. Комбинация амплитудной и фазовой масок даст требуемый амплитудно-фазовый элемент, который освещается пучком гелий-неонового лазера (рис. 1). В силу технологии изготовления (например, [4]) полученный фазовый транспарант имеет пиксельную структуру, а первоначальное распределение фазы заменяют ступенчатым (квантованным) профилем. В простейшем случае двухуровневого (бинарного) квантования получается нерегулярная двумерная фазовая решетка. Увеличение числа уровней квантования не только приближает получаемый дискретный профиль фазы к пер-

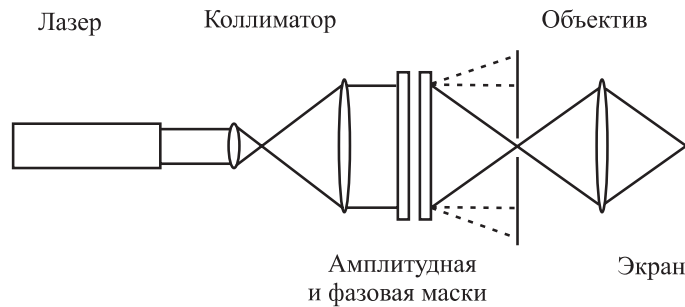


Рис. 1. Схема получения спиральных пучков при помощи амплитудно-фазовых масок. Интенсивность и фаза пучка формируются независимо

воначальному непрерывному, но и увеличивает стоимость устройства и время его изготовления. Поэтому ведущим критерием при создании фазового транспаранта является выбор количества уровней квантования фазы.

Целью данной работы является качественный и количественный анализ влияния числа уровней квантования фазы на качество синтезируемых спиральных пучков света методом численного эксперимента.

2. Численный эксперимент

В ходе численного эксперимента реализованы распределения в форме кольца, треугольника и квадрата (см. рис. 2).

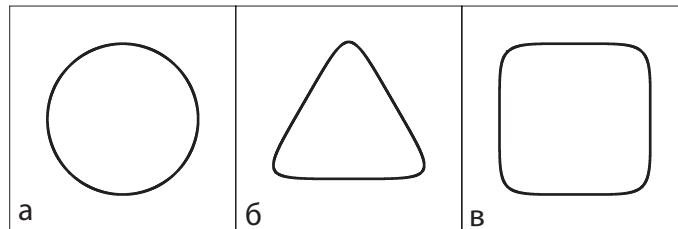


Рис. 2. Генерирующие кривые для пучков в форме кольца (а), границы треугольника (б), границы квадрата (в)

Для задания генерирующих кривых использовались эпициклоиды следующего вида:

а) $\zeta(t) = \nu e^{it}$, $t \in [0, 2\pi]$, $\nu = \rho \sqrt{N/2}$, $N = 7$;

б) $\zeta(t) = i\nu(2e^{it} + \frac{1}{2}e^{-2it})$, $t \in [0, 2\pi]$, $\nu = \rho \sqrt{N/7}$, $N = 7$;

в) $\zeta(t) = i\nu(3e^{it} - \frac{7}{20}e^{-3it})$, $t \in [0, 2\pi]$, $\nu = \rho \sqrt{200N/3453}$, $N = 8$.

Поясним процедуру дискретизации фазы на примере двух градаций (так называемая бинарная фазовая пластинка). Если фаза в рассматриваемой точке принадлежит интервалу $[0, \pi)$, то она заменяется на 0; если же фаза принадлежит интервалу $[\pi, 2\pi)$, то она заменяется на π . Таким

же образом для N уровней градации возникают N интервалов и соответствующих N значений фазы $-\phi_j = \frac{j}{N} 2\pi$, $j = 0, 1, \dots, N - 1$. Распределения интенсивности и фазы элементов для формирования пучков в форме кольца, границы треугольника и границы квадрата представлены на рис. 3 (а — распределение интенсивности (амплитудный элемент), б — непрерывное распределение фазы (фазовый элемент), в — бинарное приближение фазового элемента, г, д и е — 4, 8 и 16 уровней градации фазы соответственно). Картину в дальней зоне дифракции можно получить путем преобразования Фурье от исходной функции [5]. В настоящей работе при расчетах использован алгоритм быстрых Фурье-преобразований с линейной интерполяцией исходного распределения. Полученные распределения поля в дальней зоне

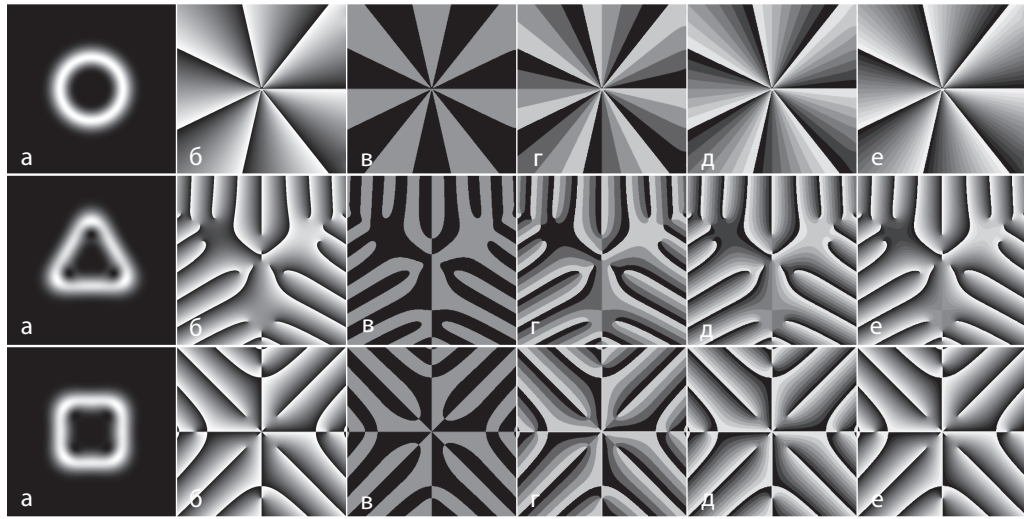


Рис. 3. Амплитудно-фазовые элементы для получения спиральных пучков в форме кольца, треугольника, квадрата. Черный цвет на распределениях соответствует нулю интенсивности и фазы, белый — максимуму интенсивности и фазе 2π

дифракции и их интерпретация представлены ниже, сейчас же поясним идею количественного анализа распределений интенсивности. Отклонение распределения интенсивности от идеального (полученного для непрерывного профиля фазы) будем оценивать величиной

$$\eta = \frac{\int_S (I - I^N) dx dy}{\int_S I dx dy}, \quad (2)$$

где I^N — интенсивность для N уровней градации фазы, S — поверхность, в пределах которой рассматривается спиральный пучок, I — точное значение интенсивности. Использование в формуле (2) простой разности в числителе, в отличие от среднеквадратичного отклонения, вполне оправдано. Это объясняется тем, что спадание интенсивности в направлении, поперечном

генерирующей кривой, является гауссовым, при этом все значения I^N заведомо меньше I , и разность $I - I^N$ никогда не меняет знак. Полученные распределения интенсивности и фазы пучка в дальней зоне дифракции для 2, 4, 8, 16 уровней градации фазы и для непрерывного распределения приводятся на рис. 4–6 в единой нормировке (а — интенсивность, б — фаза, в — фаза в некоторой области вблизи перетяжки).

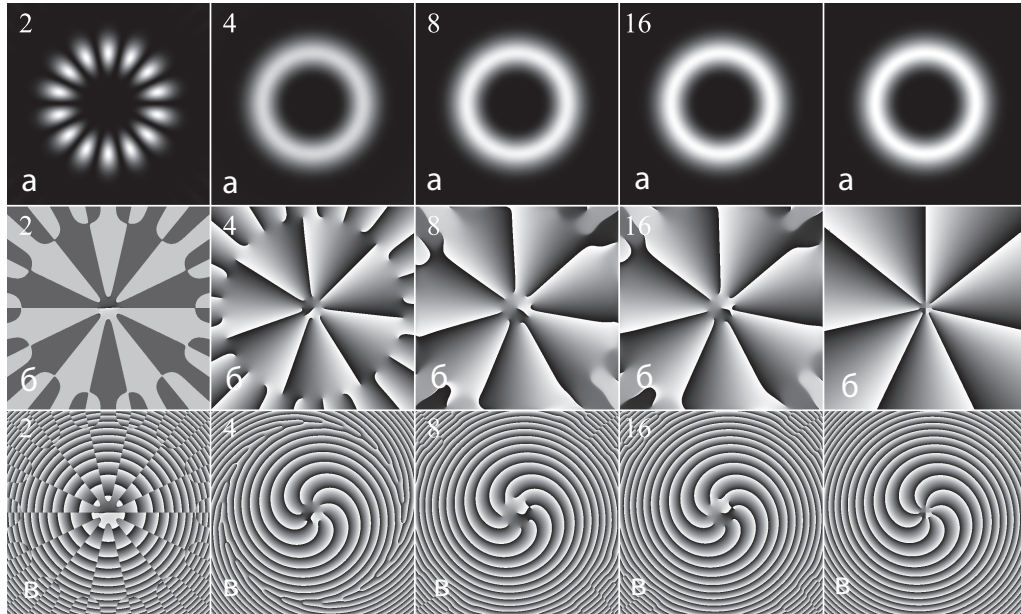


Рис. 4. Спиральный пучок в форме кольца в дальней зоне дифракции. Черный цвет на распределениях соответствует нулю интенсивности и фазы, белый — максимуму интенсивности и фазе 2π

Заключение

Прежде всего, следует отметить качественное отличие распределений интенсивности всех трех пучков в случае двух градаций фазы (см. рис. 4,а; 5,а; 6,а). Распределения обладают центральной симметрией и не повторяют форму генерирующей кривой. В соответствующих им фазах отсутствует закрутка, это говорит о том, что эти пучки вообще утратили спиральную структуру. Произошло это потому, что в изначальной фазе этих пучков направление закрутки не определено. Его вообще нельзя определить для бинарной фазы. Поэтому, несмотря на то, что на практике бинарные фазовые пластинки широко применяются, для получения пучков спирального типа их непосредственное использование (без наложения дополнительной "опорной" фазы) невозможно.

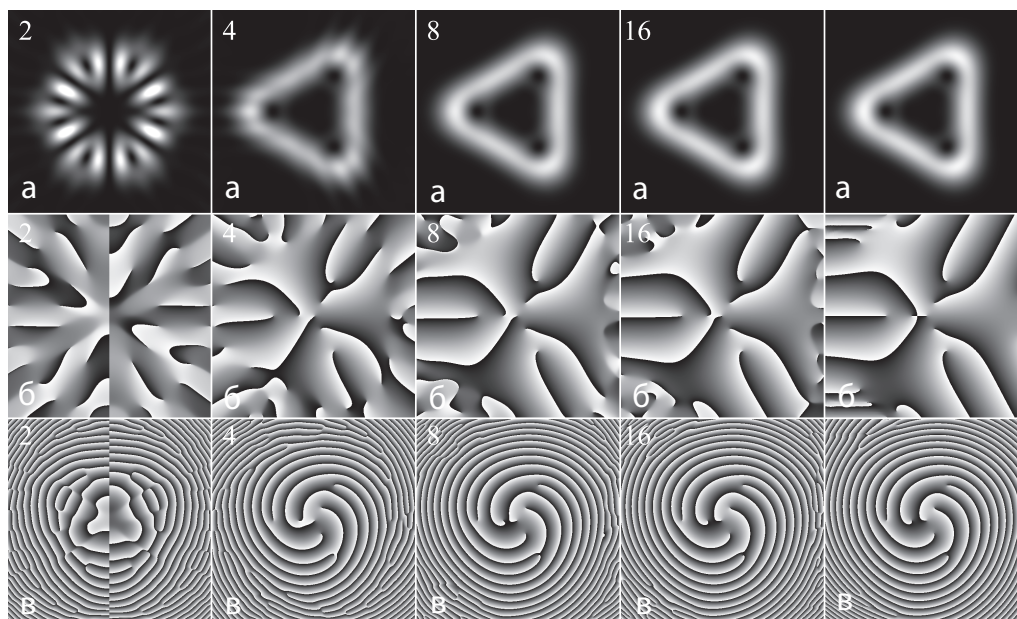


Рис. 5. Спиральный пучок в форме границы треугольника в дальней зоне дифракции. Черный цвет на распределениях соответствует нулю интенсивности и фазы, белый — максимуму интенсивности и фазе 2π

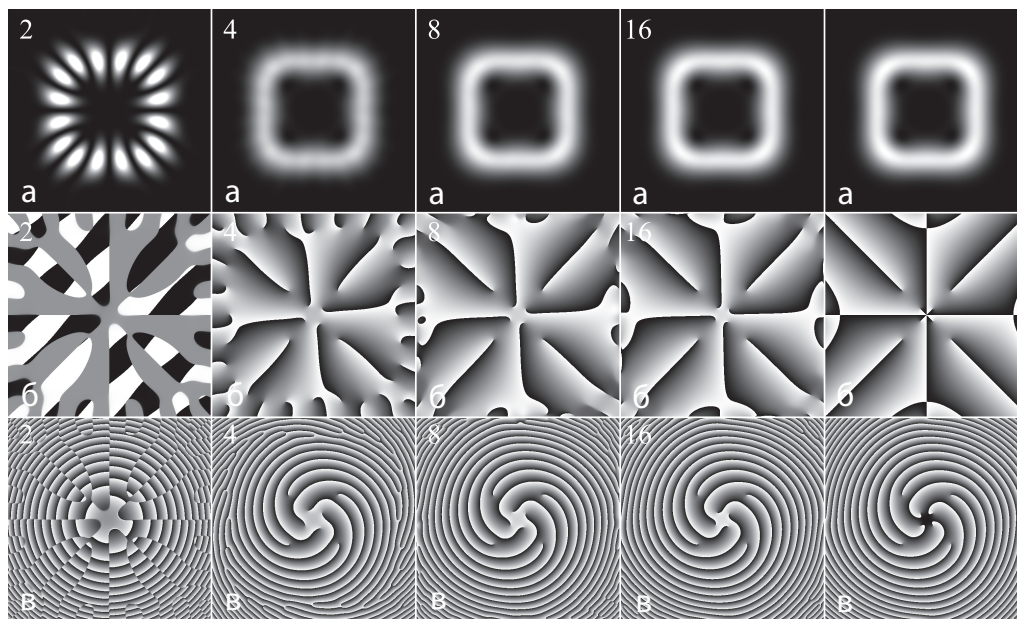


Рис. 6. Спиральный пучок в форме границы квадрата в дальней зоне дифракции. Черный цвет на распределениях соответствует нулю интенсивности и фазы, белый — максимуму интенсивности и фазе 2π

В случае четырех уровней градации фазы пучков их спиральная структура сохраняется и качественное соответствие формы пучка генерирующей кривой очевидно. Поэтому для практической реализации возможно использование фазовых транспарантов с 4 и более уровнями градации. При этом будет наблюдаться количественное различие результатов. Так, при 4 градациях фазы отклонение интенсивности для всех типов пучков от идеального составляет около 18% (рис. 7).

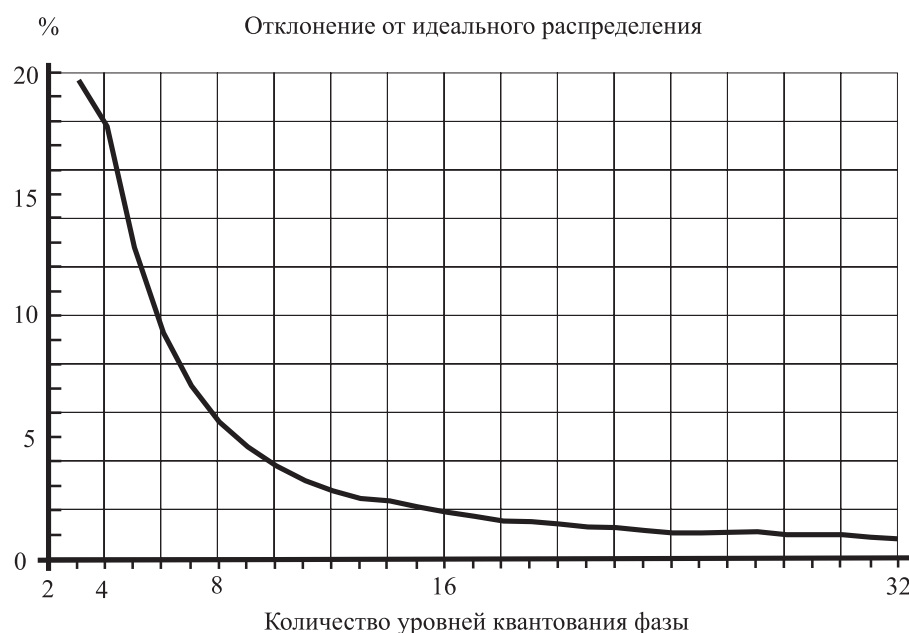


Рис. 7. График зависимости отклонения от идеального распределения в зависимости от количества уровней квантования фазы для спирального пучка в форме границы треугольника

Ближкие числовые значения для различных пучков позволяют обобщить результат на случай пучка в форме произвольной плоской кривой. При 8 уровнях фазы отклонение интенсивности составляет около 5%, для 16 — около 2%, а для 32 — менее 1%. Поэтому на практике реализация более 16 уровней градации фазы представляет интерес в исключительных случаях. При различных градациях фазы равномерность распределения энергии вдоль генерирующей кривой не меняется.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 04-02-96508) Американского фонда гражданских исследований и развития в рамках программы грантов на совместные исследования (грант RUP1-2623-SA-04) и программы "Фундаментальные исследования и высшее образование" (грант CRDF REC-SA-014-02).

Литература

- [1] Abramochkin E., Volostnikov V. Spiral-type beams // Opt. Comm. 1993. V. 102. No 3, 4. P. 336–350.
- [2] Abramochkin E., Volostnikov V. Spiral-type beams: optical and quantum aspects // Opt. Comm. 1995. V. 125. P.302–323.
- [3] Abramochkin E., Losevsky N., Volostnikov V. Generation of spiral-type laser beams // Opt. Comm. 1997. V. 141. P. 59–64.
- [4] Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А.Сойфера. М.: Физматлит, 2002.
- [5] Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973.

Поступила в редакцию 20/V/2005;
в окончательном варианте — 20/V/2005.

PHASE QUANTIZATION EFFECT ON THE QUALITY OF THE SPIRAL BEAM³

© 2005 K.N. Afanasiev, V.G. Volostnikov⁴

The diffractive optical element phase quantization effect on the quality of the synthesized light field as the approximation of spiral beam is considered. The problem is solved in terms of numerical experiment. The results show that number of phase levels from 4 up to 16 is useful for experimental applications and in the case of binary phase plates the beam loses its spiral structure.

Paper received 20/V/2005.
Paper accepted 20/V/2005.

³Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) Prof. V.G.Volostnikov.

⁴Afanasiev Kirill Nikolaevich (afanasiev@fian.smr.ru), Volostnikov Vladimir Gennadievich (coherent@fian.smr.ru), Laboratory of Coherent Optics, P.N.Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Science (Samara Branch), Samara, 443011, Russia.