

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНЫХ И ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВРАЩЕНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ

Е. Н. Воронцов¹, С. П. Котова¹, Н. Н. Лосевский¹,
Д. В. Прокопова^{1,2}, С. А. Самагин¹

Представлены результаты численного моделирования и экспериментов по влиянию амплитудных и фазовых искажений на формирование световых полей, обладающих свойством вращения распределения интенсивности при распространении. Рассмотрены практически значимые случаи амплитудных и фазовых искажений с регулярным и хаотичным типом неоднородностей.

Ключевые слова: двухлепестковые световые поля, спиральные пучки света, амплитудные искажения, фазовые искажения.

Введение. Световые поля с вращением распределения интенсивности при распространении [1] нашли применение в различных прикладных задачах [2–4]. Для увеличения разрешения флуоресцентных оптических микроскопов в продольном направлении было предложено применять фазовые маски, изменяющие оптическую передаточную функцию системы таким образом, чтобы функция размытия точки представляла собой два ярких пятна, вращающихся вокруг оси при дефокусировке [5]. Такие фазовые маски можно получить на основе оптики спиральных пучков [6]. Ранее была предложена фазовая маска [7], рассчитанная для освещения её световым полем с однородным распределением интенсивности и плоским или сферическим волновым фронтом. Распределение фазы этой маски и сформированное при её помощи поле представлены на рис. 1. В реальной микроскопической схеме характеристики светового поля и используемого фазового транспаранта могут в той или иной степени отличаться от рассматриваемых при расчетах. В данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального изучения влияния таких отличий (амплитудных и фазовых искажений, ха-

¹ Самарский филиал ФИАН, 443011 Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, 221.

² Самарский университет, 443086 Россия, Самара, Московское ш., 34; e-mail: prokopovadv@gmail.com.

раактерных для оптической схемы микроскопа со встроенным фазовым транспарантом) на формируемое маской двухлепестковое световое поле.

Методы. Численное моделирование распространения светового поля за фазовым элементом проводилось в рамках скалярной теории дифракции в параксиальном приближении. Распределения интенсивности на различном удалении от фазовой маски вычислялись в приближении Френеля. В расчётах использовалось быстрое преобразование Фурье. Экспериментальное формирование двухлепестковых полей осуществлялось с помощью фазового жидкокристаллического пространственного модулятора света (ЖК ПМС) HOLOEYE NEO-1080P, работающего в режиме отражения. Для освещения применялся твердотельный лазер ИЛТН-4001 (мощность до 50 мВт, $\lambda = 532$ нм). На модуляторе дополнительно генерировалось фазовое распределение, соответствующее собирающей линзе с фокусным расстоянием $f = 50$ см. Для регистрации распределения интенсивности использовалась матрица цифровой камеры Canon EOS 350D DIGITAL.

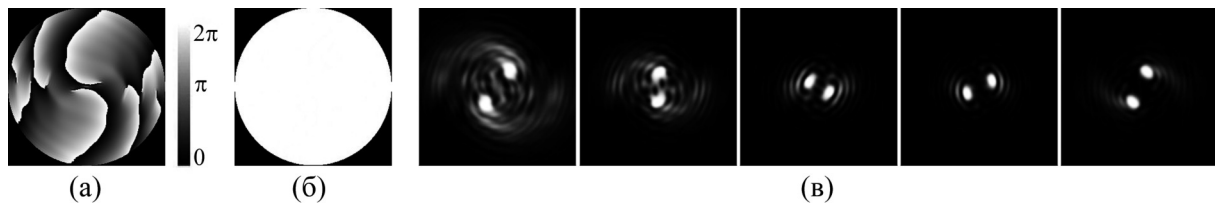


Рис. 1: Фазовое распределение (а) маски, формирующей двухлепестковое поле; (б) распределение интенсивности освещающего пучка; (в) результат расчета распределения интенсивности в различных сечениях.

Влияние амплитудных искажений. Амплитудные искажения были представлены различными распределениями интенсивности освещающего фазовую маску пучка (несовпадение диаметров транспаранта и освещающего гауссова пучка, относительное смещение центров освещающего гауссова пучка и транспаранта, хаотическая модуляция интенсивности освещающего пучка, регулярная кольцеобразная модуляция интенсивности освещающего пучка). В результате исследования установлено:

1. Для четкого формирования двухлепесткового поля, полуширина гауссова освещающего пучка по уровню спада интенсивности $\frac{1}{e^2}$ должна быть ≥ 0.8 радиуса фазовой маски, а величина смещения центра пучка относительно центра маски должна быть меньше 20% от полуширины освещающего пучка.

2. Формирование двухлепесткового поля удовлетворительного качества возможно при наличии регулярных и хаотичных неоднородностей (шумов) в распределении ин-

тенсивности освещающего пучка с плоским волновым фронтом, если в области основных частот пространственного спектра формируемого поля амплитуды спектра шумов малы.

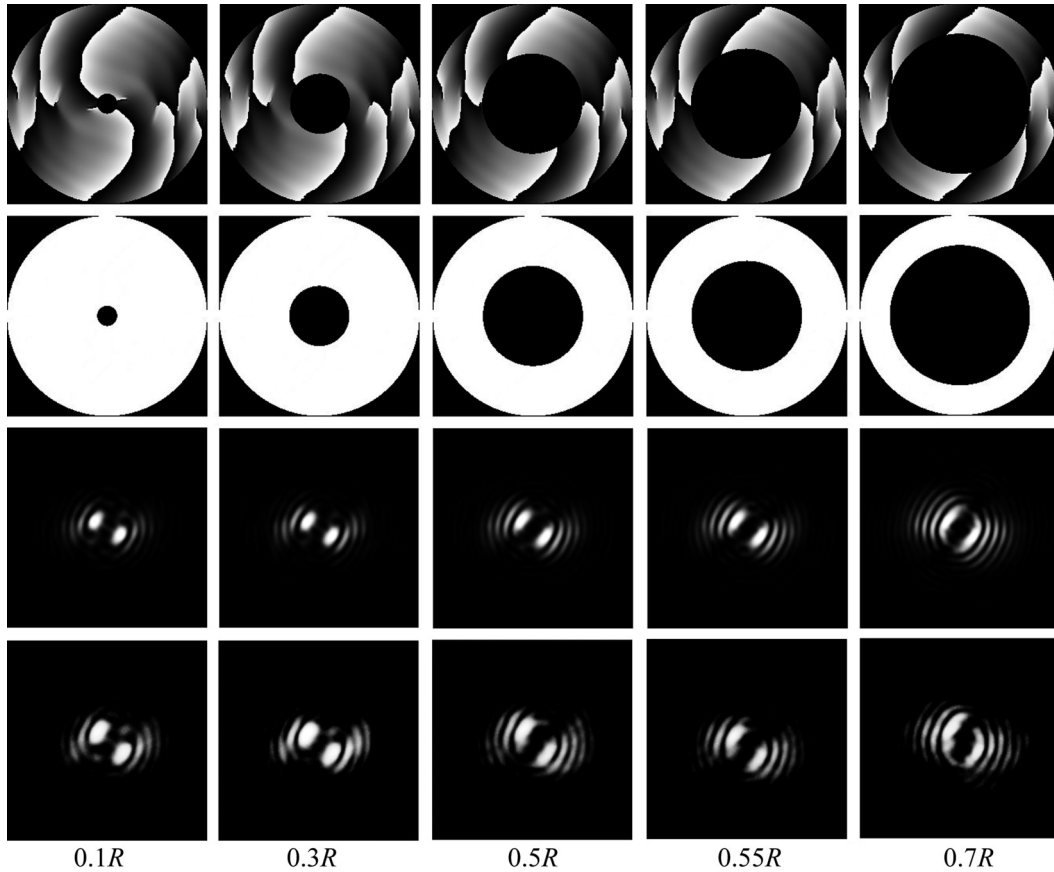


Рис. 2: Формирование двухлепесткового поля при освещении кольцом. Верхний ряд – фазовое распределение. Второй ряд – распределения интенсивности освещающего пучка. Третий и четвёртый ряды – расчетные и экспериментальные распределения интенсивности сформированного поля в плоскости фокусировки, соответственно.

Интересные результаты были получены при освещении фазовой маски световым полем с распределением интенсивности в виде кольца с внешним радиусом, равным радиусу фазового элемента (R), и переменным внутренним радиусом R_{cent} . Результат моделирования показал, а экспериментальная проверка подтвердила, что поле стабильно формируется до величины $R_{\text{cent}} < 0.55R$ (рис. 2). Если значение R_{cent} не превышает $0.3R$, то получаемое двухлепестковое поле имеет незначительное отклонение от требуемого. С ростом величины R_{cent} максимумы размываются в отрезки ($0.3R < R_{\text{cent}} < 0.55R$), да-

лее в дуги ($R_{\text{cent}} > 0.55R$), но даже при больших величинах $R_{\text{cent}} > 0.6R$ поле сохраняет свойство вращения распределения интенсивности при распространении. Это означает, что за формирование поля отвечают периферийные области элемента, что связано со структурой фазового фильтра, поскольку фазовые особенности (линии склейки фазы), “закручивающие” падающее излучение, находятся на его периферии (рис. 2).

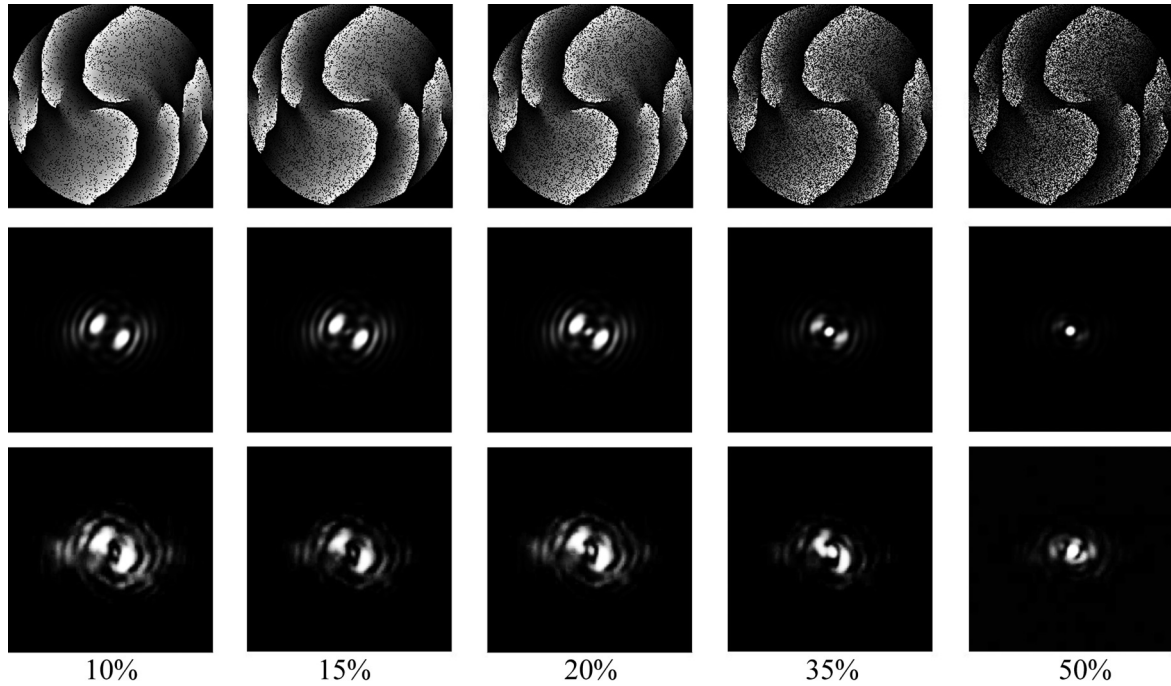


Рис. 3: Расчетные (средний ряд) и экспериментально полученные (нижний ряд) распределения интенсивности при различной степени деградации фазового элемента (верхний ряд). Степень деградации указана в процентах от площади фазового элемента.

Влияние фазовых искажений. Фазовые искажения, как известно, по сравнению с амплитудными оказывают более сильное воздействие на формирование световых полей. В работе [8] мы рассмотрели влияние aberrаций, представленных в виде полиномов Цернике, на двухлепестковые световые поля и установили, что при величинах амплитуд aberrаций $\lambda/8$ для сферической aberrации и комы и $\lambda/4$ для астигматизма в нормировке стандарта OSA формируемое поле сильно искажается. В данной работе проводилось исследование влияния хаотичных фазовых искажений. Этот случай может описывать ситуацию, когда для формирования поля используется многоэлементный ПМС и часть его пикселей не работает (фазовая задержка на них равна нулю). Найдено, что при

небольшом количестве “не работающих” пикселей ($<10\%$) формируемое поле практически не отличается от заданного. При увеличении их количества в центре картины начинает проявляться третий максимум. При 35% “не работающих” пикселей энергия во всех трех максимумах сравнивается, а при дальнейшем увеличении остается только один центральный максимум. Результаты моделирования и экспериментальной проверки приведены на рис. 3.

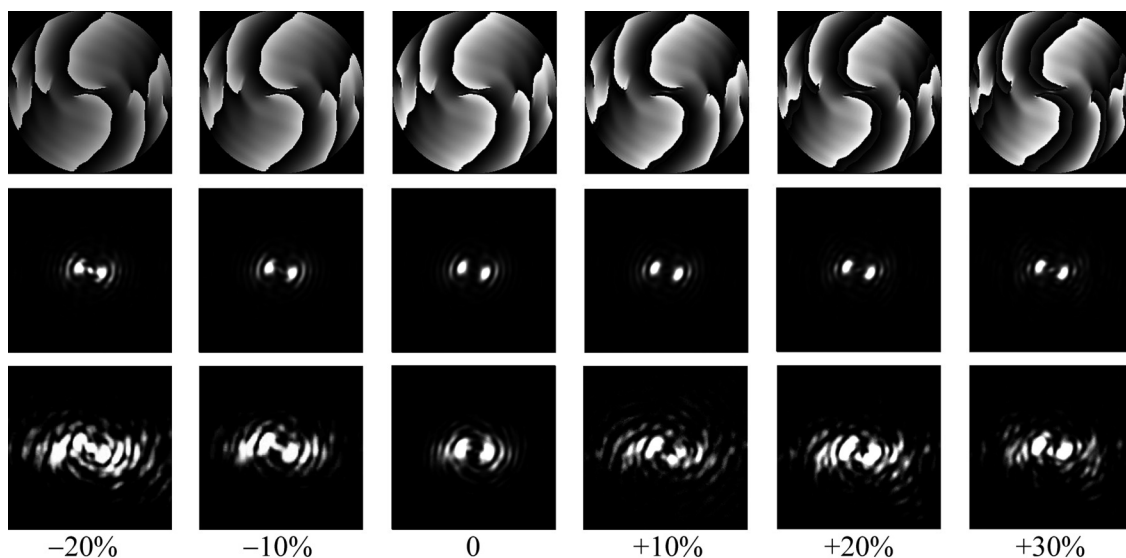


Рис. 4: Распределение интенсивности в плоскости фокусировки при неточном задании фазы. Средний ряд – результат моделирования. Нижний ряд – экспериментально полученные распределения интенсивности. Отклонение фазы указано в процентах.

Также проводилось моделирование неточного задания фазового распределения маски. Величина фазовой модуляции может измениться, если маска изготовлена для одной длины волны, а освещается излучением на другой длине волны или при формировании маски при помощи ПМС с неверной калибровкой. При моделировании предполагалось, что калибровочная кривая линейная, но диапазон изменения фазы не равен 2π . Результаты моделирования и экспериментов представлены на рис. 4. При уменьшении диапазона модуляции фазы меньше 2π идет перераспределение интенсивности в область нулевых пространственных частот. Интенсивность “лепестков” падает. При превышении диапазона модуляции фазы больше 2π наблюдается эффект “двоющихся лепестков” и возникает также максимум интенсивности в центре. Анализ полученных данных позволяет заключить, что допустимы отклонения глубины модуляции фазы до 10% в сторону уменьшения и до 20% в сторону увеличения от величины 2π .

Заклучение. В ходе проведенного численного моделирования и экспериментов установлен характер влияния амплитудных и фазовых искажений на формирование светового поля с вращением распределения интенсивности при распространении и оценены их допустимые величины. Полуширина освещающего фазовый элемент гауссова пучка должна быть ≥ 0.8 радиуса фазового элемента, допустимая величина смещения центра пучка относительно маски составляет 20% от полуширины пучка. Регулярные и хаотичные неоднородности в распределении интенсивности освещающего пучка с плоским волновым фронтом слабо влияют на качество формирования поля при условии, что пространственные спектры фазовой маски и шумов не перекрываются. Определяющую роль в формировании поля имеют периферийные области фазового элемента. Допустимые отклонения глубины модуляции фазы формирующей маски составляют до 10% в сторону уменьшения и до 20% в сторону увеличения от величины 2π . Число “не работающих” пикселей не должно превышать 10%.

Авторы выражают благодарность А. М. Майоровой за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-29-11809 офи_м).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Е. Г. Абрамочкин, В. Г. Волостников, УФН **174**, 1273 (2004).
- [2] D. G. Grier, Nature **424**(6950), 810 (2003).
- [3] E. G. Abramochkin, S. P. Kotova, A. V. Korobtsov, et al., Laser Physics **16**, 1 (2006).
- [4] A. V. Naumov, I. Y. Eremchev, A. A. Gorshelev, European Phys. J. D **68**(11), 348 (2014).
- [5] S. R. P. Pavani, R. Piestun, Optics Exp. **16**(5), 3484 (2008).
- [6] Е. Г. Абрамочкин, В. Г. Волостников, *Современная оптика гауссовых пучков* (М., Физматлит, 2010).
- [7] В. Г. Волостников, Е. Н. Воронцов, С. П. Котова и др., Известия РАН. Серия Физическая **80**(7), 841 (2016).
- [8] Е. Н. Воронцов, Н. Н. Лосевский, Д. В. Прокопова и др., Компьютерная оптика **40**(2), 158 (2016).

По материалам XV Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике

Поступила в редакцию 29 января 2018 г.