

**ФАЗОВЫЕ МАСКИ ИЗ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ПЛАСТИН
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ОЧЕРТАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ
С УЛЬТРАКОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ
ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ В ПЛОСКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Г. К. КОСТЮК, В. А. ШКУРАТОВА*, А. А. ПЕТРОВ, М. М. СЕРГЕЕВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

**shkuratova_va@mail.ru*

Аннотация. Представлены фазовые маски, выполненные из двулучепреломляющих кристаллических пластин CaCO_3 , для получения заданного очертания лазерных пучков в схеме построения изображения с распределением интенсивности по сечению пучка, близким к распределению с плоской вершиной. Принцип работы фазовых масок основан на создании фазового сдвига π или 2π (в зависимости от исходной толщины пластины) в линейно поляризованном излучении, проходящем через вытравленные области заданной формы. Фазовый сдвиг в областях заданной формы преобразуется в распределение интенсивности на выходе анализатора, которое с уменьшением проецируется объективом в плоскость изображения, совмещенную с плоскостью микрообработки или мишенью. Фазовые маски в форме квадрата и квадрата в квадрате изготовлены путем обработки оптически прозрачных материалов лазерно-индуцированной микроплазмой и успешно протестированы в экспериментальной установке в схеме построения изображения с лазером, излучающим на длине волны 1,06 мкм импульсы длительностью 120 нс. Также фазовые маски использованы в этой экспериментальной установке для лазерной абляции образцов полированной стали. Формы отпечатков на образцах хорошо соответствовали очертаниям формируемых пучков.

Ключевые слова: фазовая маска, геометрический фазовый элемент, лазерный пучок, поляризация, двулучепреломляющий кристалл

Благодарности: работа поддержана Российским научным фондом [проект № 20-71-10103].

Ссылка для цитирования: Костюк Г. К., Шкуратова В. А., Петров А. А., Сергеев М. М. Фазовые маски из двулучепреломляющих пластин для получения заданного очертания лазерных пучков с ультракороткими импульсами при обработке материалов в плоскости изображения // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 101—111. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-101-111.

**PHASE MASKS MADE OF BIREFRINGENT PLATES
FOR SHAPING LASER BEAMS WITH ULTRASHORT PULSES
FOR LASER MATERIAL PROCESSING IN THE IMAGE PLANE**

G. K. Kostyuk, V. A. Shkuratova*, A. A. Petrov, M. M. Sergeev

ITMO University, St. Petersburg, Russia

**shkuratova_va@mail.ru*

Abstract. Phase masks made of birefringent CaCO_3 crystal plates are developed to create laser beam with a given shape and intensity distribution close to flat-top in image construction scheme. The principle of phase masks operation is based on creating the phase shift of π or 2π (depending on the initial plate thickness) in linearly polarized radiation passing through etched areas with given shapes. The phase shift in these areas transforms into the intensity distribution at an analyzer output, which can be projected with a demagnification by a high-quality lens into its image plane aligned with the micro-processing plane (target). Phase masks in the form of a square and a square in a square are made by processing optically transparent materials with laser-induced microplasma and successfully tested in an experimental setup in an imaging scheme with a laser emitting pulses of 120 ns duration at the wavelength of 1.06 μm . Phase masks are also used in this experimental setup for laser ablation of polished steel samples. The shapes of footprints on samples well match the formed beams shapes.

Keywords: phase masks, geometric phase elements, laser beams, polarization, birefringent crystals

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation [project no. 20-71-10103].

For citation: Kostyuk G. K., Shkuratova V. A., Petrov A. A., Sergeev M. M. Phase masks made of birefringent plates for shaping laser beams with ultrashort pulses for laser material processing in the image plane. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 101—111 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-101-111.

Введение. В последние годы созданию точного и четкого очертания лазерных пучков с ультракороткими импульсами требуемой формы и преимущественно плоской вершиной распределения интенсивности в заданных пределах уделяется значительное внимание. Подобные лазерные пучки широко применяются не только при микрообработке различных материалов, таких как металлы [1, 2], полупроводники [3, 4], диэлектрики [5, 6] и полимеры [7, 8], но также в оптическом манипулировании [9, 10] и траппировании охлажденных атомов [11, 12].

На сегодняшний день получение заданного очертания лазерных пучков в большинстве случаев основано на использовании пространственных световых модуляторов (ПСМ), сведения о применении которых впервые появились в 1989 г. [13]. Значительное усложнение и усовершенствование конструкции ПСМ за последние годы сделало их одним из самых востребованных (как в научном, так и в промышленном применении) оптических приборов. Например, ПСМ используются для создания спиральных лазерных пучков, несущих орбитальный угловой момент [14, 15], и для микрообработки материалов ультракороткими лазерными импульсами [1—8].

Методы получения заданного очертания лазерного пучка принято разделять на две основные группы. В первой очертание лазерного пучка создается с применением дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [16, 17], амплитудных [18, 19], бинарных [20] и градиентных [21] масок и в дальнейшем проецируется в плоскость изображения, совмещенную с плоскостью микрообработки или мишенью. За этой группой закрепилось название „методы реального пространственного очертания“. Во второй группе пространственно варьруемая фаза на маске или на ПСМ отображается в желаемое распределение интенсивности соответствующего очертания в фокальной плоскости объектива (в дальнем поле), совмещенной с плоскостью микрообработки или мишенью. Методы этой группы принято называть пространственными фурье-методами. В наиболее значимых работах, посвященных методам второй группы [22, 23], достигнуты распределения интенсивности с плоской вершиной, а также кольцевые, квадратные и треугольные очертания пучков в фокальной плоскости, программируемой модуляцией волнового фронта. Тем не менее, из этих и из других работ (например, [24, 25]) видно, что фазовая модуляция падающего пучка может быть усложнена при получении желаемой формы пучка в фокальной плоскости. Таким образом, точность очертания пучка методами этой группы в фокальной плоскости, обеспечиваемая алгоритмами трудоемкого итеративного расчета (например, Gerchberg и Saxton [26]), все еще не идеальна из-за сложной природы дифракции света. В частности, по этой причине в последние годы количество исследований по очертанию лазерных пучков заданной формы методами первой группы значительно возросло [20, 21]. Важно отметить, что все эти исследования выполнены с применением ПСМ.

В настоящей работе для преобразования распределения интенсивности по сечению лазерных пучков предлагается использовать фазовые маски (ФМ), выполненные на пластинах из двулучепреломляющего кристалла, кристаллическая ось которого ориентирована параллельно поверхности пластины (так называемый Y-срез), в схеме построения изображения. Такие ФМ применяются в методах первой группы. Предполагается, что двулучепреломляющие ФМ значительно более просты в реализации и в использовании, по сравнению с ПСМ, которые на сегодняшний день в основном применяются для методов этой группы.

Прежде чем перейти к изложению сути принципа работы ФМ, хотелось бы отметить, что настоящая работа является продолжением наших исследований по применению случайной фазовой пластины, выполненной из двулучепреломляющего кристалла CaCO_3 , для создания распределения интенсивности с плоской вершиной в дальнем поле [27] и спирального

фазового задерживающего элемента, выполненного из двулучепреломляющего кристалла CaCO_3 , для создания радиально и азимутально поляризованных пучков из линейно поляризованного гауссова пучка [28]. Упомянутые элементы были изготовлены с использованием технологии структурирования оптически прозрачных материалов лазерно-индуцированной микроплазмой (ЛИМП). Суть технологии ЛИМП подробно изложена в работах [29—31]. Было показано, что глубина травления двулучепреломляющей кристаллической пластины CaCO_3 технологией ЛИМП достигает 14 мкм за десять последовательных сканирований при шероховатости поверхности 50 ± 10 нм [29].

В рамках настоящего исследования на двулучепреломляющих кристаллических пластинах CaCO_3 технологией ЛИМП изготовлены ФМ в форме квадрата и квадрата в квадрате, обеспечивающие формирование распределения интенсивности, близкого к распределению с плоской вершиной, в схеме построения изображения. Для подтверждения работоспособности изготовленные ФМ были протестированы в лазерной установке с наносекундным Nd:YAG-лазером (длина волны 1,06 мкм). Формируемые с их применением распределения интенсивности были зарегистрированы с использованием ПЗС-камеры. Также методом лазерной абляции на листах полированной стали были получены отпечатки, соответствующие по форме распределениям интенсивности, реализуемым с применением изготовленных ФМ.

Теоретические основы и выбор оптических конфигураций ФМ. ФМ, предлагаемые в настоящей работе для получения требуемого очертания пучка с распределением интенсивности, близким к распределению с плоской вершиной в пределах очертания, могут быть выполнены травлением на заданную глубину, обеспечивающую фазовый сдвиг π или 2π — в зависимости от толщины исходной пластины. Травлению на заданную глубину может быть подвергнута область любой формы на исходной пластине, в дальнейшем задающая форму очертания пучка. При этом ФМ должны быть изготовлены на пластине из двулучепреломляющего кристалла, кристаллическая ось которого ориентирована параллельно поверхности пластины.

При установке ФМ с вытравленными областями между линейным поляризатором (П) с азимутом пропускания, направленным под углом 45° к главным осям кристаллической пластины, и анализатором (А), азимут пропускания которого может быть ориентирован как перпендикулярно, так и параллельно азимуту пропускания П, в зависимости от толщины исходной пластины, очертание вытравленной области преобразуется в распределение интенсивности на выходе А. Полученное подобным образом распределение интенсивности с четко очерченными краями в дальнейшем проецируется с уменьшением объективом в плоскость изображения, совмещенную с плоскостью микрообработки или мишенью.

При изготовлении ФМ на исходной пластине толщиной $h_0 \sim \lambda/2$, обеспечивающей поворот вектора линейной поляризации в падающем пучке на 90° на выходе из нее, глубина травления областей определяется из условия сохранения направления этого вектора на выходе из вытравленных областей по отношению к его направлению в падающем пучке, т.е. в соответствии с выражением [32]:

$$h_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_o - n_e}, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, n_o и n_e — показатель преломления обыкновенной и необыкновенной волны.

При изготовлении ФМ на исходной пластине толщиной $h_0 \sim \lambda$, обеспечивающей сохранение направления вектора линейной поляризации в падающем пучке на выходе из нее, глубина травления областей определяется из условия поворота вектора на 90° на выходе из вытравленных областей по отношению к его направлению в падающем пучке [32]:

$$h_\lambda = \frac{\lambda}{2(n_o - n_e)}. \quad (2)$$

Для исследования были изготовлены две ФМ, рассчитанные на применение на длине волны 1,06 мкм. Первая ФМ с центральной областью в форме квадрата была изготовлена на исходной пластине толщиной $1,017 \pm 0,006$ мкм ($h_0 \sim \lambda$), обеспечивающей сохранение направления вектора линейной поляризации в падающем пучке. Вторая ФМ с центральной областью в форме квадрата в квадрате была изготовлена на исходной пластине толщиной $1,020 \pm 0,006$ мкм ($h_0 \sim \lambda/2$), обеспечивающей поворот вектора линейной поляризации в падающем пучке на 90° . Оптические конфигурации ФМ, изготовленных технологией ЛИМП на пластинах CaCO_3 размером 10×10 мм толщиной $1,017 \pm 0,006$ ($h_0 \sim \lambda$) для первой ФМ (а), а также толщиной $1,020 \pm 0,006$ ($h_0 \sim \lambda/2$) для второй ФМ (б) представлены на рис. 1 (1 — диаметр гауссова пучка в плоскости установки ФМ ($d \sim 7$ мм), 2 — вытравленные области). Также на рис. 1 приведены рассчитанные в соответствии с соотношениями (1) и (2) значения глубины травления для $\lambda = 1,06$ мкм.

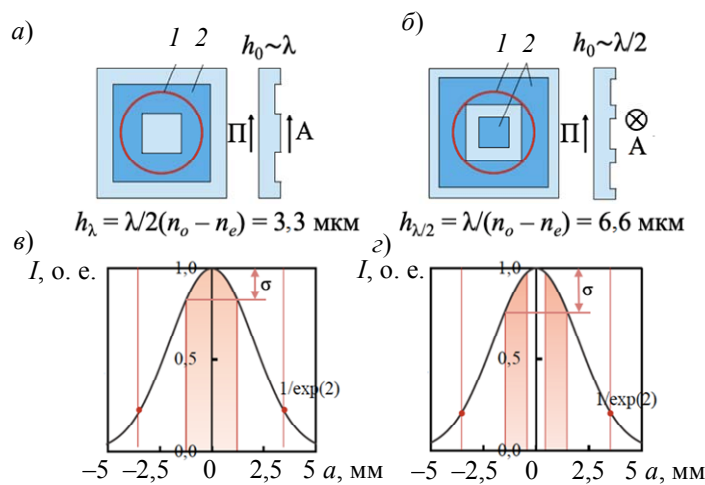


Рис. 1

Для оптических конфигураций ФМ, изготовленных с целью исследования заданного очертания пучка в плоскости изображения, а также другой ФМ, например, в форме круга, кольца или прямоугольника, стремящееся к нулю распределение интенсивности на выходе А будет возникать при любом значении амплитуды вектора линейной поляризации в исходном гауссовом пучке. В то же время распределение интенсивности на выходе А, стремящееся к максимуму, при различных значениях амплитуды вектора линейной поляризации в исходном гауссовом пучке будет отличаться от распределения с плоской вершиной. Это отклонение будет определяться участком гауссова профиля в исходном пучке, который приходится на соответствующие области ФМ, и зависеть от диаметра исходного пучка и размера области на ФМ, формирующей область с максимальной интенсивностью (рис. 1). Для оценки отклонения между распределением интенсивности в областях, значение интенсивности в которых стремится к максимуму, и распределением с плоской вершиной использовалось максимальное значение интенсивности гауссова пучка, приходящееся на соответствующую область (рис. 1). Максимальное значение отклонения σ от распределения с плоской вершиной выбрано в предположении, что при $\sigma \leq 0,3$ ФМ должна обеспечить приемлемое качество очертания пучка (согласно сообщениям о применении различного вида ФМ, проецируемых в плоскость изображения [33]).

Перед изготовлением обеих ФМ, выбранных нами для дальнейшего исследования, были рассчитаны зависимости максимального отклонения σ от плоской вершины в пределах очертания пучка, возникающего на выходе А, а также коэффициент эффективности преобразова-

ния пучка η [20] — от размера вытравленной области на ФМ при диаметре падающего на нее лазерного пучка $d \sim 7$ мм:

$$\eta = \frac{I_{\text{shaped}}}{I_0} \times 100 \%, \quad (3)$$

где I_{shaped} — интеграл профиля формируемого распределения интенсивности, I_0 — интеграл профиля исходного распределения интенсивности.

Результаты расчета зависимостей σ и η от размера a (длины и ширины) области травления для первой (а) и второй ФМ (б) представлены на рис. 2.

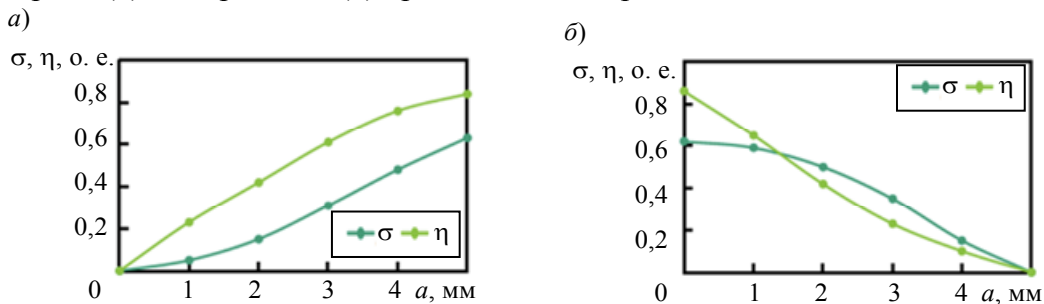


Рис. 2

Эффективность преобразования определялась с использованием модели гауссова распределения. При этом рассчитывалась площадь фигуры под графиком нормального распределения, ограниченного по уровню амплитуды $1/\exp(2)$ значениями $[-3,5; 3,5]$ по одной из координат. В зависимости от площади рассчитываемой ФМ те или иные области, интенсивность в которых стремилась к нулю, исключались из расчета. Размер области травления a для каждой ФМ выбирался согласно рассчитанным зависимостям $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$. При этом для каждой конфигурации находилось компромиссное значение a , обеспечивающее приемлемое качество очертания ($\sigma \leq 0,3$) и приемлемую эффективность преобразования ($\eta \geq 50 \%$).

Согласно зависимостям $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$ для изготовления первой ФМ (рис. 2, а) длина стороны квадрата a выбиралась из двух значений: 2,5 и 3,0 мм. Было выбрано первое значение, поскольку при $a = 2,5$ мм: $\sigma = 0,23$; $\eta = 0,535$; при $a = 3,0$ мм: $\sigma = 0,3$; $\eta = 0,62$.

Как видно из зависимостей $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$ (рис. 2, б), значение a (при заданной стороне внешнего квадрата 5 мм) не позволяет достичь $\sigma \leq 0,3$ и $\eta \geq 50 \%$. Однако представляется возможным достижение $\sigma \sim 0,46$ и $\eta \sim 0,42$ при $a = 2$ мм. Поскольку отклонение от плоской вершины σ в очертании пучка в большей мере определяет качество прецизионной лазерной обработки, анализировались зависимости $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$ для меньших размеров внешнего квадрата.

На рис. 3 представлены зависимости $\sigma = f(a)$ и $\eta = f(a)$, при которых стороны внешнего квадрата были равны 4 (рис. 3, а), 3 (б) и даже 2,5 мм (в). Видно, что при стороне 3 мм и $a = 1$ мм возможно достичь $\sigma \sim 0,27$ и $\eta \sim 0,36$. Именно конфигурация „квадрат в квадрате“ выбрана нами для изготовления ФМ, поскольку значение σ , полученное при $\eta \sim 0,36$, является вполне достаточным.

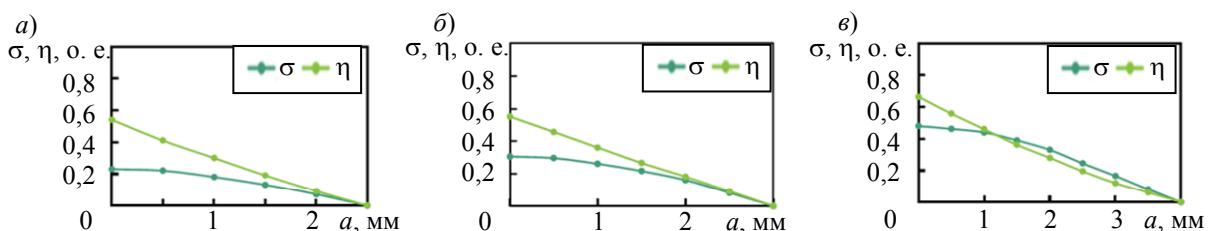


Рис. 3

Следует отметить, что предложенные конфигурации ФМ перспективны для ряда задач лазерной микрообработки, в которых присутствие даже минимальных значений интенсивности в крыльях распределения за пределами конфигурации ФМ недопустимо. Для обеих ФМ

распределение интенсивности на выходе А за пределами внешних границ конфигураций стремится к нулю, вследствие чего исключается даже минимальная интенсивность, которая присутствует в гауссовом пучке за пределами очертания ФМ.

Описание экспериментальной установки. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4. Лазерное излучение (диаметр пучка ~ 7 мм, длина волны 1,06 мкм, длительность импульса 120 нс, максимальная частота следования импульсов 100 кГц, качество пучка $M^2 \sim 2$, энергия в импульсе до 1 мДж, средняя мощность до 50 Вт) от лазерного источника IPG YLPN 1-50 (1) проходило через нейтральный фильтр (2), линейный П (призму Глана) (3), ФМ (4) и линейный А (призму Глана) (5). Светоделительная пластина (6), установленная после второй призмы Глана, отражала часть лазерного пучка на объектив (7) с фокусным расстоянием $f = 50$ мм и числовой апертурой $NA = 0,25$. Сфокусированный пучок регистрировался ПЗС-камерой Gentec Beamage 3.0 (8) для наблюдения очертания пучка, формируемого на выходе А, с увеличением 1,0. Расстояние u от выхода А (второй призмы Глана) до объектива и расстояние v от объектива до плоскости установки ПЗС-камеры выбиралось ($u=v=2f$) в соответствии с уравнением тонкой линзы:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}. \quad (4)$$

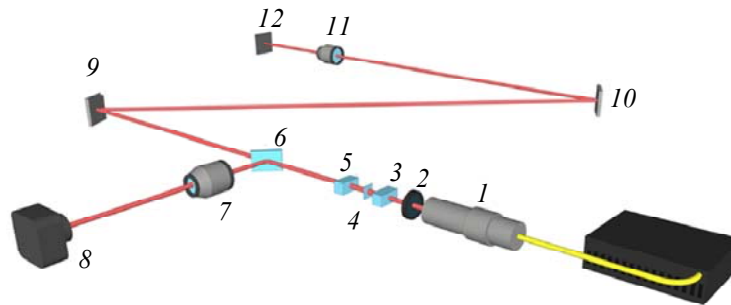


Рис. 4

Вторая часть пучка, прошедшая через светоделительную пластину (6), отражалась от зеркал (9, 10), обеспечивающих удлинение оптического пути пучка, и проецировалась объективом (11) с $f=50$ мм и $NA=0,25$ на образцы полированной стали (12), зафиксированные на трехкоординатном столике.

Регистрация очертаний пучков ПЗС-камерой. Главные направления осей кристаллической пластины, на которой изготовлены ФМ, были направлены под углом 45° по отношению к азимуту пропускания П. Азимут пропускания А в зависимости от толщины исходной кристаллической пластины мог быть ориентирован как параллельно, так и перпендикулярно азимуту пропускания П. Распределение интенсивности на выходе А строилось в плоскости размещения ПЗС-камеры объективом с $f=50$ мм при $u=v=2f$.

На рис. 5 представлены оптические конфигурации изготовленных ФМ, а также профили пучков, зарегистрированные ПЗС-камерой (a — исходный пучок; b — пучок, полученный с применением первой ФМ; v — пучок, полученный с применением второй ФМ), и соответствующие распределения интенсивности по сечению пучков. Кроме того, на рис. 5 показаны профиль и распределение интенсивности исходного лазерного пучка. Видно, что распределения исходного пучка успешно преобразованы в требуемые распределения с применением изготовленных ФМ. Из рис. 5 также видно, что зарегистрированные профили распределения интенсивности в пределах очерченных областей, как и ожидалось, близки к распределению интенсивности с плоской вершиной. Поэтому для оценки качества пучка в пределах этих областей было решено воспользоваться международным стандартом ISO 13694:2000 [34]. В соответствии с ним нормированное максимальное отклонение от плоской вершины в распределении интенсивности в пределах очертания лазерного пучка по экспериментальным данным принято оценивать в соответствии с уравнением:

$$R = \frac{|I_i - I_i^f|_{\max}}{I_{\max}}, \quad 0 \leq R \leq 1, \quad (5)$$

где I_i — измеренное распределение интенсивности, I_i^f — аппроксимированное теоретическое распределение интенсивности, I_{\max} — максимальное значение интенсивности.

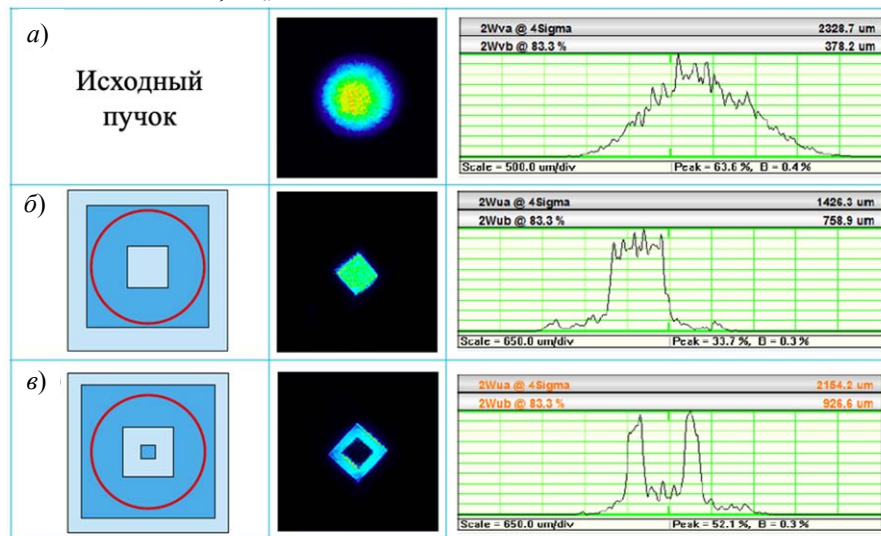


Рис. 5

Для ФМ с центральной областью в форме квадрата (рис. 5, б) R , рассчитанное по экспериментальным результатам, составило 0,17, для ФМ с центральной областью в форме квадрата в квадрате (рис. 5, в) — 0,15.

Формирование отпечатков в плоскости изображения проекционного объектива. Очертание пучков на выходе А реконструировалось в плоскости изображения проекционного объектива. Положение плоскости изображения было рассчитано в соответствии с уравнением тонкой линзы (4).

Из уравнения (4) следует, что расстояние от проекционного объектива до плоскости построения изображения:

$$v = \frac{fu}{u - f}, \quad (6)$$

отсюда при $f=50$ и $u=1950$ мм следует $v=51,32$ мм.

Увеличение изображающей системы:

$$\beta = \frac{v}{u}. \quad (7)$$

При увеличении изображающей системы 0,026 и максимальном размере вытравленной области 5 мм размер (длина стороны) реконструируемого пучка в плоскости изображения должен быть ~130 мкм. Размеры реконструируемых пучков в плоскости изображения при $a=2,5$ мм для первой ФМ и при выбранном размере внешнего квадрата 3 мм для второй ФМ были соответственно равны 65 и 78 мкм.

Размер реконструируемого пучка в плоскости изображения может быть уменьшен при увеличении расстояния u , например, при использовании одного или двух дополнительных зеркал с высокой степенью отражения.

Микрофотографии отпечатков на образцах полированной нержавеющей стали, полученных при абляции под воздействием лазерных пучков, сформированных с применением ФМ, показаны на рис. 6. Энергия в импульсе, измеренная перед проекционным объективом, равна 1 мДж. Так как частота следования импульсов составляла 50 кГц и число импульсов, использованных для формирования отпечатков, достигало $5 \cdot (10^3 - 10^4)$, время формирования

каждого отпечатка составляло $\sim 0,1$ — $1,0$ с. Все отпечатки были исследованы на оптическом микроскопе Axio Carl Zeiss.

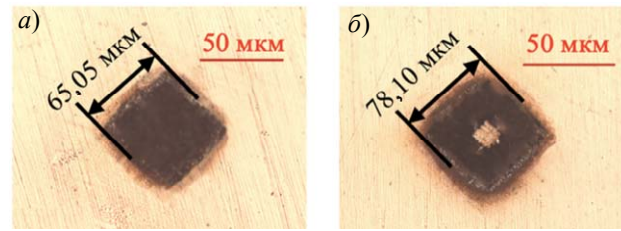


Рис. 6

Из рис. 6 видно, что пучки, полученные с применением первой и второй ФМ, имели форму квадрата (а) и квадрата в квадрате (б). Очертания пучков, наблюдаемые на ПЗС-камере, соответствуют контурам отпечатков, полученных абляцией на образцах полированной нержавеющей стали в плоскости изображения.

Результаты микрообработки образцов полированной нержавеющей стали с использованием второй ФМ, обладающей сложной конфигурацией, показали, что с применением предложенных ФМ возможно получить произвольные формы распределения интенсивности в плоскости изображения при лазерной микрообработке с достаточной плотностью энергии. Очевидно, что ФМ также могут быть использованы для микрообработки других материалов.

Заключение. В настоящей работе предложены ФМ, выполненные на пластинах из двулучепреломляющего кристалла, для получения в схеме построения изображения заданных очертаний лазерных пучков с малой длительностью импульса и с распределением интенсивности в пределах очертания, близким к распределению с плоской вершиной. Максимальное отклонение от плоской вершины σ в полученных пучках в пределах очертания не превышало 0,23 при эффективности преобразования пучка $\eta \sim 53,5$ % для ФМ в форме квадрата и 0,27 при $\eta \sim 36$ % для ФМ в форме квадрата в квадрате. У обеих ФМ распределение интенсивности на выходе А за пределами внешних границ конфигураций стремилось к нулю, что свидетельствует о реальных перспективах их применения в лазерной микрообработке.

При изготовлении ФМ на исходной пластине толщиной, обеспечивающей поворот направления вектора линейной поляризации на 90° на выходе из нее, глубина травления находилась из условия сохранения направления вектора линейной поляризации. При изготовлении ФМ на исходной пластине толщиной, обеспечивающей сохранение направления вектора линейной поляризации в падающем пучке на входе из нее, глубина травления находилась из условия поворота направления вектора линейной поляризации на 90° .

Для изготовления ФМ была применена технология ЛИМП. ФМ были изготовлены на пластинах из двулучепреломляющего кристалла CaCO_3 , кристаллическая ось которого ориентирована параллельно поверхности пластин. Глубина травления областей ФМ, задающих их конфигурацию, в зависимости от толщины исходной пластины обеспечивала сдвиг фазы π или 2π . При установке изготовленных ФМ между линейным П, азимут пропускания которого ориентирован под углом 45° к направлению главных осей кристаллической пластины, и линейным анализатором А, азимут пропускания которого ориентирован параллельно либо перпендикулярно азимуту пропускания П (в зависимости от толщины исходной кристаллической пластины), очертание вытравленной области ФМ было преобразовано в распределение интенсивности на выходе А с четко очерченными границами, которое в дальнейшем проецировалось объективом в плоскость изображения, совмещенную с плоскостью микрообработки.

Очертания отпечатков, полученных лазерной абляцией на пластинах полированной стали, соответствуют конфигурациям ФМ. Качество обработки пластин позволяет предположить, что предложенные в рамках исследования ФМ перспективны как при обработке тонких металлических пленок, так и при создании поверхностных структур на других материалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu Z., Yao X., Cheng X., Wu H., Wang H., Shen H. Experimental study on two-phase boiling in wavy copper microchannels fabricated with ultrafast laser micromachining // *J. Micromech. Microeng.* 2020. Vol. 30, N 065011.
2. Worts N., Jones J., Squier J. Surface structure modification of additively manufactured titanium components via femtosecond laser micromachining // *Opt. Commun.* 2019. Vol. 430. P. 352—357.
3. Gao B., Chen T., Cui W., Li C., Si J., Hou X. Processing grating structures on surfaces of wide-bandgap semiconductors using femtosecond laser and phase mask // *Opt. Eng.* 2015. Vol. 54, N 126106.
4. Roth G. L., Adelman B., Hellmann R. Cutting and drilling of SiC semiconductor by fiber laser // *J. Laser Micro Nanoeng.* 2015. Vol. 10. P. 279—283.
5. Wang M., Lin J. T., Xu Y. X., Fang Z. W., Qiao L. L., Liu Z. M., Fang W., Cheng Y. Fabrication of high-Q microresonators in dielectric materials using a femtosecond laser: Principle and applications // *Opt. Commun.* 2017. Vol. 395. P. 249—260.
6. Ali J. M. Y., Shanmugam V., Lim B., Aberle A. G., Mueller T. Femtosecond laser ablation of dielectric layers for high-efficiency silicon wafer solar cells // *Sol. Energy.* 2018. Vol. 164. P. 287—291.
7. Paun I. A., Zamfirescu M., Mihailescu M., Luculescu C. R., Mustaciosu C. C., Dorobantu I., Calenc B., Dinescu M. Laser micro-patterning of biodegradable polymer blends for tissue engineering // *J. Mater. Sci.* 2015. Vol. 50. P. 923—936.
8. Li Q., Perrie W., Potter R., Allegre O., Li Z., Tang Y., Zhu G., Liu D., Chalker P., Ho J. Femtosecond laser microstructuring of amorphous Polyether (ether) ketone (PEEK) at 775 nm and 387 nm // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2020. Vol. 53, N 365301.
9. Polimeno P., Magazzu A., Iati M. A., Patti F., Saija R., Boschi C. D. E., Donato M. G., Gucciardi P. G., Jones P. H., Volpe G., Marago O. M. Optical tweezers and their applications // *J. Quant Spectrosc. Radiat. Transf.* 2018. Vol. 218. P. 131—150.
10. Gordon R. Biosensing with nanoaperture optical tweezers // *Opt. Laser Technol.* 2019. Vol. 109. P. 328—335.
11. Ji X., Mu R., Fang J., Xu S., Han L. Generation of a dark hollow beam by a four-step phase plate and its application for manipulating cold atoms // *Proc. of SPEE — Quantum Optics and Applications in Computing and Communications II.* 2005. Vol. 5631. P. 237—243.
12. Xia Y., Yin J. Generation of a focused hollow beam by an 2pi-phase plate and its application in atom or molecule optics // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2005. Vol. 22. P. 529—536.
13. McKnight D. J., Vass D. G., Sillitto R. M. Development of a spatial light modulator: a randomly addressed liquid-crystal-over-nMOS array // *Appl. Opt.* 1989. Vol. 28. P. 4757—4762.
14. Courtial J., Dholakia K., Allen L., Padgett M. J. Gaussian beams with very high orbital angular momentum // *Opt. Commun.* 1997. Vol. 144. P. 210—213.
15. Zhou N., Liu J., Wang J. Reconfigurable and tunable twisted light laser // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8. P. 1—10.
16. Qu W., Gu H., Tan Q., Jin G. Precise design of two-dimensional diffractive optical elements for beam shaping // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54. P. 6521—6525.
17. Katz S., Kaplan N., Grossinger I. Using Diffractive Optical Elements: DOEs for beam shaping—fundamentals and applications // *Optik & Photonik.* 2018. Vol. 13. P. 83—86.
18. Mizunami T., Kawashima H., Hayashi A. A flexible fabrication technique of long-period fiber gratings using a tilted amplitude mask // *Proc. of 2002 IEEE/LEOS Workshop on Fibre and Optical Passive Components (Cat. No. 02EX595).* 2002. P. 92—97.
19. Zhao Q., Gong L., Li Y. M. Shaping diffraction-free Lommel beams with digital binary amplitude masks // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54. P. 7553—7558.
20. Kuang Z., Li J., Edwardson S., Perrie W., Liu D., Dearden G. Ultrafast laser beam shaping for material processing at imaging plane by geometric masks using a spatial light modulator // *Opt. Lasers Eng.* 2015. Vol. 70. P. 1—5.
21. Li J., Kuang Z., Edwardson S., Perrie W., Liu D., Dearden G. Imaging-based amplitude laser beam shaping for material processing by 2D reflectivity tuning of a spatial light modulator // *Appl. Opt.* 2016. P. 1095—1100.

22. Sanner N., Huot N., Audouard E., Larat C., Huignard J., Loiseaux B. Programmable focal spot shaping of amplified femtosecond laser pulses // *Opt. Lett.* 2005. Vol. 30. P. 1479—1481.
23. Sanner N., Huot N., Audouard E., Larat C., Huignard J. Direct ultrafast laser microstructuring of materials using programmable beam shaping // *Opt. Lasers Eng.* 2007. Vol. 45. P. 737—741.
24. Liu D., Kuang Z., Shang S., Perrie W., Karnakis D., Kearsley A., Knowles M., Edwardson S., Dearden G., Watkins K. Ultrafast parallel laser processing of materials for high throughput manufacturing // *Proc. of LAMP2009 — the 5th Intern. Congress on Laser Advanced Materials Processing.* 2009. P. 1—5.
25. Allegre O. J., Jin Y., Perrie W., Ouyang J., Fearson E., Edwardson S., Dearden J. Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing // *Opt. Express.* 2013. Vol. 21. P. 21198—21207.
26. Gerchberg R. W., Saxton W. O. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures // *Optik.* 1972. Vol. 35. P. 237—246.
27. Shkuratova V. A., Kostyuk G. K., Sergeev M. M., Zakoldaev R. A., Yakovlev E. B. Speckle-free smoothing of coherence laser beams by a homogenizer on uniaxial high birefringent crystal // *Opt. Mat. Express.* 2019. Vol. 9. P. 2392—2399.
28. Shkuratova V., Kostyuk G., Sergeev M., Vikhrova E. Rapid fabrication of spiral varying retarder for using in simple schemes of generating radial and azimuthal vector optical fields // *IEEE Photonics J.* 2019. Vol. 11, N 2201112.
29. Shkuratova V., Rymkevich V., Kostyuk G., Sergeev M. Laser-induced microplasma as effective tool for phase Elements fabrication on amorphous and crystalline materials // *J. Laser Micro Nanoeng.* 2018. Vol. 13. P. 211—215.
30. Kostyuk G. K., Zakoldaev R. A., Sergeev M. M., Veiko V. P. Laser-induced glass surface structuring by LIBBH technology // *Opt. Quantum Electron.* 2016. Vol. 48, N 249.
31. Kostyuk G. K., Zakoldaev R. A., Koval V. V., Sergeev M. M., Rymkevich V. S. Laser microplasma as a tool to fabricate phase grating applied for laser beam splitting // *Opt. Lasers Eng.* 2017. Vol. 92. P. 63—69.
32. Born M., Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light.* Elsevier, 2013.
33. Dickey F. M. *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques.* CRC Press, 2000.
34. ISO 13694:2000 "Optics and optical instruments — Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam power (energy) density distribution" [Электронный ресурс]: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13694:ed-1:v1:en>> (дата обращения 01.10.2021).

Сведения об авторах

Галина Кирилловна Костюк

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; научный сотрудник; E-mail: gkkostiuk@itmo.ru

Виктория Александровна Шкуратова

— магистр; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; инженер-исследователь; E-mail: shkuratova_va@mail.ru

Андрей Анатольевич Петров

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; старший преподаватель; E-mail: aapetrov@itmo.ru

Максим Михайлович Сергеев

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет наноэлектроники; старший научный сотрудник; E-mail: maxim.m.sergeev@gmail.com

Поступила в редакцию 10.11.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 30.11.2021.

REFERENCES

1. Liu Z., Yao X., Cheng X., Wu H., Wang H., Shen H. *J. Micromech. Microeng.*, 2020, no. 065011(30).
2. Worts N., Jones J., Squier J. *Opt. Commun.*, 2019, vol. 430, pp. 352—357.
3. Gao B., Chen T., Cui W., Li C., Si J., Hou X. *Opt. Eng.*, 2015, no. 126106(54).
4. Roth G.L., Adelmann B., Hellmann R. *J. Laser Micro Nanoeng.*, 2015, vol. 10, pp. 279—283.
5. Wang M., Lin J.T., Xu Y.X., Fang Z.W., Qiao L.L., Liu Z.M., Fang W., Cheng Y. *Opt. Commun.*, 2017, vol. 395, pp. 249—260.
6. Ali J.M.Y., Shanmugam V., Lim B., Aberle A.G., Mueller T. *Sol. Energy*, 2018, vol. 164, pp. 287—291.
7. Paun I.A., Zamfirescu M., Mihalescu M., Luculescu C.R., Mustaciosu C.C., Dorobantu I., Calenc B., Dinescu M. *J. Mater. Sci.*, 2015, vol. 50, pp. 923—936.
8. Li Q., Perrie W., Potter R., Allegre O., Li Z., Tang Y., Zhu G., Liu D., Chalker P., Ho J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2020, no. 365301(53).

9. Polimeno P., Magazzu A., Iati M.A., Patti F., Saija R., Boschi C.D.E., Donato M.G., Gucciardi P.G., Jones P.H., Volpe G., Marago O.M. *J. Quant Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2018, vol. 218, pp. 131–150.
10. Gordon R. *Opt. Laser Technol.*, 2019, vol. 109, pp. 328–335.
11. Ji X., Mu R., Fang J., Xu S., Han L. *Proceedings of SPEE - Quantum Optics and Applications in Computing and Communications II*, 2005, vol. 5631, pp. 237–243.
12. Xia Y., Yin J. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2005, vol. 22, pp. 529–536.
13. McKnight D.J., Vass D.G., Sillitto R.M. *Appl. Opt.*, 1989, vol. 28, pp. 4757–4762.
14. Courtial J., Dholakia K., Allen L., Padgett M.J. *Opt. Commun.*, 1997, vol. 144, pp. 210–213.
15. Zhou N., Liu J., Wang J. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, pp. 1–10.
16. Qu W., Gu H., Tan Q., Jin G. *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, pp. 6521–6525.
17. Katz S., Kaplan N., Grossinger I. *Optik & Photonik*, 2018, vol. 13, pp. 83–86.
18. Mizunami T., Kawashima H., Hayashi A. *Proceedings of 2002 IEEE/LEOS Workshop on Fibre and Optical Passive Components (Cat. No. 02EX595)*, 2002, pp. 92–97.
19. Zhao Q., Gong L., Li Y.M. *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, pp. 7553–7558.
20. Kuang Z., Li J., Edwardson S., Perrie W., Liu D., Dearden G. *Opt. Lasers Eng.*, 2015, vol. 70, pp. 1–5.
21. Li J., Kuang Z., Edwardson S., Perrie W., Liu D., Dearden G. *Appl. Opt.*, 2016, pp. 1095–1100.
22. Sanner N., Huot N., Audouard E., Larat C., Huignard J., Loiseaux B. *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30, pp. 1479–1481.
23. Sanner N., Huot N., Audouard E., Larat C., Huignard J. *Opt. Lasers Eng.*, 2007, vol. 45, pp. 737–741.
24. Liu D., Kuang Z., Shang S., Perrie W., Karnakis D., Kearsley A., Knowles M., Edwardson S., Dearden G., Watkins K. *Proceedings of LAMP2009 – the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*, 2009, pp. 1–5.
25. Allegre O.J., Jin Y., Perrie W., Ouyang J., Fearson E., Edwardson S., Dearden J. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, pp. 21198–21207.
26. Gerchberg R.W., Saxton W.O. *Optik*, 1972, vol. 35, pp. 237–246.
27. Shkuratova V.A., Kostyuk G.K., Sergeev M.M., Zakoldaev R.A., Yakovlev E.B. *Opt. Mat. Express*, 2019, vol. 9, pp. 2392–2399.
28. Shkuratova V., Kostyuk G., Sergeev M., Vikhrova E. *IEEE Photonics J.*, 2019, no. 2201112(11).
29. Shkuratova V., Rymkevich V., Kostyuk G., Sergeev M. *J. Laser Micro Nanoeng.*, 2018, vol. 13, pp. 211–215.
30. Kostyuk G.K., Zakoldaev R.A., Sergeev M.M., Veiko V.P. *Opt. Quantum Electron.*, 2016, no. 249(48).
31. Kostyuk G.K., Zakoldaev R.A., Koval V.V., Sergeev M.M., Rymkevich V.S. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 92, pp. 63–69.
32. Born M., Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Elsevier, 2013.
33. Dickey F.M. *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques*, CRC Press, 2000.
34. ISO 13694:2000 "Optics and optical instruments — Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam power (energy) density distribution", <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13694:ed-1:v1:en>.

Data on authors

Galina K. Kostyuk	—	PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Research Fellow; E-mail: gkkostiuk@itmo.ru
Victoria A. Shkuratova	—	MSc; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Engineer-Researcher; E-mail: shkuratova_va@mail.ru
Andrey A. Petrov	—	PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Senior Lecturer; E-mail: aapetrov@itmo.ru
Maksim M. Sergeev	—	PhD; ITMO University, Faculty of Nanoelectronics; Senior Researcher; E-mail: maxim.m.sergeev@gmail.com

The article was submitted 10.11.2021; approved after reviewing 30.11.2021; accepted for publication 30.11.2021.