

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА  
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ И ОЧИСТКИ  
НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МНОГОСЕКТОРНЫХ БИНАРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЛАСТИН**

Г. К. Костюк, Д. С. Степанюк, В. А. Шкуратова\*, А. А. Петров, Н. А. Нестеров

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
*\*shkuratova\_va@mail.ru*

**Аннотация.** Исследовано влияние каждого этапа изготовления фазовых оптических элементов (ФОЭ), включающего запись ФОЭ лазерно-индуцированной микроплазмой и постобработку, на параметры микрогеометрии формируемого микрорельефа на поверхности ФОЭ, обеспечивающие их высокое качество и эффективность конверсии энергии. Также приводятся условия реализации каждого из этапов изготовления ФОЭ, позволяющие обеспечить повторяемость результатов по глубине микрогеометрии формируемого рельефа и значениям шероховатости его поверхности. Все исследования выполнены при использовании многосекторных бинарных фазовых пластин, выбор которых обусловлен относительной простотой их конструкции, по сравнению с другими ФОЭ аналогичного назначения. Показано, что лучшие результаты по значениям шероховатости поверхности ФОЭ при полном устранении частиц графита, загрязняющих поверхность многосекторных бинарных фазовых пластин, и возможных микро/нанодфектов и напряжений, возникающих в ходе записи технологией лазерно-индуцированной микроплазмы, достигаются постобработкой в виде отжига при температуре 900 °С в течение 1 ч.

**Ключевые слова:** лазерно-индуцированная микроплазма, кластерная абляция, постобработка, фазовые оптические элементы, многосекторные бинарные фазовые пластины, плавленый кварц

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО. Авторы выражают благодарность компании ООО „Лазерный Центр“ за предоставленное оборудование и Васильеву Олегу Сергеевичу, руководителю отдела „Поддержки и технологий“, за консультации.

**Ссылка для цитирования:** Костюк Г. К., Степанюк Д. С., Шкуратова В. А., Петров А. А., Нестеров Н. А. Влияние структурирования плавленого кварца лазерно-индуцированной микроплазмой и очистки на функционирование многосекторных бинарных фазовых пластин // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 747—762. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-747-762.

**THE EFFECT OF FUSED QUARTZ STRUCTURING  
BY LASER-INDUCED MICROPLASMA AND PURIFICATION  
ON MULTISECTOR BINARY PHASE PLATES OPERATION**

**G. K. Kostyuk, D. S. Stepanyuk, V. A. Shkuratova\*, A. A. Petrov, N. A. Nesterov**

*ITMO University, St. Petersburg, Russia*  
*\*shkuratova\_va@mail.ru*

**Abstract.** For each stage of phase optical elements (POEs) production, including the POEs recording with laser-induced microplasma and post-processing, the influence on the microgeometry parameters of the microrelief formed on the POE surface, which ensures their high quality and energy conversion efficiency, is studied. The conditions for the each of the POE manufacturing stages implementation providing repeatability of the stage results in terms of the formed microgeometry relief depth and characteristics of its surface roughness, are given. All the studies are carried out using multi-sector binary phase plates chosen for their relative simplicity of design compared to other POEs of a similar pur-

pose. It is shown that the best results on the PHE surface roughness with the complete elimination of graphite particles polluting the surface of multisectoral binary phase plates and possible micro/nanodefects and stresses arising during recording by laser-induced microplasma technology, are achieved by post-processing in the form of annealing at a temperature of 900 °C for 1 h.

**Keywords:** laser-induced microplasma, cluster ablation, post-processing, phase optical elements, multi-sector binary phase plates, fused quartz

**Acknowledgments:** The study was carried out with the financial support of the grant of the NORMA FT MF of ITMO University. The authors express their gratitude to Laser Center LLC for the equipment provided and to Oleg Sergeevich Vasiliev, Head of the Support and Technology Department, for consultations.

**For citation:** Kostyuk G. K., Stepanyuk D. S., Shkuratova V. A., Petrov A. A., Nesterov N. A. The effect of fused quartz structuring by laser-induced microplasma and purification on multisector binary phase plates operation. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 747—762 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-747-762.

**Введение.** Изготовлению фазовых оптических элементов (ФОЭ), широко применяемых для преобразования гауссовых пучков с линейной и циркулярной поляризацией в скалярные и векторные вихревые пучки, используемые в таких наукоемких областях, как лазерная микро- и нанообработка [1, 2], оптическое манипулирование [3, 4], создание систем коммуникации [5] и систем обработки и хранения информации [6], в последние десятилетия уделяется все больше внимания. Изготовление ФОЭ и систем из них предполагает микроструктурирование поверхности стекла, полимера или фоторезиста, оно заключается в изменении масштаба микро- или нанорельефа их поверхности. В большинстве работ по изменению рельефа поверхности материала, на котором производится запись ФОЭ, является плавленный кварц, обладающий прозрачностью в широком диапазоне длин волн 0,19—2,60 мкм и характеризующийся высоким порогом разрушения, позволяющим использовать такие ФОЭ с лазерным излучением со сверхкороткими импульсами.

В настоящее время для изготовления спиральных фазовых пластин (СФП), конвертирующих гауссов пучок с линейной поляризацией в скалярный вихревой, наряду с нелазерными технологиями изготовления ФОЭ, такими как электронно-лучевая литография [7—11], электронно-лучевое осаждение [12], полутонная лазерная литография [13], фотолитография с последующим плазменным травлением [14], используются технологии прямой [15, 16] и непрямой лазерной записи [17—19].

Технология электронно-лучевой литографии, наиболее интенсивно исследуемая в последние годы, позволяет изготавливать СФП с большим количеством секторов, приближающим профиль СФП к непрерывному, и с высоким качеством, обеспечивающим эффективность конверсии энергии ~70 % как на полимерах [7, 9], так и на плавленном кварце [8, 11, 20]. Эта технология является многоэтапной, длительность изготовления СФП по которой может составлять несколько часов.

Технология электронно-лучевого осаждения, основанная на нанесении многослойного покрытия пленок оксида кремния при последовательном использовании нескольких масок, также является многоэтапной и характеризуется значительной длительностью изготовления СФП. Но увеличение числа секторов в СФП при использовании этой технологии приводит не только к значительному усложнению процесса изготовления, но и его длительности.

В технологии лазерной полутонной литографии с последующим травлением индуктивно-связанной плазмой изготовление ФОЭ, несмотря на исключение применения масок, также остается длительным многостадийным процессом. Длительность процесса изготовления ФОЭ в этой технологии соизмерима со временем изготовления, характерным для технологий, основанных на литографии. Кроме того, этой технологией невозможно изготовить СФП, число секторов в которой превышает число уровней полутонной шкалы.

Относительно менее сложной в реализации и менее длительной, по сравнению с упомянутыми выше технологиями изготовления ФОЭ, является технология фотолитографии с последующим плазменным травлением, позволяющая достичь отклонений по глубине травления  $\pm 20$  нм.

О применении технологии прямой лазерной записи фемтосекундными лазерными импульсами для изготовления СФП микронного размера впервые сообщалось в работе [21]: в качестве резиста, на котором проводилась запись, был использован SZ080, наносимый на стеклянную пластину. Запись выполнялась лазерными импульсами с длительностью 150/180 фс на центральной длине волны излучения 800 нм с использованием фокусирующего объектива с числовой апертурой  $NA = 1,4$ . Процесс записи характеризовался очень малым временем изготовления. Эта первая публикация о прямой лазерной записи положила начало быстро растущей области исследования процесса изготовления ФОЭ технологией прямой лазерной записи для генерации и контроля оптических вихревых пучков, эффективность генерации которых могла достигать 100 %. Такая высокая эффективность генерации была обусловлена не только высокой точностью изготовления частей ФОЭ, но и высокой прозрачностью пленок резиста после полимеризации [21, 22]. Однако относительно низкий порог разрушения стекол, на которых были записаны ФОЭ, ограничивал применение подобных ФОЭ в системах с высокомоментными фемтосекундными импульсами. Это ограничение было успешно преодолено применением плавленого кварца в качестве материала для записи [13]. Технологией прямой лазерной записи были изготовлены способные генерировать суперпозицию оптических вихревых пучков ФОЭ диаметром 500 мкм, известные как „многосекторные бинарные фазовые пластины“ (МБФП) [23].

Технология непрямой лазерной записи на прозрачных диэлектриках посредством лазерно-индуцированной микроплазмы (ЛИМП, или LIBBH — Laser Induced Black Body Heating) была применена для изготовления широкого класса ФОЭ на плавленом кварце [24, 25], включая СФП [26]. Данная технология используется не менее широко, чем прямая лазерная запись.

Под ЛИМП принято понимать лазерную эрозионную плазму, образующуюся на границе прозрачной и поглощающей сред при абляции последней. Особым условием существования ЛИМП является режим ограничения ее расширения, когда в качестве прозрачной среды используется жидкость или твердое тело. Особая разновидность плазмы, образующаяся в зазоре между прозрачной и поглощающей средами при размере зазора, соизмеримом с шероховатостью поверхностей этих сред, характеризуется специфическими параметрами, позволяющими применять ЛИМП для микроструктурирования прозрачных диэлектриков.

На действии ЛИМП, образующейся при абляции поглощающей среды, основан целый ряд технологий обработки прозрачных диэлектриков, к которым относятся: LIPAA (Laser Induced Plasma Assisted Ablation) [18], LIBDE (Laser Induced Back Side Dry Etching) [19, 27], LIFE (Laser Induced Front Side Etching) [28] и др. [29—33]. При использовании одних технологий прозрачная для лазерного излучения среда находится в плотном контакте с поглощающей мишенью [27, 33], при использовании других — на некотором небольшом расстоянии от нее [29, 31]. Величина зазора даже в случае одинаковых параметров лазерного излучения существенно влияет на свойства ЛИМП и, следовательно, на конфигурацию микроструктур, получаемых на поверхности прозрачной среды.

Технология обработки поверхности стекла ЛИМП [24, 25] реализуется при плотном контакте обрабатываемого стекла с массивной мишенью из графита, коэффициент поглощения которого близок к 1,0 для широкого диапазона длин волн. Она была использована для изготовления массивов микрооптических элементов [24] и фазовых решеток [25] на плавленом кварце.

Изучению свойств ЛИМП, образующейся в условиях плотного контакта графитовой мишени и диэлектрической пластины, посвящена работа [17], в которой показано, что формирование микрорельефа на поверхности стекла вызвано „кластерной“ абляцией ионами углерода в условиях избыточного давления, превышающего 1 ГПа, — подобный механизм микроструктурирования обеспечивает значительно большую эффективность, по сравнению с эффективностью микроструктурирования испарением или термической абляцией [34].

Управление микрогеометрией поверхности ФОЭ из оптически прозрачного для лазерного излучения материала основано на локальном действии ЛИМП, образующейся на мишени с высоким поглощением падающего на него излучения и с размерами и свойствами, определяемыми параметрами лазерного излучения и условиями возникновения ЛИМП. Одним из значимых условий возникновения и существования ЛИМП в процессе формирования микрорельефа на поверхности пластины плавленного кварца является плотный контакт между мишенью и поверхность пластины, на тыльной стороне которой формируется микрорельеф.

Согласно технологии ЛИМП, процесс формирования микрорельефа на поверхности пластины плавленного кварца включает две стадии трансформации энергии: от энергии лазерного излучения к возникающей из-за сильного поглощения лазерного излучения на поверхности мишени плазмы и от плазмы — к энергии абляции плавленного кварца. Формирование микрорельефа на поверхности плавленного кварца является сложным многофакторным процессом, происходящим в условиях ограниченного объема ЛИМП. При формировании микрорельефа поверхности плавленного кварца уже после первого импульса лазерного излучения, приводящего к возникновению ЛИМП, частицы графита, испаряющиеся из зоны облучения при осаждении на поверхность формируемого рельефа и на поверхность разрушаемой мишени, будут поглощать часть энергии падающего на них излучения и тем самым вносить вклад в глубину формируемого рельефа.

Частицы графита, осажденные на поверхность плавленного кварца и на поверхность разрушаемой мишени в области действия ЛИМП, способны поглощать часть энергии лазерных импульсов (всех, начиная со второго) и тем самым снижать энергию разрушения графита мишени, поддерживающей ЛИМП. Сложность процесса преобразования энергии в технологии ЛИМП при формировании микрорельефа ФОЭ не позволяет установить прямых аналитических зависимостей между режимом лазерного облучения, условиями возникновения и существования ЛИМП и глубиной травления формируемого микрорельефа. Именно этим объясняется необходимость предварительной записи так называемой карты глубин, устанавливающей связь между параметрами лазерного облучения и условиями возникновения формируемого микрорельефа. Карта глубин представляет собой двумерный массив элементарных ячеек в форме квадрата с размером стороны 500 мкм, разделенных между собой расстоянием более 500 мкм (для уменьшения искажений записи, вызываемых тепловыми явлениями, сопровождающими запись).

При записи карты глубин варьировались следующие параметры: средняя мощность лазерного излучения  $P$ , скорость сканирования  $S$  и частота следования импульсов  $\nu$ . Длительность импульса составляла 50 нс. При записи карты глубин не учитывалось многократное прохождение сфокусированного лазерного пучка по поверхности плавленного кварца ( $N$  — число проходов), в ряде случаев являющееся обязательным для достижения требуемого микрорельефа ФОЭ.

Как показали измерения глубины травления в областях, подвергшихся многократным проходам, параметр  $N$  является не менее важным параметром, чем  $P$ ,  $S$  и  $\nu$ . Рельеф поверхности ФОЭ в технологии ЛИМП формировался в соответствии с выбранными параметрами из карты глубин, линия за линией с шагом сканирования не более 2—4 % от диаметра пучка, сфокусированного на границу контакта плавленного кварца и мишени.

Все технологии микроструктурирования поверхности стекла, базирующиеся на образовании ЛИМП на сильно поглощающей лазерное излучение мишени, могут приводить к загрязнению стекла частицами мишени, а в некоторых случаях — к переносу частиц на поверхность стекла в процессе кластерной абляции под действием ЛИМП и ее последующей рекомбинации. Под действием ЛИМП также возможно увеличение шероховатости поверхности формируемого микрорельефа, появление нано- и микродефектов и напряжений.

Загрязнение поверхности ФОЭ частицами графита после записи микрорельефа технологией ЛИМП устраняют методы постобработки: влажная лазерная очистка, отжиг в печи, обработка в водном растворе щелочи или кислоты с последующим промыванием в воде. Параметры влажной лазерной очистки, отжига и обработки в водном растворе щелочи или кислоты определяются экспериментально с учетом рекомендаций по каждому из процессов [35, 36]. При выборе способа очистки учитываются его длительность и сложность, возможность не только полного устранения частиц графита, нано- и микродефектов на поверхности микрорельефа ФОЭ и напряжений, а также уменьшение шероховатости микрорельефа, образующегося в ходе записи ФОЭ, по сравнению со исходными значениями шероховатости пластины плавленого кварца.

Исследования различных способов очистки, выполненные в работе [35] на основе сравнения спектральных характеристик плавленого кварца после обработки ЛИМП в диапазоне 400—900 нм, а также в спектре люминесценции в диапазоне 400—550 нм, позволили установить, что лучшие результаты по устранению частиц графита были достигнуты при использовании влажной лазерной очистки и очистки отжигом в печи. При этом отмечалось, что и влажная лазерная очистка, и очистка отжигом в печи обеспечивают полное удаление частиц графита. Однако несмотря на значительно меньшую длительность первого процесса (30—40 с) по сравнению с длительностью второго (~ 3 ч), отжиг в печи представляется более предпочтительным, поскольку при этом возможно устранение микро- и нанодфектов и возможных напряжений, возникающих при записи. Из-за существенного уменьшения пропускания в спектрах в диапазоне 400—900 нм — более чем в два раза, по сравнению со значениями пропускания пластины плавленого кварца, на которой записывались соответствующие ФОЭ, и более чем на треть в спектре люминесценции после проведения процесса очистки в водном растворе  $\text{HNO}_3$  — в дальнейшем было решено отказаться от нее.

В работе [26] в качестве постобработки использовались отжиг в печи при температуре 900 °С в течение 3 ч и обработка в водном растворе  $\text{NaOH}$  (концентрация раствора 38,5 %, температура 70 °С, длительность 90 мин), осуществляемые после влажной лазерной очистки. В результате обеспечено полное устранение частиц графита в обоих случаях и уменьшение шероховатости поверхности в вытравленных секторах СФП до значений  $(25\text{—}30) \pm 10$  нм, близких по значению к шероховатости поверхности пластины плавленого кварца, на которой проводилась запись СФП ( $30 \pm 10$  нм).

Несмотря на соизмеримое снижение шероховатости поверхности в вытравленных секторах СФП, от постобработки в водном растворе  $\text{NaOH}$  в дальнейшем решено было отказаться, так как эффективность конверсии энергии СФП, прошедшей после записи отжиг, оказалась почти на 10 % выше, чем у СФП, прошедшей после записи постобработку в водном растворе  $\text{NaOH}$ .

Поскольку фактически изготовление ФОЭ на базе технологии ЛИМП включает этап записи и постобработки (этап очистки), параметры каждого из которых в основном базируются на экспериментальных результатах, важно детально изучить и определить влияние каждого из этапов на конечный результат — параметры микрогеометрии формируемого рельефа ФОЭ, обеспечивающие особенности его функционирования. В качестве исследуемых ФОЭ будут использоваться МБФП, такой выбор обусловлен относительной простотой конструкции МБФП, по сравнению с другими ФОЭ аналогичного назначения.

Таким образом, целью настоящей работы является определение влияния этапа записи технологией ЛИМП и этапа очистки на параметры микрогеометрии формируемого рельефа ФОЭ, обеспечивающие его высокое качество. Дополнительно будут определены условия, позволяющие обеспечить повторяемость результатов по микрогеометрии формируемого рельефа ФОЭ.

Соответствие глубины травления в секторах МБФП расчетным значениям, их отклонение по глубине в различных секторах и шероховатость поверхности в этих секторах будут исследованы на профилометре Hommel Tester T8000 с разрешением по глубине  $\pm 10$  нм. Качество функционирования МБФП и эффективность конверсии энергии будут оценены в схеме тестирования с наносекундным лазером IRG YLPN-50 с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм.

Для оценки повторяемости результатов и параметров микрогеометрии формируемого рельефа с марта 2021 г. по март 2022 г. с интервалом 2—6 месяцев технологией ЛИМП были записаны пять МБФП с одинаковыми параметрами, выбранными из карты глубин, при применении одной и той же мишени, на пластинах плавленого кварца из одной партии. После записи всех МБФП выполнялась постобработка. Оценка повторяемости результатов изготовления МБФП производилась сравнением глубины травления и значений шероховатости в вытравленных секторах МБФП, эффективности конверсии, осуществляемой МБФП, и качеством их функционирования.

**Принцип работы многосекторных бинарных фазовых пластин.** Описание конструкции МБФП, состоящей из равного числа не вытравленных и вытравленных на определенную глубину секторов, обеспечивающих сдвиг фазы в  $\pi$  или в  $\pi/2$  проходящего через эти сектора излучения, и принцип их работы приведены в работах [14, 23, 37].

Известно, что МБФП может быть рассмотрена как СФП, упрощенная до двух уровней фазы 0 и  $\pi$ . Распределение интенсивности, генерируемое такой МБФП в дальнем поле в параксиальном приближении при  $\cos\varphi \rightarrow 1$ ,  $\sin\varphi \rightarrow 0$  (где  $\varphi$  — азимутальная координата) будет представлять суперпозицию скалярных вихревых пучков с противоположными топологическими зарядами  $\pm 1/2$  [38]. МБФП, выполненная для фаз 0 и  $\pi/2$ , может быть рассмотрена как СФП, упрощенная до двух уровней фазы 0 и  $\pi/2$ . В этом случае распределение интенсивности в дальнем поле, генерируемое такой МБФП, в параксиальном приближении будет представлять суперпозицию скалярных вихревых пучков одного знака [37].

МБФП, в отличие от остальных ФОЭ (таких как СФП [7—11],  $q$ -пластины [39, 40],  $s$ -пластины [41, 42] и вихревые полуволновые пластины [43], изготавливаемые на плавленом кварце и используемые в настоящее время для генерации из одиночного гауссова пучка), способна генерировать суперпозицию скалярных или векторных вихревых пучков [14, 23]. В публикациях последних лет сообщается о применении МБФП как для генерации суперпозиции скалярных вихревых пучков [23], так и о трансформации цилиндрических векторных пучков первого порядка в гибридные пучки более высоких порядков [14]. Применение МБФП, в первую очередь, обусловлено простотой их конструкции, изготовления и надежностью функционирования. Конструкция МБФП, состоящей из равного числа одинаковых по площади не вытравленных и вытравленных на одинаковую глубину секторов, является более простой по сравнению с конструкцией СФП, глубина травления в секторах которой пошагово возрастает с увеличением номера сектора. Этот факт делает МБФП менее сложным объектом для изучения особенностей изготовления ФОЭ технологией ЛИМП.

Глубина травления в половине секторов МБФП определяется исходя из представления о фазовом сдвиге в  $\pi$  или  $\pi/2$ , создаваемом в этих секторах по отношению к не вытравленным секторам. Сдвиг фазы  $\pi$  в вытравленных секторах МБФП по отношению к не вытравленным достигается при травлении этих секторов на глубину:

$$h_{\pi} = \frac{\lambda}{2(n_1 - n_2)}, \quad (1)$$

где  $n_1$  — показатель преломления плавленного кварца для длины волны излучения  $\lambda$ , падающего на МБФП;  $n_2$  — показатель преломления среды, в которой предполагается функционирование МБФП (воздух).

Сдвиг фазы  $\pi/2$  в вытравленных секторах МБФП по отношению к не вытравленным достигается при травлении этих секторов на глубину:

$$h_{\pi/2} = \frac{\lambda}{4(n_1 - n_2)}. \quad (2)$$

При показателе преломления плавленного кварца 1,4496 для длины волны  $\lambda = 1,06$  мкм, на которой будет тестироваться качество МБФП и эффективность конверсии энергии, глубина травления, найденная из уравнений (1) и (2), составляет соответственно 1,183 и 0,591 мкм.

Как было показано в работе [23], качество функционирования МБФП (под которым понимается соответствие генерируемого МБФП в дальнем поле распределения интенсивности теоретическим представлениям, согласно которым интенсивность в центральной области стремится к нулю, а интенсивность в окружающих ее по периметру пространственно-разделенных дифракционно-ограниченных пятнах одинакова, при этом ДОП имеют четкие очертания в форме круга) определяется:

- соответствием глубины травления в различных секторах МБФП расчетным значениям;
- отклонением глубины травления в различных секторах МБФП от расчетного значения;
- значением шероховатости поверхности в вытравленных секторах.

**Экспериментальная установка для изготовления многосекторных бинарных фазовых пластин.** Для изготовления МБФП использовалась технология ЛИМП [17, 24—26], которая была реализована на экспериментальной установке, представленной на рис. 1.

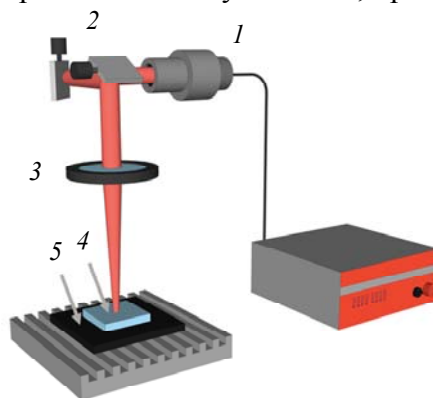


Рис. 1

Лазерные импульсы от Yb-волоконного лазера (длина волны 1,06 мкм) 1 длительностью 50 нс, средней мощностью до 20 Вт и частотой 1—100 кГц были направлены в зону обработки гальванометрическими сканерами (G325DT GSI Lumonics) 2. Объектив F-theta 3 с фокусным расстоянием 210 мм создавал диаметр перетяжки пучка  $d_0 = 50$  мкм. Излучение фокусировалось в области плотного контакта пластины из плавленного кварца 4 и графитовой мишени 5 с коэффициентом поглощения  $A \sim 1,0$  в диапазоне длин волн от 0,2 до 2,0 мкм. Тыльная поверхность пластины 4 была модифицирована в соответствии с требуемой геометрией под воздействием эрозионного плазменного факела (давление  $\sim 1$  ГПа, температура  $> 10^3$  °C), возникающего при сканировании лазерного пучка в плоскости контакта пластины из 4 и 5. Эрозионный плазменный факел в режиме удержания (ограничения расширения) нагревал противоположную сторону пластины из кварца 4 до температур  $> 10^3$  °C и создавал абляцию [17]. Применение ЛИМП для формирования требуемых структур, как указывалось ранее, сопровождается

осаждением частиц графита на сформированные структуры. Ранее нами была использована влажная лазерная очистка [35], продолжительность которой не превышает 30—40 с.

При выборе режимов записи МБФП с уровнями фаз 0 и  $\pi$  авторы руководствовались результатами предварительной записи карты глубин на плавленом кварце, варьируемыми параметрами в которой были мощность  $P$  (8—16 Вт), скорость сканирования  $S$  (50—150 мм/с), частота следования импульсов  $\nu$  (20—30 кГц) и число сканирований  $N$  сфокусированного лазерного пучка на границу соприкосновения плавленого кварца и мишени. Длительность импульса при записи массива элементарных ячеек карты глубин во всех случаях составляла 50 нс. Режимы записи МБФП с уровнями фаз 0 и  $\pi$  выбирались по результатам анализа экспериментальных данных массивов элементарных ячеек карты глубин, обеспечивающих формирование микрорельефа приемлемого качества без значительных трещин, глубоких сколов и напряжений с шероховатостью, не превышающей  $50 \pm 10$  нм, обеспечиваемой технологией ЛИМП.

Фрагмент карты глубин с глубинами элементарных ячеек, записанных при различных режимах лазерного облучения с варьируемым числом проходов для  $S = 100$  мм/с, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Фрагмент карты глубин					
$N$	$P$ , Вт				
	8	10	12	14	16
1	335	387	443	469	474
3	902	1099	1192	1229	1452
5	1493	1709	2165	2209	2292

Плотность мощности лазерного излучения в импульсе, приходящаяся на область лазерного воздействия на границе плавленого кварца и мишени из графита, обеспечивающая заданную глубину травления, определялась как:

$$q = \frac{1}{\nu\tau} \cdot \frac{4P}{\pi d_0^2}, \quad (3)$$

а плотность энергии в импульсе, приходящаяся на область лазерного воздействия:

$$\varepsilon = \frac{4P}{\pi d_0^2 \nu}. \quad (4)$$

Поскольку формирование микрорельефа осуществлялось с использованием сканирующей системы, важным параметром для оценки было число импульсов, попадающих в зону воздействия:

$$k = \frac{d_0 \nu}{S}, \quad (5)$$

где  $S$  — скорость сканирования по одной координате  $x$  или  $y$ .

Диапазон значений  $k$  для формирования микроструктур на плавленом кварце оценивался как 20—80. За одно сканирование глубина вытравленной области могла изменяться от 0,03 до 1,18 мкм. В случае необходимости достижения большей глубины следует последовательно выполнить  $N$  сканирований.

Типичная зависимость глубины формируемого микрорельефа на плавленом кварце от числа импульсов, приходящихся на область воздействия, представлена на рис. 2, а, а на рис. 2, б — зависимость глубины формируемого микрорельефа от плотности энергии при различном числе сканирований.



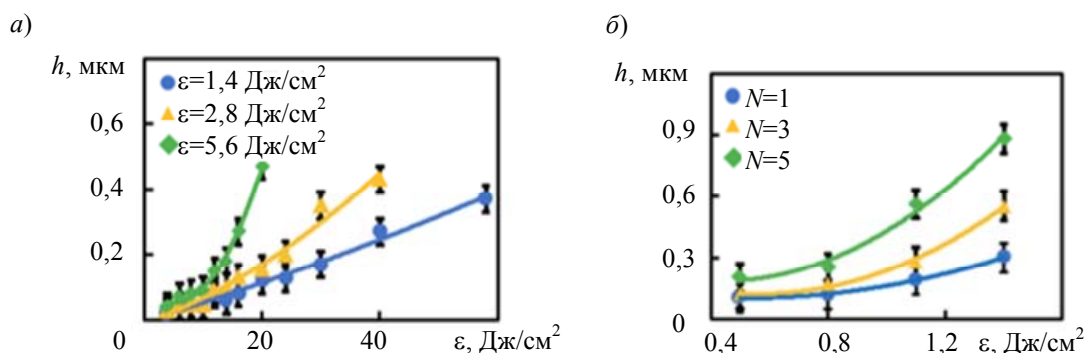


Рис. 2

**Исследование влияния постобработки на шероховатость поверхности многосекторных бинарных фазовых пластин.** Ориентируясь на результаты постобработки ФОЭ, записанных технологией ЛИМП [29, 40], для выявления наиболее эффективного способа, обеспечивающего полное устранение не только загрязнения поверхности ФОЭ частицами графита, но и микро- и нанодфектов, напряжений, возникающих в процессе записи ФОЭ, а также снижение возрастающих значений шероховатости поверхности, сопровождающих запись, по сравнению со значениями шероховатости поверхности исходной пластины, авторы выбрали: (1) влажную лазерную очистку, (2) влажную лазерную очистку, сопровождаемую отжигом, (3) отжиг в печи.

Исследование значений шероховатости поверхности после соответствующего варианта постобработки проводилось на элементарных ячейках карты глубин для  $P = 18$  Вт,  $\nu = 20$  кГц,  $S = 150$  мм/с. Значения шероховатости поверхности в элементарных ячейках, полностью покрытых частицами графита, а также значения шероховатости поверхности после соответствующего варианта постобработки представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Значение параметров шероховатости поверхности в исследуемых ячейках карты глубин по результатам постобработки**

$R_q$ , нм	Постобработка	$N$
52,0	Отсутствует	3
57,0	Влажная очистка	
32,0	Влажная очистка + отжиг	
50,0	Отсутствует	5
59,0	Влажная очистка	
33,0	Влажная очистка + отжиг	
52,0	Отсутствует	7
58,0	Влажная очистка	
30,0	Влажная очистка + отжиг	

Значения шероховатости поверхности, представленные в табл. 2 и 3, определялись по критерию  $R_q$  — среднеквадратичному значению отклонения профиля в пределах базовой длины:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx}, \tag{6}$$

где  $l$  — базовая длина,  $y$  — отклонение профиля от средней линии.

Таблица 3

**Значение параметров шероховатости поверхности после записи и отжига**

$R_q$ , нм	$R_q/R_{q,пл}$	Постобработка	$N$
48,0	1,60	Отсутствует	7
30,0	1,00	Отжиг	
50,0	1,67	Отсутствует	9
30,0	1,00	Отжиг	
51,0	1,70	Отсутствует	11
29,0	0,97	Отжиг	

Отношение значения шероховатости поверхности, достигаемого отжигом в печи, для двух элементарных ячеек к значению шероховатости поверхности исходной пластины плавленного кварца представлены в табл. 3 ( $P = 18$  Вт,  $\nu = 30$  кГц,  $S = 150$  мм/с,  $R_{q\text{пл}} = 30 \pm 10$  нм). Из результатов, представленных в табл. 2 и 3, видно, что постобработка отжигом в печи позволила достичь значений шероховатости МБФП, соизмеримых со значениями шероховатости исходной пластины плавленного кварца, составляющей в нашем случае  $30 \pm 10$  нм.

В ходе первых экспериментов по отжигу МБФП постобработка в печи составляла 3 ч. Однако поиск дополнительных материалов по отжигу сложных микрорезонаторов, выполненных на плавленном кварце (таких как гироскопы [44], полусферические резонаторы [45], микрорезонаторные устройства MEMS [46]), позволил выявить рекомендации по длительности и температуре отжига.

В частности, исследования [46], направленные на снижение шероховатости с сохранением низких структурных деформаций микрорезонаторных устройств MEMS, в которых температура отжига варьировалась в диапазоне 300—900 °С, а длительность от 2 до 240 мин, показали, что уже при температуре выше 700 °С шероховатость поверхности стала уменьшаться из-за снижения вязкости плавленного кварца. Были определены режимы, обеспечивающие наибольшее улучшение шероховатости при низких структурных деформациях. Один из них занимал 30 мин, а второй, обеспечивающий большее улучшение шероховатости поверхности при средних структурных деформациях, выполнялся при той же температуре 900 °С, но в течение 240 мин.

Обеспечить низкие значения шероховатости поверхности в микрогеометрии ФОЭ гораздо важнее, чем избегать незначительных структурных деформаций массивных пластин плавленного кварца, на которых записывается ФОЭ. Это и явилось одной из основных причин, по которой авторы сохранили температуру, используемую ранее при отжиге СФП [27], но сократили длительность отжига до 1 ч.

Все значения шероховатости поверхности (см. табл. 2 и 3) были измерены после отжига при температуре 900 °С, выполненного в течение 1 ч. Скорость нагрева пластин с МБФП, как и в более ранних экспериментах по отжигу СФП, варьировалась в диапазоне 5—7 °С/мин, охлаждение осуществлялось в условиях отключения печи. Сокращение времени отжига не повлияло на значения шероховатости поверхности, которые были получены нами ранее в экспериментах по определению температуры и длительности отжига СФП [26].

**Экспериментальная установка для тестирования многосекторных бинарных фазовых пластин.** Схема экспериментальной установки для определения эффективности конверсии энергии, осуществляемой МБФП, и оценки качества ее функционирования показана на рис. 3. Данная экспериментальная установка позволяла осуществить микрообработку образцов из полированной стали.

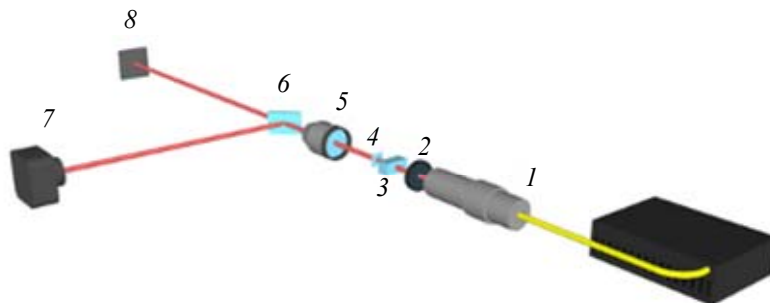


Рис. 3

Лазерный пучок (диаметр 7 мм, длина волны 1,06 мкм, длительность импульса 120 нс, максимальная частота 100 кГц, качество пучка  $M^2 < 2$ , энергия импульса до 1 мДж и средняя мощность до 50 Вт) от лазерного источника (IPG YLPN 1-50) 1 проходил через нейтральный фильтр 2, линейный поляризатор (призма Глана) 3, МБФП 4, фокусирующий объектив 5

с фокусным расстоянием 170 мм и светоделительное зеркало 6. Менее 1 % падающего на зеркало 6 и сфокусированного лазерного излучения отражалось на ПЗС-камеру 7, расположенную в фокальной плоскости линзы 5. ПЗС-камера была размещена на трехкоординатном столике. Другая часть сфокусированного лазерного пучка проходила через зеркало 6 и попадала на образцы полированной стали 8. Эти образцы были размещены на трехкоординатном столике, расположенном в фокальной плоскости объектива 5.

Влияние постобработки на эффективность конверсии энергии, осуществляемой каждой из трех МБФП, и ее функционирование, последовательно исследовалось на экспериментальной установке.

Для определения эффективности конверсии энергии измерялись мощность  $P_{\text{вх}}$  падающего на МБФП пучка лазерного излучения и мощность  $P_{\text{вых}}$  пучка лазерного излучения, прошедшего через МБФП:

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} . \quad (7)$$

Для МБФП, прошедшей постобработку влажной лазерной очисткой,  $\eta \sim 84$  %; для МБФП, прошедшей постобработку влажной лазерной очисткой, сопровождаемой отжигом,  $\eta \sim 89$  %; для МБФП, прошедшей постобработку отжигом в печи,  $\eta \sim 92$  % — этот уровень близок к теоретически возможному, обусловленному потерями на отражении на поверхностях МБФП.

Полученные значения эффективности конверсии энергии МБФП, как и значения шероховатости, показывают явное преимущество применения постобработки отжигом в печи.

Качество функционирования МБФП определяли последовательной регистрацией картин распределения интенсивности каждой из трех тестируемых МБФП в окрестностях дальнего поля, а также в одной из плоскостей, смещенной относительно фокальной плоскости фокусирующего объектива вдоль направления оптической оси (удаленного от фокусирующего объектива либо приближенного к нему). Смещение плоскости регистрации распределений интенсивности, создаваемых МБФП, относительно фокальной плоскости фокусирующего объектива предпринималось для выявления областей, где возможно повышение контраста между центральной темной областью и формируемым массивом дифракционно-ограниченных пятен, окружающим центральную область с нулевой интенсивностью.

На рис. 4 представлены распределения интенсивности, создаваемые каждой из трех тестируемых МБФП с уровнями фазы 0 и  $\pi$  в окрестностях дальнего поля в фокальной плоскости объектива и в плоскости повышенного контраста. Видно, что лучшие результаты по качеству функционирования показали МБФП, прошедшие постобработку отжигом в печи, на что указывает одинаковый диаметр дифракционно-ограниченных пятен и их четкие очертания.

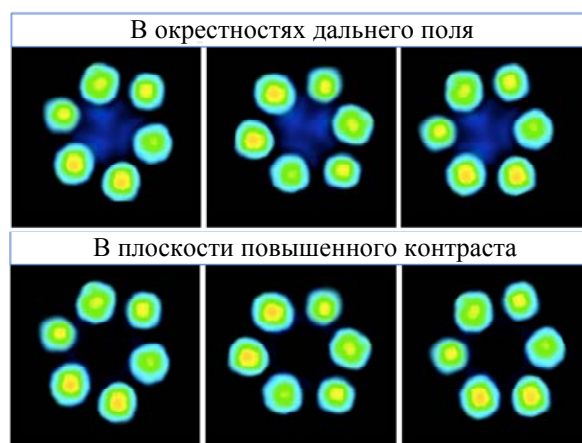


Рис. 4

**Заключение.** Так как фактически изготовление ФОЭ включает этап записи ФОЭ технологией ЛИМП и этап постобработки, предназначенный для устранения частиц графита с поверхности ФОЭ, возможных микро-, нанодфектов и напряжений, появление которых нельзя полностью исключить даже при самых щадящих режимах записи, а также для уменьшения шероховатости микрорельефа ФОЭ, возрастающего при любых режимах записи, а оба этапа изготовления базируются в основном на экспериментальных данных, то детальное определение влияния каждого из этапов на конечный результат исключительно важно. Только соответствие рассчитанной глубины травления и минимально возможная шероховатость поверхности микрогеометрии формируемого рельефа ФОЭ способны обеспечить высокое качество функционирования ФОЭ и высокую эффективность конверсии энергии, осуществляемой им. В качестве ФОЭ, процесс изготовления которого детально исследован, использованы МБФП, выбор которых обусловлен относительной простотой конструкции, по сравнению с другими ФОЭ аналогичного назначения.

Исследование позволило установить, что выбор режимов записи МБФП из предварительно записанной карты глубин, варьируемыми параметрами в которой являлись мощность излучения  $P$ , скорость сканирования  $S$ , частота следования импульсов  $\nu$  и число сканирований  $N$ , позволяет обеспечить требуемую для функционирования глубину травления в половине секторов МБФП, измеренное значение которой составило  $1180 \pm 10$  нм при рассчитанной глубине 1183 нм. Исследование было выполнено на трех шестисекторных МБФП с уровнями фазы 0 и  $\pi$ , рассчитанными для применения на  $\lambda = 1,06$  мкм.

Исследования также позволили установить, что лучшие результаты по снижению шероховатости поверхности МБФП от  $50 \pm 10$  нм, обеспечиваемому технологией ЛИМП, до  $30 \pm 10$  нм при полном устранении частиц графита, загрязняющих поверхность МБФП, микро-, нанодфектов и напряжений, изредка сопровождающих запись, достигаются после постобработки отжигом в печи при температуре  $900^\circ\text{C}$  в течение 1 ч.

Были определены условия реализации каждого из этапов изготовления МБФП, позволяющие обеспечить повторяемость результатов по глубине травления формируемого рельефа МБФП и значениям его шероховатости, которые, в свою очередь, позволяли обеспечить высокую эффективность конверсии энергии ( $\sim 92\%$ ) МБФП, что было подтверждено измерением распределения интенсивности, создаваемого МБФП и в окрестностях дальнего поля, и в плоскости повышенного контраста, ПЗС-камерой. К этим условиям на этапе записи относятся использование:

- для записи МБФП одной и той же экспериментальной установки;
- одной и той же пластины графита с шероховатостью поверхности, не превышающей 1 мкм;
- пластин плавленного кварца, на которых производится запись, из одной и той же партии изготовления.

На этапе отжига требуется соблюдение параметров отжига по температуре и длительности, определенных экспериментально.

Все пять шестисекторных МБФП с уровнями фазы 0 и  $\pi$ , рассчитанные для применения с  $\lambda = 1,06$  мкм, записанные технологией ЛИМП в течение года на одной и той же экспериментальной установке с одними и теми же параметрами записи, выбранными из карты глубин, на пластинах плавленного кварца из одной партии изготовления, при использовании одной и той же пластины графита с шероховатостью поверхности менее 1 мкм, и прошедшие постобработку отжигом в печи при  $900^\circ\text{C}$  в течение 1 ч, показали одинаковые значения глубины формируемого рельефа в вытравленных секторах ( $1180 \pm 10$  нм) при шероховатости его поверхности  $30 \pm 10$  нм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hnatovsky C.* et al. Polarization-dependent ablation of silicon using tightly focused femtosecond laser vortex pulses // *Opt. Lett.* 2012. Vol. 37, N 2. P. 226—228.
2. *Syubaev S.* et al. Direct laser printing of chiral plasmonic nanojets by vortex beams // *Opt. Express.* 2017. Vol. 25, N 9. P. 10214—10223.
3. *Chen M.* et al. Dynamics of microparticles trapped in a perfect vortex beam // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38, N 22. P. 4919—4922.
4. *Ng J., Lin Z., Chan C. T.* Theory of optical trapping by an optical vortex beam // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104, N 10. P. 103601.
5. *Wang J.* et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing // *Nat. Photonics.* 2012. Vol. 6, N 7. P. 488—496.
6. *Nagali E.* et al. Quantum information transfer from spin to orbital angular momentum of photons // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 103, N 1. P. 013601.
7. *Massari M.* et al. Fabrication and characterization of high-quality spiral phase plates for optical applications // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, N 13. P. 4077—4083.
8. *Cheong W. C.* et al. Direct electron-beam writing of continuous spiral phase plates in negative resist with high power efficiency for optical manipulation // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85, N 23. P. 5784—5786.
9. *Ruffato G.* et al. Spiral phase plates with radial discontinuities for the generation of multiring orbital angular momentum beams: fabrication, characterization, and application // *Opt. Eng.* 2015. Vol. 54, N 11. P. 111307.
10. *Ruffato G.* et al. Generation of high-order Laguerre–Gaussian modes by means of spiral phase plates // *Opt. Lett.* 2014. Vol. 39, N 17. P. 5094—5097.
11. *Shi L.* et al. One exposure processing to fabricate spiral phase plate with continuous surface // *Opt. Express.* 2015. Vol. 23, N 7. P. 8620—8629.
12. *Sueda K.* et al. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses // *Opt. Express.* 2004. Vol. 12, N 15. P. 3548—3553.
13. *Jun C.* et al. Generation of optical vortex using a spiral phase plate fabricated in quartz by direct laser writing and inductively coupled plasma etching // *Chin. Phys. Lett.* 2009. Vol. 26, N 1. P. 014202.
14. *Khonina S. N.* et al. Formation of hybrid higher-order cylindrical vector beams using binary multi-sector phase plates // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8, N 1. P. 1—11.
15. *Brasselet E.* et al. Photopolymerized microscopic vortex beam generators: Precise delivery of optical orbital angular momentum // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97, N 21. P. 211108.
16. *Zukauskas A.* et al. Monolithic generators of pseudo-nondiffracting optical vortex beams at the microscale // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103, N 18. P. 181122.
17. *Veiko V. P.* et al. Laser-induced microplasma as a tool for microstructuring transparent media // *Quantum Electron.* 2017. Vol. 47, N 9. P. 842—848.
18. *Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K.* High-speed machining of glass materials by laser-induced plasma-assisted ablation using a 532-nm laser // *Appl. Phys. A.* 1998. Vol. 67, N 4. P. 499—501.
19. *Cheng J.-Y.* et al. Crack-free direct-writing on glass using a low-power UV laser in the manufacture of a microfluidic chip // *J. Micromech. Microeng.* 2005. Vol. 15, N 6. P. 1147—1156.
20. *Harm W.* et al. Adjustable diffractive spiral phase plates // *Opt. Express.* 2015. Vol. 23, N 1. P. 413—421.
21. *Ovsianikov A.* et al. Ultra-low shrinkage hybrid photosensitive material for two-photon polymerization microfabrication // *ACS Nano.* 2008. Vol. 2, N 11. P. 2257—2262.
22. *Malinauskas M.* et al. Mechanisms of three-dimensional structuring of photo-polymers by tightly focussed femtosecond laser pulses // *Opt. Express.* 2010. Vol. 18, N 10. P. 10209—10221.
23. *Zhou L.* et al. Directly writing binary multi-sector phase plates on fused silica using femtosecond laser // *High Power Laser Sci.* 2018. Vol. 6, N e6. DOI:10.1017/hpl.2018.1.

24. *Kostyuk G. K.* et al. Fast microstructuring of silica glasses surface by NIR laser radiation // *Opt. Lasers Eng.* 2015. Vol. 68. P. 16—24.
25. *Kostyuk G.K.* et al. Laser microplasma as a tool to fabricate phase grating applied for laser beam splitting // *Opt. Lasers Eng.* 2017. Vol. 92. P. 63—69.
26. *Shkuratova V.* et al. Rapid fabrication of spiral phase plate on fused silica by laser-induced microplasma // *Appl. Phys. B.* 2020. Vol. 126, N 4. P. 1—6.
27. *Hopp B.* et al. Comparative study of different indirect laser-based methods developed for microprocessing of transparent materials // *J. Laser Micro Nanoeng.* 2010. Vol. 5, N 1. P. 80—85.
28. *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. Surf. Sci.* 2012. Vol. 258, N 24. P. 9742—9746.
29. *Hanada Y.* et al. Development of practical system for laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) for micromachining of glass materials // *Appl. Phys. A.* 2004. Vol. 79, N 4. P. 1001—1003.
30. *Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K.* Laser-induced front side etching: an easy and fast method for sub- $\mu\text{m}$  structuring of dielectrics // *Phys. Procedia.* 2012. Vol. 39. P. 542—547.
31. *Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K.* Laser-induced plasma-assisted ablation of fused quartz using the fourth harmonic of a Nd<sup>+</sup>: YAG laser // *Appl. Phys. A.* 1998. Vol. 67, N 5. P. 545—549.
32. *Hopp B.* et al. Laser-induced backside dry and wet etching of transparent materials using solid and molten tin as absorbers // *Appl. Phys. A.* 2009. Vol. 94, N 4. P. 899—904.
33. *Блонский И. В.* и др. Влияние поперечного размера факела лазерно-индуцированной плазмы на процессы обработки материалов // *Журнал технической физики.* 2005. Т. 75, № 3. С. 74—80.
34. *Veiko V. P.* et al. Two-phase mechanism of laser-induced removal of thin absorbing films. I. Theory // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1980. Vol. 13 (8). N 1565.
35. *Koval V. V.* et al. Changes in the spectral characteristics of quartz-glass plates when they are processed with laser-induced plasma // *J. Opt. Technol.* 2017. Vol. 84, N 7. P. 447—452.
36. *Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K.* Integration of 3D micro-optics and microfluidics in a glass chip using a femtosecond laser for photonic applications // *Proc. SPIE.* 2005. Vol. 5627. P. 247—257.
37. *Kostyuk G. K.* et al. Multisector binary phase plates on fused silica for generation of optical vortex beams superposition: Fabrication, characterization, and applications // *Opt. Laser. Technol.* 2022. Vol. 152. P. 108161.
38. *Khonina S. N.* Simple phase optical elements for narrowing of a focal spot in high-numerical-aperture conditions // *Opt. Eng.* 2013. Vol. 52, N 9. P. 091711.
39. *Rubano A.* et al. Q-plate technology: a progress review // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2019. Vol. 36, N 5. P. D70—D87.
40. *Cardano F.* et al. Polarization pattern of vector vortex beams generated by q-plates with different topological charges // *Appl. Opt.* 2012. Vol. 51. P. C1—C6.
41. *Beresna M.* et al. Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 98, N 20. P. 201101.
42. *Zhou J.* et al. Spin-dependent manipulating of vector beams by tailoring polarization // *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6, N 1. P. 1—9.
43. *Qi J.* et al. Concise and efficient direct-view generation of arbitrary cylindrical vector beams by a vortex half-wave plate // *Photonics Res.* 2021. Vol. 9, N 5. P. 803—813.
44. *Ahamed M. J., Senkal D., Shkel A. M.* Effect of annealing on mechanical quality factor of fused quartz hemispherical resonator // *Proc. IEEE ISISS.* 2014. P. 1—4.
45. *Wang Y., Shkel A. M.* Study on surface roughness improvement of Fused Quartz after thermal and chemical post-processing // *Proc. IEEE ISISS.* 2016. P. 101—104.
46. *Ahamed M. J., Senkal D., Shkel A. M.* Improvement of side-wall roughness in deep glass etched MEMS vibratory sensors // *Proc. IEEE ISISS.* 2014. P. 1—2.

	<i>Сведения об авторах</i>
<b>Галина Кирилловна Костюк</b>	— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; научный сотрудник; E-mail: gkkostiuk@itmo.ru
<b>Дмитрий Сергеевич Степанюк</b>	— Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; лаборант; E-mail: dmitriy.stepanyuk.234@mail.ru
<b>Виктория Александровна Шкуратова</b>	— магистр; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; E-mail: shkuratova_va@mail.ru
<b>Андрей Анатольевич Петров</b>	— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; старший преподаватель; E-mail: aapetrov@itmo.ru
<b>Никита Алексеевич Нестеров</b>	— Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; E-mail: nkt.nesterov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2022; одобрена после рецензирования 11.07.2022; принята к публикации 31.08.2022.

## REFERENCES

1. Hnatovsky C. et al. *Opt. Lett.*, 2012, no. 2(37), pp. 226–228.
2. Syubaev S. et al. *Opt. Express.*, 2017, no. 9(25), pp. 10214–10223.
3. Chen M. et al. *Opt. Lett.*, 2013, no. 22(38), pp. 4919–4922.
4. Ng J., Lin Z., Chan C.T. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, no. 10(104), pp. 103601.
5. Wang J. et al. *Nat. Photonics.*, 2012, no. 7(6), pp. 488–496.
6. Nagali E. et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, no. 1(103), pp. 013601.
7. Massari M. et al. *Appl. Opt.*, 2015, no. 13(54), pp. 4077–4083.
8. Cheong W. C. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, no. 23(85), pp. 5784–5786.
9. Ruffato G. et al. *Opt. Eng.*, 2015, no. 11(54), pp. 111307.
10. Ruffato G. et al. *Opt. Lett.*, 2014, no. 17(39), pp. 5094–5097.
11. Shi L. et al. *Opt. Express.*, 2015, no. 7(23), pp. 8620–8629.
12. Sueda K. et al. *Opt. Express.*, 2004, no. 15(12), pp. 3548–3553.
13. Jun C. et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, no. 1(26), pp. 014202.
14. Khonina S. N. et al. *Sci. Rep.*, 2018, no. 1(8), pp. 1–11.
15. Brasselet E. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, no. 21(97), pp. 211108.
16. Zukauskas A. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, no. 18(103), pp. 181122.
17. Veiko V.P. et al. *Quantum Electron.*, 2017, no. 9(47), pp. 842–848.
18. Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K. *Appl. Phys. A*, 1998, no. 4(67), pp. 499–501.
19. Cheng J.-Y. et al. *J. Micromech. Microeng.*, 2005, no. 6(15), pp. 1147–1156.
20. Harm W. et al. *Opt. Express.*, 2015, no. 1(23), pp. 413–421.
21. Ovsianikov A. et al. *ACS Nano*, 2008, no. 11(2), pp. 2257–2262.
22. Malinauskas M. et al. *Opt. Express.*, 2010, no. 10(18), pp. 10209–10221.
23. Zhou L. et al. *High Power Laser Sci.*, 2018, no. e6(6), DOI:10.1017/hpl.2018.1
24. Kostyuk G. K. et al. *Opt. Lasers Eng.*, 2015, vol. 68, pp. 16–24.
25. Kostyuk G.K. et al. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 92, pp. 63–69.
26. Shkuratova V. et al. *Appl. Phys. B*, 2020, no. 4(126), pp. 1–6.
27. Hopp B. et al. *J. Laser Micro Nanoeng.*, 2010, no. 1(5), pp. 80–85.
28. Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K. *Appl. Surf. Sci.*, 2012, no. 24(258), pp. 9742–9746.
29. Hanada Y. et al. *Appl. Phys. A*, 2004, no. 4(79), pp. 1001–1003.
30. Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K. *Phys. Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 542–547.
31. Zhang J., Sugioka K., Midorikawa K. *Appl. Phys. A*, 1998, no. 5(67), pp. 545–549.
32. Hopp B. et al. *Appl. Phys. A*, 2009, no. 4(94), pp. 899–904.
33. Blonsky I.V., Danko A.Y., Kadan V.N., Orieshko E.V., Puzikov V.M. *Technical Physics*, 2005, no. 3(75), pp. 358–363.
34. Veiko V. P. et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1980, no. 8(13), pp. 1565.
35. Koval V. V. et al. *J. Opt. Technol.*, 2017, no. 7(84), pp. 447–452.
36. Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5627, pp. 247–257.
37. Kostyuk G. K. et al. *Opt. Laser Technol.*, 2022, vol. 152, pp. 108161.
38. Khonina S.N. *Opt. Eng.*, 2013, no. 9 (52), pp. 091711.
39. Rubano A. et al. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2019, no. 5(36), pp. D70–D87.
40. Cardano F. et al. *Appl. Opt.*, 2012, vol. 51, pp. C1–C6.
41. Beresna M. et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, no. 20(98), pp. 201101.
42. Zhou J. et al. *Sci. Rep.*, 2016, no. 1(6), pp. 1–9.
43. Qi J. et al. *Photonics Res.*, 2021, no. 5(9), pp. 803–813.
44. Ahamed M.J., Senkal D., Shkel A.M. *Proc. IEEE ISISS*, 2014, pp. 1–4.
45. Wang Y., Shkel A.M. *Proc. IEEE ISISS*, 2016, pp. 101–104.
46. Ahamed M.J., Senkal D., Shkel A.M. *Proc. IEEE ISISS*, 2014, pp. 1–2.



**Data on authors**

- Galina K. Kostyuk** — PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Research Fellow;  
E-mail: gkkostiuk@itmo.ru
- Dmitriy S. Stepanyuk** — ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Laboratory Assistant;  
E-mail: dmitriy.stepanyuk.234@mail.ru
- Victoria A. Shkuratova** — MSc; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics;  
E-mail: shkuratova\_va@mail.ru
- Andrey A. Petrov** — PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Senior Lecturer;  
E-mail: aapetrov@itmo.ru
- Nikita A. Nesterov** — ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; E-mail: nkt.nesterov@mail.ru

Received 15.06.2022; approved after reviewing 11.07.2022; accepted for publication 31.08.2022.