

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ФАЗОВЫХ ПЛАСТИН

В. С. РЫМКЕВИЧ, Р. А. ЗАКОЛДАЕВ, М. М. СЕРГЕЕВ, Г. К. КОСТЮК

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: zakoldaev@gmail.com*

Продemonстрировано применение метода обработки прозрачных материалов лазерно-индуцированной микроплазмой для создания многоуровневых фазовых пластин на поверхности плавленого кварца. Описана оптимизация этого метода для существующей лазерной установки „Минимаркер-2“ на основе Yb-волоконного лазера с наносекундной длительностью импульсов (50—200 нс). Разработано программное обеспечение, позволяющее связать параметры лазерной обработки с глубиной рельефа микроструктур, а также генерировать многоуровневые фазовые пластины в автоматическом режиме. На основе полученных результатов записаны образцы многоуровневых фазовых пластин с бинарной и дискретной структурой, рассчитанные для тестирования в схеме с He-Ne-лазером. Представлены результаты сравнительного анализа применения бинарной и дискретной фазовых пластин в качестве гомогенизаторов излучения He-Ne-лазера. Показано, что более равномерное распределение интенсивности в сечении пучка достигается при использовании дискретной фазовой пластины. Данный метод лазерной записи дифракционных элементов позволяет изготавливать фазовые пластины с глубиной рельефа от 0,1 до 15,0 мкм с шагом 50 нм и минимальным размером единичного элемента 200 мкм.

Ключевые слова: *плазма, плавленый кварц, фазовая пластина, гомогенизация, лазерная микрообработка*

Введение. Тенденция развития технологий обработки материалов мощным лазерным излучением обусловлена высоким качеством, производительностью и точностью данных технологий. Одной из ключевых особенностей лазерной обработки является создание однородного распределения энергии по сечению пучка [1]. Отсутствие однородного распределения энергии излучения в плоскости обработки приводит к неоднородным условиям микрообработки материала в зоне лазерного воздействия. Эффективным решением этой серьезной проблемы является использование методов сглаживания пучка, основанных на теории оптической дифракции [2]. Были предложены, изготовлены и протестированы различные виды дифракционных оптических элементов (ДОЭ), изменяющих распределение лазерных пучков [3, 4]. Частным вариантом таких ДОЭ являются случайные фазовые пластины (СФП), которые, как правило, используются с низкокогерентными лазерными пучками [5]. В большинстве случаев это связано с их высокой дифракционной эффективностью, удобством контроля за распределением интенсивности в пятне и низкими оптическими потерями [6].

В качестве материала для изготовления различных ДОЭ используется плавленый кварц, который обладает минимальным поглощением излучения в широком спектральном диапазоне, а также характеризуется высокой лучевой и термической стойкостью [7]. С другой стороны, эти

же свойства приводят к сложности его микрообработки, что зачастую связано с особыми технологическими процессами и требует использования специального оборудования. Одним из наиболее распространенных методов создания ДОЭ на поверхности плавленого кварца является фотолитография, которая, как правило, характеризуется безупречным качеством исполнения, но требует серьезных материальных вложений, что в дальнейшем повышает себестоимость продукции [8]. Альтернативой фотолитографии, с этой точки зрения, могут стать различные способы лазерной обработки поверхности стекла, такие как прямая лазерная запись [9], обработка лазерно-индуцированной плазмой, сухое лазерное травление [10] и др. Активное развитие лазерно-индуцированных методов записи ДОЭ на стекле обусловлено относительной простотой и гибкостью технологического процесса, а также малой длительностью изготовления элементов за счет автоматизации процесса. Однако и эти методы имеют существенные недостатки, основным из которых является невысокая точность глубины создаваемого микрорельефа. Решение этой проблемы следует искать в создании методик систематизации экспериментальных данных, позволяющих связать параметры режимов лазерного облучения и свойства обрабатываемого материала (и мишени) с глубиной, размерами и шероховатостью формируемого микрорельефа. Соответственно оптимизация протекающих процессов при микроструктурировании поверхности оптического материала позволит повысить точность изготовления ДОЭ.

В настоящей статье представлены результаты проектирования, изготовления и тестирования СФП с многоуровневой структурой. Пластины были изготовлены методом обработки стекла лазерно-индуцированной микроплазмой (далее — метод ЛИМП), описанным ранее в работах [11, 12]. Именно этот метод формирования на плавленом кварце массивов микролинз, а также фазовых решеток с синусоидальным и прямоугольным профилем без ухудшения оптических характеристик рабочей поверхности рассмотрен в работах [13, 11]. Настоящее исследование посвящено автоматизации метода ЛИМП при записи многоуровневых структур на плавленом кварце, частным случаем которых является СФП. Разработаны соответствующие базы данных. По результатам автоматизации были записаны образцы СФП с бинарной и дискретной структурой, рассчитанные для дальнейшего тестирования при длине волны 0,633 мкм.

Структура СФП. Для гомогенизации низкокогерентных ($l_k \sim 10^{-2}$ м и $t_k \sim 10$ с) источников лазерного излучения часто используются бинарные случайные фазовые пластины (БСФП) [14] (рис. 1, а). Каждый элемент пластины, имеющий вид элементарной ячейки, обеспечивает нулевой сдвиг фазы в локальной области лазерного пучка либо сдвиг на π . Излучение от каждой ячейки затем интерферирует в фокальной плоскости собирающей линзы. Глубина рельефа отдельно взятого элемента, обеспечивающего сдвиг фазы на π , определяется выражением [3]

$$h = \frac{\lambda}{2(n-1)},$$

где n — показатель преломления плавленого кварца.

Для гомогенизации излучения с высокой когерентностью ($l_k \sim 3 \cdot 10^5$ м и $t_k \sim 10^{-3}$ с) проектируются сложные многокомпонентные схемы, содержащие значительное количество оптических элементов, что, во-первых, существенно снижает их эффективность по использованию энергии излучения лазера, а во-вторых, влияет на себестоимость изготовления [15].

Наряду с этим существует вероятность того, что модификация шаблона бинарной фазовой пластины, в которой глубина рельефа элементарной ячейки будет дискретно варьироваться (см. рис. 1, б), обеспечивая сдвиг фаз в диапазоне от 0 до π , позволит использовать подобную пластину как единственный элемент в качестве гомогенизатора. Увеличение числа элементарных ячеек пластины приведет к увеличению количества накладывающихся интер-

ференционных картин в фокальной плоскости линзы и повышению качества распределения интенсивности излучения.

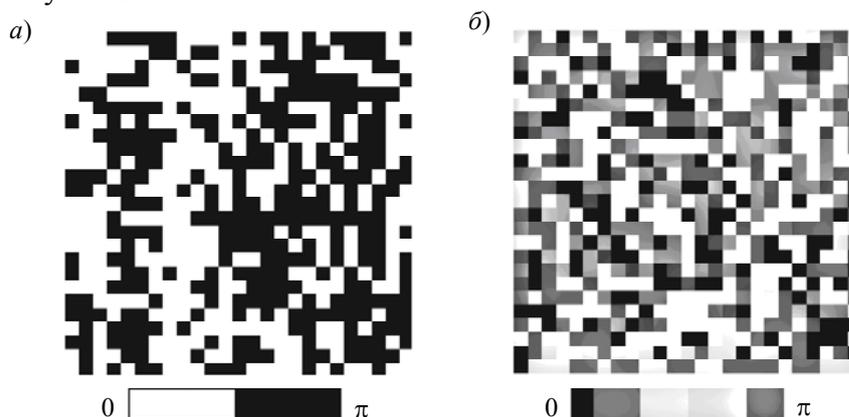


Рис. 1

Метод обработки стекла лазерно-индуцированной микроплазмой, рассмотренный в работе [12], реализован на коммерчески доступной лазерной установке „Минимаркер-2“. Формирование микрорельефа поверхности плавленного кварца осуществлялось сканированием сфокусированного лазерного пучка в плоскости контакта пластин стекла с мишенью. После микроструктурирования (рис. 2, а) поверхность стекла всегда была покрыта осевшими на нее в процессе обработки частицами графита. Очистка поверхности стекла от этих частиц производилась на том же макете установки. Рис. 2, б иллюстрирует положение загрязненной поверхности пластины стекла со слоем дистиллированной воды относительно падающего на нее пучка лазерного излучения. Очистка проводилась до полного удаления всех частиц графита.

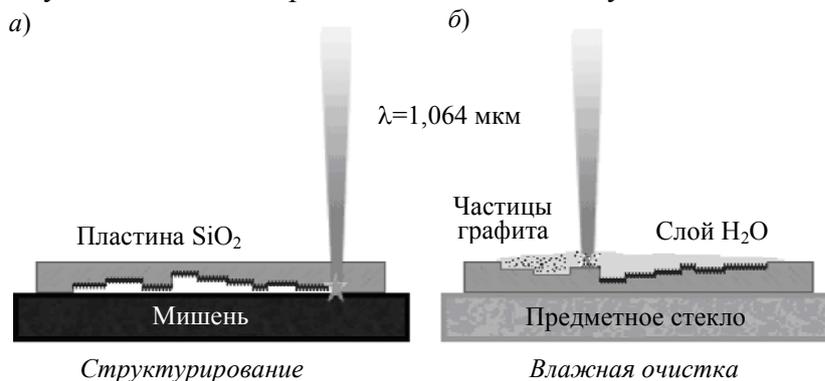
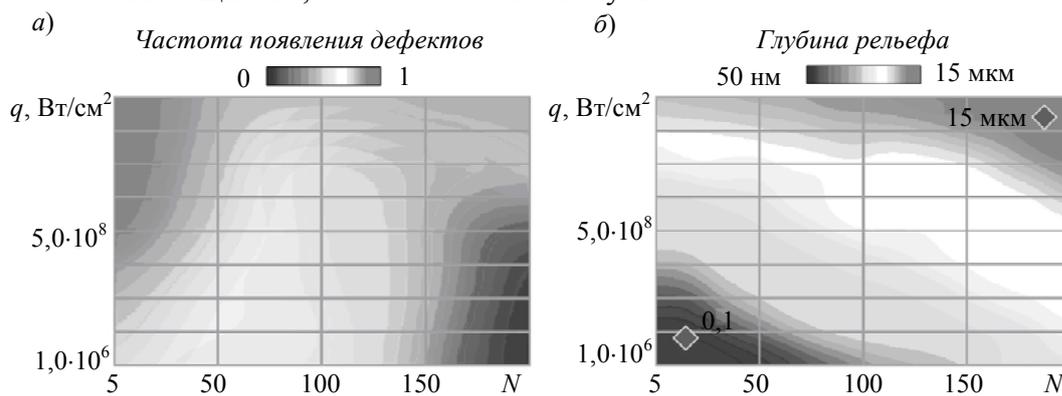


Рис. 2

Для создания дискретной случайной фазовой пластины (ДСФП) на плавленном кварце методом ЛИМП необходимо определить зависимость глубины формируемого микрорельефа от параметров лазерной обработки. Существенное влияние на глубину формируемого микрорельефа, помимо параметров лазерной обработки, оказывают обрабатываемый материал — плавленный кварц и материал подложки, поглощающий лазерное излучение. Отсюда следует, что поиск аналитической зависимости для вычисления глубины формируемого микрорельефа является сложной задачей. Поэтому создание базы данных (далее — карта глубин), связывающих значения глубин и параметры обработки плавленного кварца при использовании конкретной мишени, представляется более целесообразным. Микрорельеф поверхности стекла исследовался контактным методом на профилометре Hommelwerke T-8000.

Анализ карты глубин. При составлении карты глубин в общей сложности было исследовано 2400 элементарных ячеек. Микрорельеф, формируемый при разных режимах обработки, имеет разное качество и глубину. Поэтому для выявления наиболее подходящего диапазона режимов, а также определения шага разрешения по глубине, допустимого при методе ЛИМП, были статистически исследованы вероятности появления дефектов микрорельефа и

его глубины. Результаты обработки приведены на диаграммах: см. рис. 3, а, б соответственно, где q — плотность мощности, N — количество импульсов.



Путем варьирования параметров обработки определена минимальная глубина формируемого микрорельефа, соответствующая 50 ± 10 нм, и разрешение шага по глубине 50 ± 10 нм. Также выявлена зависимость возникновения дефектов в записанной ячейке: установлено, что увеличение количества импульсов N , приходящихся на область обработки, при постоянной плотности мощности q сводит вероятность появления дефектов к минимуму, а увеличение значения q при постоянном N способствует повышению вероятности возникновения дефектов. При этом глубина h рельефа ячеек увеличивается с ростом q и N . С учетом полученных результатов оптимальные режимы обработки выбирались таким образом, чтобы при средней плотности мощности достигалось большое количество импульсов.

Создание случайных фазовых пластин. Полученная карта глубин была использована для создания ДСФП и БСФП, которые в дальнейшем были подвергнуты сравнительному анализу. Тестирование СФП в качестве гомогенизаторов лазерного излучения было произведено на экспериментальной установке с He-Ne-лазером (рис. 4). Пучок лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 0,633$ мкм расширялся телескопической системой с увеличением $4\times$, проходил через установленную СФП и фокусировался собирающей линзой на матрице ПЗС-камеры.



Тестирование образцов осуществлялось следующим образом: в фокальной плоскости линзы регистрировалось распределение интенсивности излучения исходного лазерного пучка. Затем в расширенный пучок устанавливалась СФП и регистрация проводилась вновь. После чего вносились искажения в исходный пучок, и регистрация распределения сначала выполнялась для него, а далее — для искаженного пучка, в который установлена одна из СФП.

В соответствии с приведенной выше формулой для плавленого кварца ($n = 1,457$) глубина рельефа элементарной ячейки, обеспечивающего сдвиг фазы на π , должна составлять $0,692$ мкм. С помощью разработанного программного обеспечения [16] были сгенерированы шаблоны БСФП и ДСФП, а из полученных карт глубин были выбраны режимы их записи.

Сформированная бинарная СФП была исследована оптическим методом и сканированием поверхности контактным методом на профилометре. Результаты исследования представлены на рис. 5, где *а* — общий вид БСФП, *б* — микрофотография поверхности, *в* — топография поверхности, *г* — профиль участка поверхности. Полученная профилограмма подтверждает повторяемость записи ячеек с определенной глубиной рельефа при использовании режимов, выбранных из карты глубин.

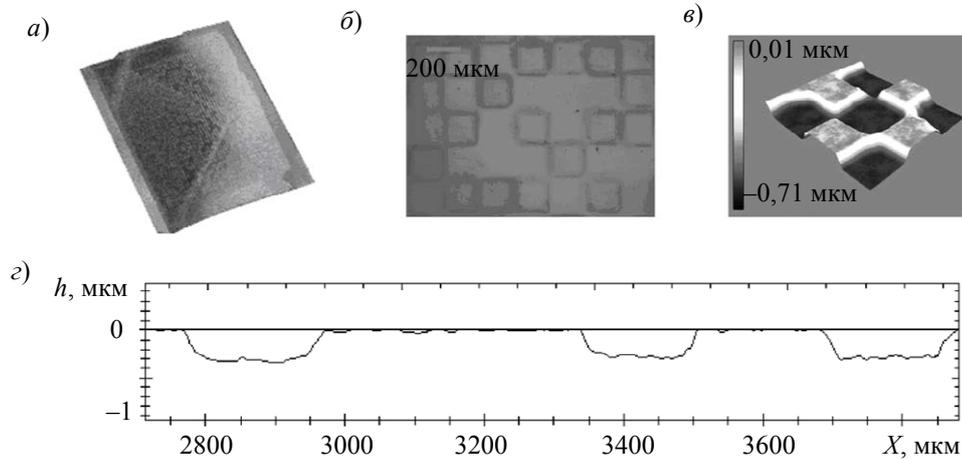


Рис. 5

Тестирование сформированной БСФП проводилось в соответствии с описанным выше порядком (см. рис. 4). На рис. 6, *а* показано распределение интенсивности исходного пучка He-Ne-лазера в фокальной плоскости собирающей линзы. На снимке видно, что картина соответствует распределению Гаусса в исходном пучке. Установка БСФП после телескопической системы привела к тому, что вблизи фокальной плоскости собирающей линзы вид дифракционной картины изменился, а максимум в центральной ее части стал более равномерным (рис. 6, *б*). Однако добиться распределения формы профиля пучка с плоской вершиной не удалось. Относительное стандартное отклонение регистрируемого профиля от профиля с равномерным распределением составило 58 %.

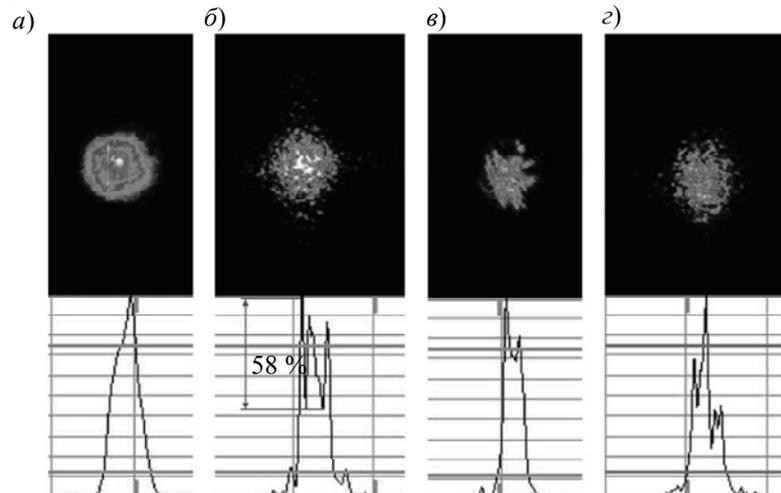


Рис. 6

Работоспособность данной СФП была также проверена при исследовании качества восстановления искаженного пучка (рис. 6, *в*). При введении БСФП в искаженный пучок получено равномерное распределение (рис. 6, *г*). Однако интенсивность в центральной части дифракционной картины, как и в случае неискаженного пучка, осталась без изменений.

Шаблон ДСФП содержал пять ячеек (рис. 7, *а*), обеспечивающих нулевой сдвиг фаз и сдвиг фаз на $\pi/4$ (180 нм), $\pi/2$ (350 нм), $3\pi/4$ (530 нм), π (700 нм). Сформированный образец был исследован с использованием оптической микроскопии и контактной профилометрии

(см. рис. 7, где *б* — микрофотография поверхности ДСФП в отраженном свете, *в* — топология поверхности, *г* — профиль участка поверхности).

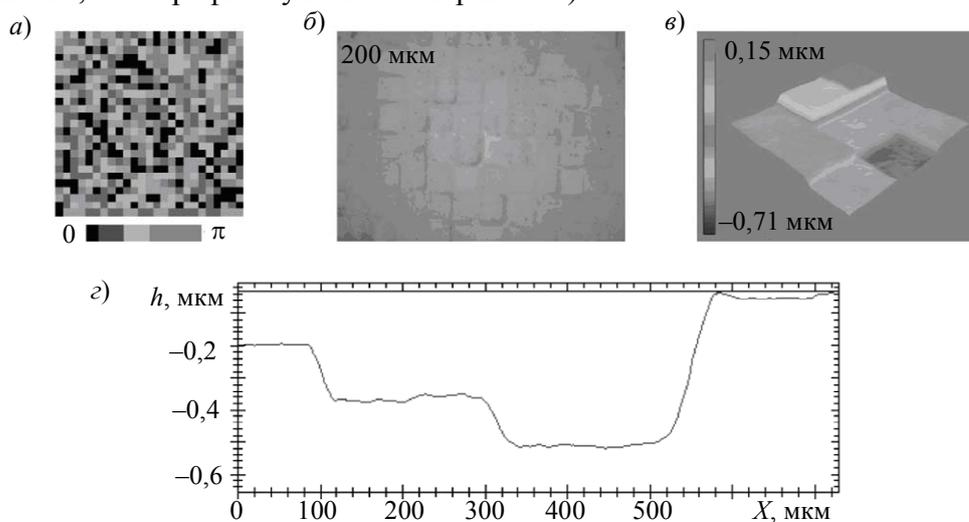


Рис. 7

Профилограмма поверхности ДСФП показала хорошее совпадение с данными из карты глубин. ДСФП была протестирована в соответствии с последовательностью тестирования БСФП: см. рис. 8, где *а* — исходное распределение интенсивности излучения по сечению пучка, *б* — лазерный пучок с введенной ДСФП, *в* — искаженный пучок, *г* — искаженный пучок с введенной пластиной.

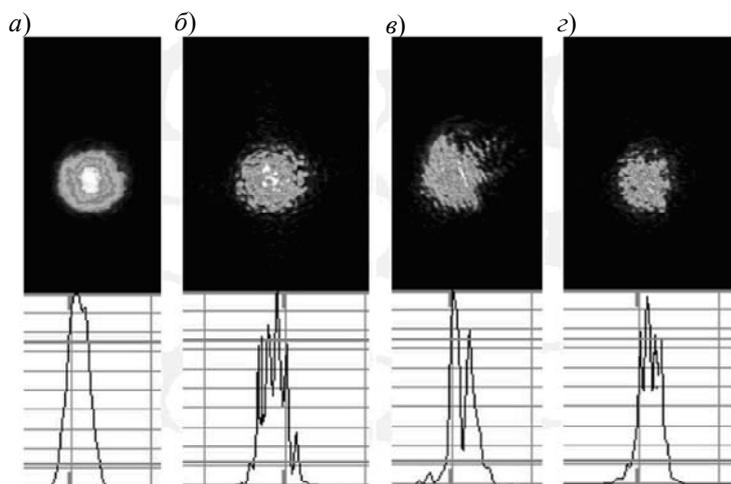


Рис. 8

Введение исследуемой ДСФП в оптическую систему показало результат, аналогичный использованию БСФП. Однако ДСФП обеспечивает более значительное, по сравнению с БСФП, перераспределение интенсивности в дифракционной картине по отношению к центральному максимуму. Как показывает анализ рис. 8, *б*, средняя модуляция интенсивности дифракционной картины составила 45 %. Исправление дифракционной картины искаженного пучка в фокальной плоскости собирающей линзы при использовании ДСФП (см. рис. 8, *г*) оказалось более эффективным, чем в случае БСФП. Видно, что уровень большинства пиков интенсивности в профиле обладает одинаковой интенсивностью.

Заключение. В ходе исследований метод ЛИМП, применяемый для микрообработки поверхности плавленого кварца, был дополнен возможностью управления глубиной рельефа формируемых элементов, имеющих вид элементарных ячеек. Для этого была предложена методика поиска оптимальных режимов записи микроструктур с заданной глубиной рельефа ячеек и разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать этот процесс.

Составлена база данных, именуемая картой глубин, позволяющая связать основные параметры лазерной обработки и глубину формируемого микро рельефа. В результате записаны случайные фазовые пластины с бинарной и дискретной структурой с заданной глубиной микро рельефа.

В результате исследований выявлено, что использование дискретной структуры случайной фазовой пластины для получения равномерного распределения интенсивности по сечению пучка более предпочтительно, чем использование бинарной структуры. Тем не менее вопрос о применении ДСФП в качестве гомогенизатора высококогерентных пучков для лазерной микрообработки до сих пор остается открытым и требует дальнейших исследований. В частности, в ДСФП, исследуемой в настоящей работе, было реализовано 5 различных сдвигов фаз при размере элементарной ячейки 200 мкм, что не позволило получить стандартное отклонение профиля от равномерного распределения интенсивности менее 50 %. Возможным решением проблемы снижения отклонения профиля распределения интенсивности представляется создание ДСФП, в которой число глубин, отвечающих сдвигу фаз $0-\pi$ в элементарных ячейках, было бы увеличено, например, до 10.

Управление глубиной формируемого рельефа является ключевым моментом при создании различных дифракционных оптических элементов. Поэтому реализация усовершенствованного метода ЛИМП при формировании СФП, требующих высокой точности при задании глубины рельефа, — первый шаг к решению этой актуальной задачи; ее решение в будущем позволит использовать данную технологию для записи на стекле более сложных и многоуровневых ДОЭ с фазовым преобразованием излучения.

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук, проф. кафедры лазерных технологий и систем Университета ИТМО Е. Б. Яковлеву за обсуждение результатов исследования.

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.587.21.0037 (RFMEFI58717X0037).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang C. et al. A novel design method for continuous-phase plate // *Opt. Express*. 2013. N 21(9). P. 11171—11180.
2. Veron D. et al. Optical spatial smoothing of Nd-glass laser beam // *Opt. Communications*. 1988. N 65(1). P. 42—46.
3. Kato Y. et al. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression // *Phys. Rev. Lett.* 1984. N 53(11). P. 1057.
4. Włodarczyk K. L. et al. Laser smoothing of binary gratings and multilevel etched structures in fused silica // *Appl. Opt.* 2010. N 49(11). P. 1997—2005.
5. Lewis C. et al. Use of a random phase plate as a KrF laser beam homogenizer for thin film deposition applications // *Rev. of Scientific Instruments*. 1999. N 70(4). P. 2116—2121.
6. Yang C. et al. Continuous phase plate for laser beam smoothing // *Appl. Opt.* 2008. N 47(10). P. 1465—1469.
7. Bansal N. P., Doremus R. H. *Handbook of Glass Properties*. Elsevier, 2013.
8. Baglin J. Ion beam nanoscale fabrication and lithography—a review // *Appl. Surface Science*. 2012. N 258(9). P. 4103—4111.
9. Beresna M., Gecevičius M., Kazansky P. G. Ultrafast laser direct writing and nanostructuring in transparent materials // *Advances in Optics and Photonics*. 2014. N 6(3). P. 293—339.
10. Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K. Laser-induced front side and back side etching of fused silica with KrF and XeF excimer lasers using metallic absorber layers: A comparison // *Appl. Surface Science*. 2012. N 258(24). P. 9742—9746.
11. Zakoldaev R. A. et al. Laser-induced black-body heating (LIBBH) as a method for glass surface modification // *J. of Laser Micro Nanoengineering*. 2015. N 10(1). P. 15—19.

12. *Kostyuk G. et al.* Fast microstructuring of silica glasses surface by NIR laser radiation // *Optics and Lasers in Engineering*. 2015. N 68. P. 16—24.
13. *Zakoldaev R. A. et al.* Microlens array fabrication on fused silica by LIBBH technology with CO₂ laser smoothing // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59, № 5. С. 400—406.
14. *Stevenson R. et al.* Binary-phase zone plate arrays for the generation of uniform focal profiles // *Opt. Lett.* 1994. N 19(6). P. 363—365.
15. *Cumme M. et al.* From regular periodic micro-lens arrays to randomized continuous phase profiles // *Advanced Optical Technologies*. 2015. N 4(1). P. 47—61.
16. Пат. 2016612921 РФ. Массив-менеджер “LIBBH Pipe-line” / В. П. Вейко, В. С. Рымкевич, В. В. Коваль, Г. К. Костюк, Ю. Ю. Карлагина, Р. А. Заколдаев, М. М. Сергеев // *Опубл.* 14.03.2016.

Сведения об авторах

- Владимир Сергеевич Рымкевич** — Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; инженер; E-mail: hellmapper@gmail.com
- Роман Алексеевич Заколдаев** — Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; инженер; E-mail: zakoldaev@gmail.com
- Максим Михайлович Сергеев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; инженер; E-mail: maks-sv-32@yandex.ru
- Галина Кирилловна Костюк** — Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и систем; ст. преподаватель; E-mail: kostyuk@lastech.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных технологий и систем

Поступила в редакцию
25.02.17 г.

Ссылка для цитирования: Рымкевич В. С., Заколдаев Р. А., Сергеев М. М., Костюк Г. К. Использование лазерно-индуцированной микроплазмы для изготовления многоуровневых фазовых пластин // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60, № 5. С. 431—439.

USING LASER-INDUCED MICROPLASMA FOR MULTILEVEL PHASE PLATE FABRICATION

V. S. Rymkevich, R. A. Zakoldaev, M. M. Sergeev, G. K. Kostyuk

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: zakoldaev@gmail.com

Application of the method of processing of transparent materials with laser-induced microplasma to create a multilevel phase plate on fused quartz surface is demonstrated. Optimization of the method for the existing laser system "Minimarker 2" based on Yb-fiber laser with a nanosecond pulse duration (50-200 NS) is described. A software is developed which allows to link parameters of laser treatment with deep relief microstructures, as well as to generate a multilevel phase plate in automatic mode. Based on the results, samples of layered phase plates with binary and discrete structure for testing with He-Ne laser setup are recorded. Comparative analysis of binary and discrete phase plates applied as homogenizers of He-Ne laser radiation is carried out. It is shown that a more uniform distribution of intensity in the beam cross-section is achieved by using discrete phase plate. The proposed method of laser writing of diffractive elements is reported to allow manufacturing of phase plates with a relief depth from 0.1 to 15.0 μm with a step of 50 nm and the minimum size of the cells of 200 μm.

Keywords: plasma, fused silica, phase plate, homogenization, laser micro-processing

Data on authors

- Vladimir S. Rymkevich** — ITMO University; Department of Laser Systems and Technologies; Engineer; E-mail: hellmapper@gmail.com
- Roman A. Zakoldaev** — ITMO University; Department of Laser Systems and Technologies; Engineer; E-mail: zakoldaev@gmail.com
- Maxim M. Sergeev** — PhD; ITMO University; Department of Laser Systems and Technologies; Engineer; E-mail: maks-sv-32@yandex.ru
- Galina K. Kostyuk** — ITMO University; Department of Laser Systems and Technologies; Senior Lecturer; E-mail: kostyuk@lastech.ifmo.ru

For citation: Rymkevich V. S., Zakoldaev R. A., Sergeev M. M., Kostyuk G. K. Using laser-induced microplasma for multilevel phase plate fabrication // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 5. P. 431—439 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-5-431-439