

Генерация суперпозиции скалярных вихревых пучков с применением многосекторных бинарных фазовых пластин

В. А. Шкуратова, Г. К. Костюк, А. А. Петров

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты применения изготовленных на плавном кварце многосекторных бинарных фазовых пластин для генерации суперпозиции скалярных вихревых пучков. В качестве инструмента травления секторов в пластинах использовалась лазерно-индуцированная микроплазма, обеспечивающая достижение глубины, требуемой для реализации фазового сдвига (π и $\pi/2$) относительно невытравленных секторов. Качество изготовленных пластин оценивалось с применением контактной профилометрии с вертикальным разрешением ± 10 нм и оптической микроскопии в режиме дифракционно-интерференционного контраста. Качество функционирования пластин исследовалось путем регистрации распределения интенсивности генерируемых состояний. Измеренная эффективность преобразования Гауссова пучка составила 92%. Одна из пластин была применена в оптической установке с наносекундным лазером (длина волны 1060 нм) для одновременной обработки полированной стали.

Ключевые слова: Вихревые пучки, Многосекторные бинарные фазовые пластины, Лазерно-индуцированная микроплазма.

Цитирование: Шкуратова, В. А. Генерация суперпозиции скалярных вихревых пучков с применением многосекторных бинарных фазовых пластин / В. А. Шкуратова, Г. К. Костюк, А. А. Петров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 88–91.

Введение

На текущий момент значительный интерес проявляется к способам генерации суперпозиции оптических вихревых пучков (ОВП) [1, 2], которые все чаще применяются при лазерной микро- и нанообработке, оптическом манипулировании, в коммуникациях. Многосекторные бинарные фазовые пластины (МБФП) позволяют осуществлять генерацию суперпозиции ОВП [1], осуществляя при этом мультиплицирование Гауссова пучка в серию пространственно-разделенных дифракционно-ограниченных пятен (ДОП), окружающих по периметру центральную область с интенсивностью, стремящейся к нулю. Применение МБФП обусловлено простотой их конструирования и надежностью использования по сравнению с другими оптическими элементами. Для изготовления МБФП могут быть использованы литографические методы и прямая лазерная запись фемтосекундными импульсами [1].

1. Материалы и методы

В настоящем исследовании для изготовления МБФП с разницей фаз π и $\pi/2$ на плавном кварце предлагается использовать технологию обработки прозрачных диэлектриков лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП) (рис. 1) [3]. Глубина травления секторов для МБФП с разницей фаз π определяется как $h = \lambda/2(n - 1)$, для МБФП с разницей фаз $\pi/2$ – $h = \lambda/4(n - 1)$, где n – показатель преломления материала МБФП, λ – длина волны излучения.

Процесс формирования микрорельефа ЛИМП является многоэтапным: (i) сначала энергия от лазерного излучения преобразуется к энергии плазмы, (ii) затем от энергии плазмы к энергии разрушения материала. Таким образом, результаты воздействия ЛИМП на прозрачный диэлектрик не имеют прямой аналитической зависимости от характеристик лазерного излучения [3], поэтому выбор параметров лазерного облучения для изготовления МБФП осуществлялся экспериментально.

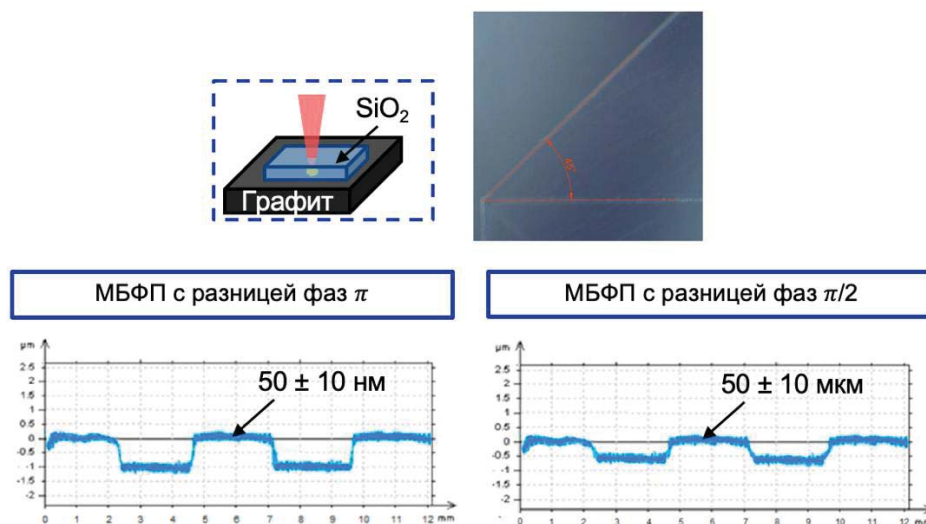


Рис. 1. Изготовление МБФП: суть технологии ЛИМП, микрофотография с оптического микроскопа, измеренные профилограммы

Анализ соответствия экспериментально полученных глубин травления секторов МБФП расчетным значениям проводился с использованием контактного профилометра с ошибкой измерения ± 10 нм. Исследование качества поверхности в вытравленных секторах (в области воздействия ЛИМП) осуществлялась на оптическом микроскопе в дифракционно-интерференционном режиме.

Для оценки качества функционирования МБФП с разницей фаз π и $\pi/2$, изготовленных для $\lambda = 1.06$ мкм, проводилось их тестирование в оптической схеме с применением ПЗС камеры (рис. 2). МБФП с уровнями фазы 0 и π также была применена при лазерной обработке пластины нержавеющей стали. Для оценки эффективности конверсии энергии МБФП проводились измерения мощности лазерного пучка, падающего на МБФП и выходящего из них.

2. Результаты

Измеренная на контактном профилометре глубина травления изготовленных МБФП с разницей фаз π составила 1.180 ± 0.010 мкм, с разницей фаз $\pi/2$ – 0.590 ± 0.010 мкм. Шероховатость поверхности в области воздействия ЛИМП составила 50 ± 10 нм (рис. 1). Микрофотография с оптического микроскопа показывает отсутствие трещин, выколов и напряжений в вытравленных секторах (рис. 1).

Зарегистрированные распределения интенсивности в дальнем поле (рис. 2), полученные с применением изготовленных МБФП, доказали работоспособность элементов и показали, что

количество формируемых в дальнем поле ДОП соответствует количеству секторов в МБФП с уровнями фазы 0 и π , а количество ДОП для МБФП с уровнями фазы 0 и $\pi/2$ в 2 раза меньше количества секторов. Также было установлено, что при числе секторов, превышающем 10, в формируемом распределении происходит увеличение эллиптичности и сближение ДОП. Измеренная эффективность конверсии энергии МБФП составила 92%. При установке в оптическую схему МБФП с разницей фаз π в результате абляции под действием ДОП были получены отпечатки одинакового размера в форме круга на образце полированной нержавеющей стали (рис. 2).

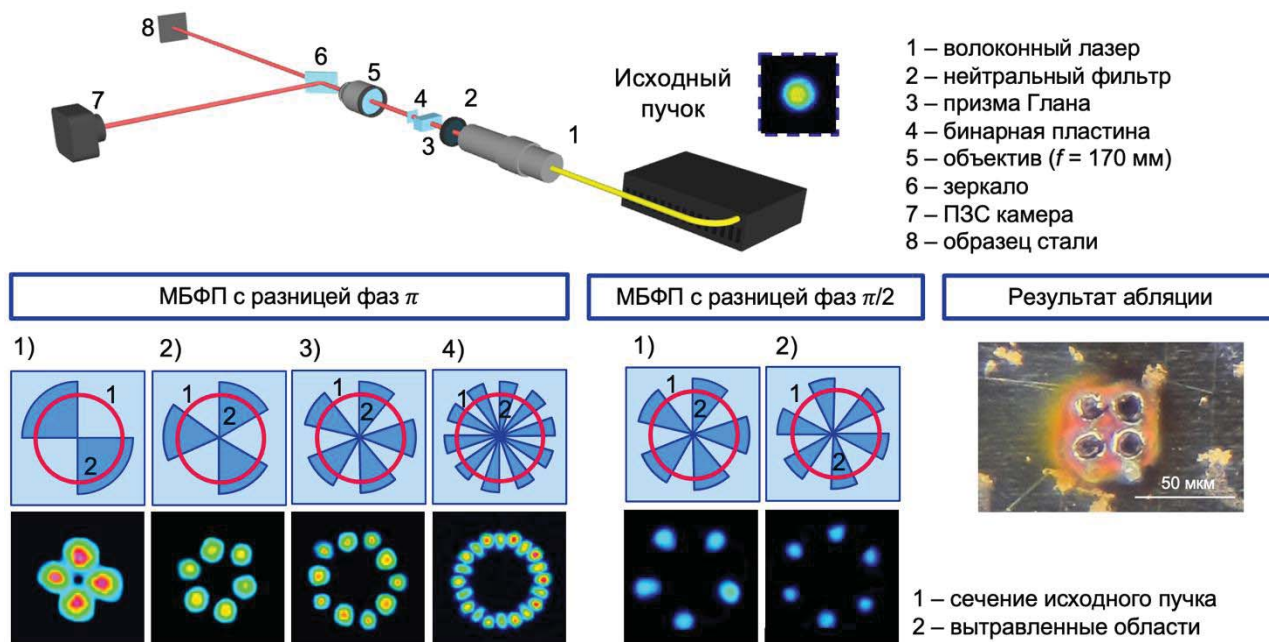


Рис. 2. Результаты тестирования МБФП: экспериментальная установка, зарегистрированные на ПЗС камере распределения интенсивности, микрофотография абляции полированной стали

Заключение

Определены оптимальные параметры записи МБФП технологией ЛИМП, позволяющие достичь заданную глубину травления на плавленом кварце, необходимую для их функционирования. При тестировании изготовленных МБФП с разницей фазы π и $\pi/2$ было установлено, что с их применением осуществляется генерация суперпозиции ОВП в форме ДОП, окружающих область нулевой интенсивности. Были получены отпечатки на образце полированной стали при использовании МБФП с уровнями фазы 0 и π . Отпечатки по форме близки к кругу и обладают одинаковыми размерами. Результаты одновременной обработки стального образца демонстрируют реальные перспективы применения МБФП как для лазерной обработки металлов, так и для лазерной обработки других материалов.

Благодарность

Работа поддержана Российским научным фондом [проект № 20-71-10103].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhou, L.** et al. Directly writing binary multi-sector phase plates on fused silica using femtosecond laser / L. Zhou et al. // High Power Laser Science and Engineering. — 2018. Vol. 6. — N. e6. — P. 1-5.
- [2] **Khonina, S. N., Volotovskiy, S. G.** Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S. N. Khonina, S. G. Volotovskiy // Journal of the Optical Society of America A. — 2010. Vol. 27. — N. 10. — P. 2188-2197.
- [3] **Veiko, V. P.** Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media / V. P. Veiko et al. Quantum Electronics. — 2017. Vol. 47. — N. 9. — P. 842-848.

Generation of scalar vortex beams superposition using multisector binary phase plates

V. A. Shkuratova, G. K. Kostyuk, A. A. Petrov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The research describes the application results of multisector binary phase plates fabricated on fused silica to generate the optical vortex beams superposition. Laser-induced microplasma was used as a spot tool for etching sectors which provides the required phase shifts $-\pi$ and $\pi/2$ relative to non-etched sectors. Etched sectors were controlled by contact profilometry with vertical resolution ± 10 nm and diffraction-interference contrast optical microscopy. The quality of generated superposition states was evaluated with CCD camera. Measured efficiency of Gaussian beam conversion equaled to 92%. One of plates was used in an optical setup with the nanosecond laser (the wavelength of 1060 nm) for simultaneous processing of polished steel.

Keywords: Vortex beams, Multisector binary phase plates, Laser-induced microplasma.