

ФОРМИРОВАНИЕ КОНТУРНЫХ ВИХРЕВЫХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА

К. В. Ефимова^{1,2}, С. П. Котова¹, Н. Н. Лосевский¹,
Д. В. Прокопова^{1,2}, С. А. Самагин¹

Представлены результаты экспериментального формирования контурных вихревых полей на основе оптики спиральных пучков света при помощи фазовых дифракционных элементов: бинарным по амплитуде методом амплитудно-фазовых масок и методом фазовых голограмм с симметричным и асимметричным профилями штриха решётки. Проведено сравнение этих методов по дифракционной эффективности и качеству полученных световых полей.

Ключевые слова: спиральные пучки света, фазовый дифракционный элемент, цифровые голограммы, асимметричный профиль штриха.

Введение. В прикладных задачах оптики достаточно часто возникает необходимость в конструировании световых полей с заданными характеристиками [1]. Оптика спиральных пучков света позволяет получить широкий класс вихревых световых полей с заданным распределением интенсивности, представляющих интерес для лазерной манипуляции микроскопическими объектами, высокоразрешающей оптической наноскопии, квантовых систем передачи информации. Спиральные пучки света (СП) – световые поля, обладающие орбитальным угловым моментом и сохраняющие заданную структуру распределения интенсивности при распространении за исключением масштаба и поворота [2–4]. Известен ряд способов генерации СП: внутрирезонаторный, с использованием астигматического преобразования, амплитудно-фазовых масок, голографический. Первые два из названных являются достаточно сложными: требуют специфической

¹ Самарский филиал ФИАН, 443011 Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, 221; e-mail: efimova131313@gmail.com.

² Самарский университет, 443086 Россия, Самара, Московское шоссе, 34.

оптики, очень точной юстировки, значительных габаритов установок. В поисках практически удобного способа в данной работе рассмотрены методы, позволяющие сформировать контурные вихревые световые поля, близкие по структуре к спиральным пучкам света, с помощью одного фазового дифракционного элемента.

Спиральные пучки. Спиральные пучки могут иметь разную пространственную структуру интенсивности в поперечном сечении, в том числе форму произвольной плоской кривой [3, 4]. Последние интересны, например, для задач оптической микроманипуляции и контурного анализа. Далее рассмотрим именно такой класс СП.

Комплексная амплитуда СП с интенсивностью в виде произвольной плоской кривой $\zeta(t)$ рассчитывается по формуле (1), полученной в [3]:

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

где ρ – гауссов параметр пучка, штрих означает производную по переменной t , $z = x + iy$ – комплексная координата (x и y – координаты в поперечном сечении пучка), черта означает комплексное сопряжение.



Рис. 1: Интенсивность (а) и фаза (б) СП. Теоретически рассчитанные распределения интенсивности СП в различных сечениях (в). На (б) изменение цвета от белого до черного соответствует изменению фазы от 0 до 2π .

На рис. 1 показан теоретически рассчитанный СП в виде границы треугольника, а также распределения интенсивности и фазы такого пучка.

Самый очевидный способ экспериментального получения СП состоит в использовании поглощающей и фазовой масок, задающих амплитудное и фазовое распределения пучка. Однако при этом возникают проблемы создания маски с заданным амплитудным пропусканием (как правило, управляемые пространственные модуляторы света (ПМС)

предназначены для модуляции фазы световой волны, а не амплитуды) и пространственного совмещения двух масок, что влияет на качество пучка. К тому же из-за наличия амплитудной маски, метод обладает малой эффективностью. Полученная нами ранее дифракционная эффективность данного метода составила 3% [5].

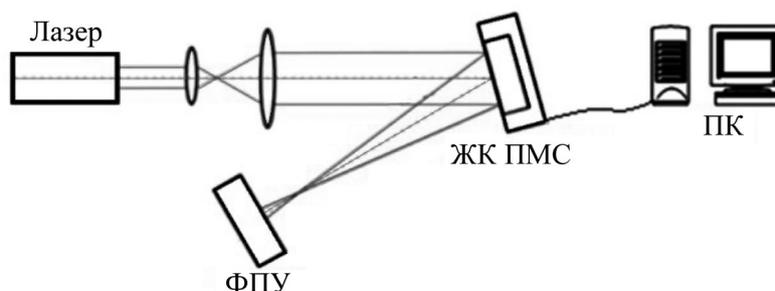


Рис. 2: Схема установки. Пояснения в тексте.

В данной работе нами исследованы бинарный по амплитуде метод амплитудно-фазовых масок и метод фазовых голограмм с двумя различными типами профиля штриха решётки. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Источником излучения служил твердотельный непрерывный лазер ($\lambda = 532$ нм, $P_{\max} = 50$ мВ). Для формирования фазовых дифракционных элементов использовался жидкокристаллический (ЖК) ПМС HOLOEYE 1080P (размеры матрицы 15.36×8.64 мм; количество разрешимых элементов 1920×1080 пикселей). На модуляторе к рассматриваемому фазовому профилю дополнительно добавлялся фазовый профиль линзы. Это позволяло без использования внешних линз получать изображения спиральных пучков вблизи фокальной плоскости. Изображения регистрировались с помощью фотоприемного устройства (ФПУ) Canon EOS 350D в линейном режиме работы.

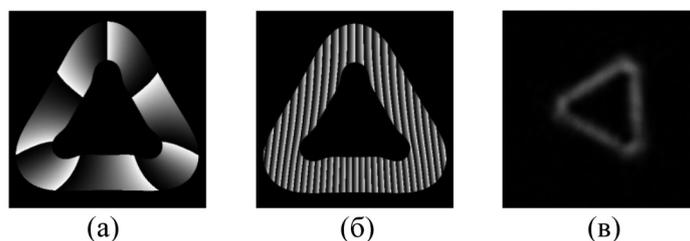


Рис. 3: Бинарный по амплитуде метод амплитудно-фазовых масок: фазовое распределение, ограниченное бинарной маской (а); фазовое распределение с добавленной фазовой решёткой (клином) (б), полученное распределение интенсивности СП (в).

Бинарный по амплитуде метод амплитудно-фазовых масок. Для реализации этого метода с использованием одного фазового элемента мы частично симитировали амплитудную модуляцию следующим образом. Для СП была определена бинарная маска, полученная из его распределения интенсивности (рис. 1(а)) при заданном уровне отсечки (если интенсивность выше уровня, то значение в данной точке бинарной маски полагалось равным единице, ниже нулю). На рис. 3(а) показано фазовое распределение исходного спирального пучка, помноженное на такую маску. Далее в этой выделенной области добавлялось фазовое распределение, соответствующее наклону волнового фронта (рис. 3(б)). При освещении такого элемента плоской однородной волной, только та часть пучка света, которая попадает в область с дополнительной фазовой решеткой (клином), отклоняется в заданном направлении и имеет фазу требуемого СП. Таким образом достигается бинарная амплитудная модуляция. Качество сформированных распределений интенсивности будет зависеть от формы вырезающей области, которая в данном подходе определяется исходным распределением и уровнем отсечки при формировании бинарной маски. Наилучшие результаты получены для уровня отсечки 0.3. На рис. 3(в) показано распределение интенсивности сформированного поля. Видно, что формируется световое поле, близкое к требуемому.

Отметим, что при формировании СП данным методом его структура сохраняется в небольшой области вблизи плоскости фокусировки, что не всегда приемлемо. Рассмотрим другие методы формирования СП.

Голографический метод. Симметричный и асимметричный профиль штриха. Создать сложное световое поле можно с помощью голограммы. Первый опыт формирования спиральных пучков голографическим методом был представлен в работе [6]. Таким способом удается получить СП достаточно хорошего качества, однако дифракционная эффективность ограничена несколькими процентами [6]. Возможный путь увеличения дифракционной эффективности состоит в использовании голограммы с асимметричным профилем штриха. В статье [7] было предложено использовать этот метод для формирования аксиально-симметричных по интенсивности оптических вихрей. В основе подхода асимметризации профиля полос решетки голограммы лежит преобразование его к пилообразному виду. В этой статье мы применили предложенный метод для формирования более сложных световых полей (спиральных пучков), содержащих оптические вихри в своей структуре.

На рис. 4((а), (г)) представлены фазовые голограммы с различным профилем штриха решетки (рис. 4((б), (д))). При экспериментальной генерации СП к цифровой голо-

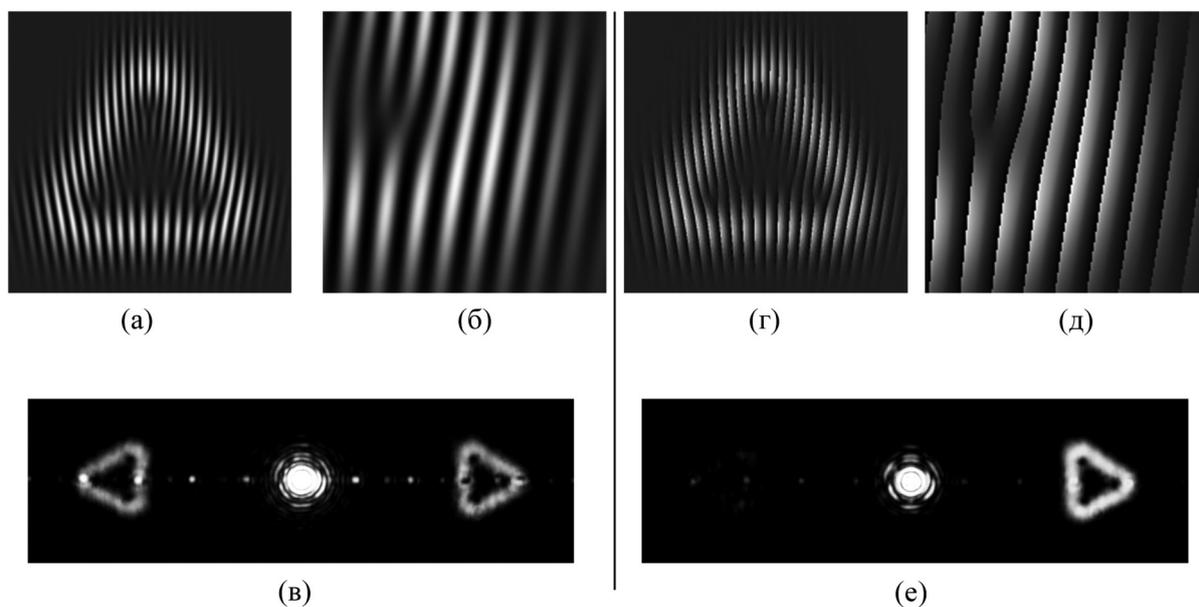


Рис. 4: Фазовые голограммы в градациях серого с синусоидальным (а) и асимметричным профилем штриха решётки (г) и увеличенные фрагменты этих голограмм (б) и (д); экспериментально полученные распределения интенсивности СП при восстановлении с голограмм “а” (в) и “г” (е).

грамме добавлялся фазовый профиль собирающей линзы. Полученное распределение фазы передавалось на ЖК ПМС и при освещении сформированной голограммы опорной плоской однородной волной, СП восстанавливался в первом порядке дифракции (рис. 4((в), (е))). Видно, что в случае асимметричного профиля штриха интенсивность первого порядка дифракции значительно выше минус первого.

Сравнение методов по эффективности и качеству полученных полей. Количественные характеристики дифракционной эффективности и качества сформированных полей, полученные путем обработки экспериментальных и расчетных данных, представлены в табл. 1. Дифракционная эффективность (η) формирования контурного вихревого поля рассчитывалась как отношение мощности излучения в полученном изображении, к мощности пучка, освещающего дифракционный элемент. Максимальная дифракционная эффективность экспериментально зарегистрирована для голографического метода с асимметричным профилем штриха. При переходе от синусоидального к асимметричному профилю штриха решетки она возросла в 2.3 раза.

Т а б л и ц а 1

Результаты анализа эффективности и качества сформированных контурных вихревых полей по результатам численного моделирования/эксперимента

Метод	$\eta_{\text{числ}}/\eta_{\text{эксп}}, \%$	$RMSw_{\text{числ}}/RMS_{\text{эксп}}, \%$	$nw_{\text{числ}}/nw_{\text{эксп}}, \%$
Бинарный по амплитуде метод амплитудно-фазовых масок	17/9	12/25	33/36
Голографический с синусоидальным профилем штриха	7/5	88/42	96/39
Голографический с асимметричным профилем штриха	16/12	9/22	6/2

Для анализа качества распределения интенсивности сформированных полей были введены следующие параметры: неоднородность кривой по ширине ($RMSw$) и отклонение ширины сформированной кривой относительно идеального отображения (nw) [8]. Обработывались изображения световых полей, полученные в фурье-плоскости (вблизи фокальной плоскости линзы). Лучшими характеристиками обладают световые поля, полученные голографическим методом с асимметричной формой штриха. Отметим, что закономерности изменения дифракционной эффективности и качества в зависимости от метода формирования, установленные по результатам численного моделирования, совпадают с результатами натурального эксперимента.

Заключение. Исследованы три метода генерации контурных вихревых световых полей с помощью одного фазового элемента. Получено, что наибольшей эффективностью и наилучшим качеством полученных изображений в фурье-плоскости обладает голографический метод с асимметричным профилем штриха. Бинарный по амплитуде метод амплитудно-фазовых масок также имеет достаточно большую эффективность и может быть рекомендован для использования. Отметим, что для этого метода отпадает проблема точного совмещения фазовой и амплитудной масок. Вопрос о качестве сформированных полей на различных расстояниях от плоскости фокусировки (близости к спиральным пучкам света) требует дополнительных исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-29-11809 офи_м).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Rubinsztein-Dunlop, Journal of Optics **19**(1), 013001 (2017).
- [2] E. Abramochkin, V. Volostnikov, Optics Communications **102**(3-4), 336 (1993).
- [3] E. Abramochkin, V. Volostnikov, Optics Communications **125**(4), 302 (1996).
- [4] Е. Г. Абрамочкин, В. Г. Волостников, *Современная оптика гауссовых пучков* (М., Физматлит, 2010).
- [5] K. Efimova, S. Kotova, N. Losevsky, et al., International Conference Laser Optics, 2018 (ICLO, Saint Petersburg, 2018), p. 52. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=8435185>.
- [6] К. Н. Афанасьев, С. А. Кишкин, Известия Самарского научного центра РАН **14**(4), 184 (2012).
- [7] В. П. Аксенов, В. Ю. Венедиктов, А. А. Севрюгин, И.М. Турсунов, Оптика и спектроскопия **124**(2), 275 (2018).
- [8] К. В. Ефимова, Н. Н. Лосевский, Д. В. Прокопова, С. А. Самагин (XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, Самара, 2018), стр. 300-307; <http://laser-optics.ru/proceedings2018.pdf>.

Поступила в редакцию 1 марта 2019 г.

После доработки 4 апреля 2019 г.

Принята к публикации 4 апреля 2019 г.

Публикуется по результатам XVI Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции по оптике и лазерной физике (Самара).