

## ФОРМИРОВАНИЕ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ СВЕТОВЫХ ПЯТЕН НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛЬНЫХ ПУЧКОВ ЭЙРИ

С.Н. Хонина<sup>1,2</sup>, А.П. Порфирьев<sup>1,2</sup>, С.А. Фомченков<sup>1,2</sup>, А.С. Ларькин<sup>3</sup>, А.Б. Савельев-Трофимов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

### Аннотация

Выполнено сравнительное численное исследование формирования в фокальной плоскости близкорасположенных световых пятен с помощью дифракционных решёток с комплексно сопряжёнными порядками и бинарных оптических элементов, согласованных с модами Эрмита–Гаусса и зеркальными пучками Эйри. Показано, что решётки позволяют формировать набор равномерных световых точек с высокой точностью, но формируемая картина быстро портится при смещении из плоскости фокуса. Пучки Эрмита–Гаусса в соответствии со своими модовыми свойствами обладают высокой устойчивостью к дефокусировке, но распределение интенсивности и размер световых точек в этом случае неравномерные. Зеркальные пучки Эйри представляют собой компромиссный вариант – они имеют более равномерную интенсивность световых пятен, чем моды Эрмита–Гаусса, и в то же время устойчивы к дефокусировке. Эксперименты с перестраиваемым лазером подтвердили упомянутые преимущества зеркальных пучков Эйри по сравнению с модами Эрмита–Гаусса, а также показали хорошую спектральную устойчивость изготовленных дифракционных оптических элементов.

**Ключевые слова:** фокусировка в близкорасположенные световые пятна, дифракционный оптический элемент, моды Эрмита–Гаусса, зеркальные пучки Эйри, глубина фокуса, хроматическая дисперсия.

**Цитирование:** Хонина, С.Н. Формирование близкорасположенных световых пятен на основе лазерных зеркальных пучков Эйри / С.Н. Хонина, А.П. Порфирьев, С.А. Фомченков, А.С. Ларькин, А.Б. Савельев-Трофимов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 661-669. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-661-669.

### Введение

Формирование определённых распределений интенсивности, состоящих из близкорасположенных световых пятен, представляет практический интерес для задач взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с веществом [1–5].

В частности, в работе [3] было показано, что под действием лазерного предымпульса на поверхность жидкой галлиевой мишени происходит формирование микроструй вещества. На основе проведенных экспериментов и результатов численного моделирования формирования микроструй авторами работы [4] было показано, что выброс струи с поверхности жидкой мишени происходит в результате пересечения фронтов ударных волн, распространяющихся под поверхностью мишени от различных горячих пятен в распределении плотности энергии в пятне фокусировки.

Таким образом, создание неоднородного регулярного поперечного распределения плотности энергии лазерного пучка, состоящего из близкорасположенных горячих пятен, представляет большой практический интерес для задач взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с веществом. Для этой цели удобно использовать модовые пучки, сохраняющие свою конфигурацию (с точностью до масштаба) на неограниченном расстоянии, а также при прохождении через линзовые системы.

Универсальным методом генерации поперечных лазерных мод является модуляция фазы исходного Гауссова пучка. Для этого может использоваться про-

странственный модулятор света [6–8] или дифракционные оптические элементы (ДОЭ) [9–11].

Ранее, в работе [12], мы сравнивали формирование в фокальной плоскости близкорасположенных световых пятен с помощью дифракционной решётки и ДОЭ, согласованных с модами Эрмита–Гаусса (ЭГ). Было показано, что при формировании набора близкорасположенных световых пятен период дифракционной решётки становится очень малым и фаза фактически соответствует модам ЭГ. Однако в последнем случае световые пятна имеют не только различный размер, но и различную интенсивность.

В работе [13] авторами исследовалось влияние частичного кодирования ДОЭ на качество формирования модовых распределений ЭГ при освещении оптического элемента фемтосекундным излучением. Было показано, что хорошее качество формирования световых пятен и относительная устойчивость к хроматической дисперсии при использовании импульсного лазерного излучения обеспечивается при низких индексах мод. Для высших мод требуется дополнительное кодирование фазовой функции, что приводит к снижению дифракционной эффективности [14, 15].

Таким образом, хотя пучки ЭГ и обладают модовыми свойствами, т.е. сохраняют свою структуру при распространении в свободном пространстве и прохождении через линзовые системы [16], формируемые при этом распределения имеют определённые недостатки.

Компенсировать неравномерность интенсивности при сохранении модовых свойств можно при исполь-

зовании вместо мод ЭГ симметризованных или зеркальных пучков Эйри [17]. В отличие от пучков Эйри-Гаусса [18] или экспоненциальных пучков Эйри [19], зеркальные пучки Эйри представляют собой симметризованную суперпозицию отсечённых по нулевому значению функций Эйри и напоминают своей структурой моды ЭГ. Пространственный спектр зеркальных пучков Эйри состоит из довольно равномерных по интенсивности максимумов [17].

В данной работе выполняется сравнительное исследование формирования близкорасположенных световых точек с помощью мод ЭГ и зеркальных пучков Эйри. Кроме того, рассмотрено формирование близкорасположенных световых пятен на основе решётки с комплексно сопряжёнными дифракционными порядками. Формирование картин сравнивается как по соблюдению условия равенства размеров и интенсивности световых пятен, так и по устойчивости к дефокусировке.

Экспериментальное исследование изготовленных образцов ДОО с использованием перестраиваемого лазера позволило выяснить устойчивость сформированных мод ЭГ и зеркальных пучков Эйри к хроматической дисперсии.

**1. Моделирование**

Рассмотрим формирование близкорасположенных световых пятен в фокальной плоскости линзы на основе решеток с комплексно сопряжёнными дифракционными порядками, а также с помощью мод ЭГ и зеркальных пучков Эйри.

Для моделирования воспользуемся преобразованием Фурье:

$$G(u) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda f} x u \right] dx, \tag{1}$$

где  $f$  – фокусное расстояние линзы,  $\lambda$  – длина волны излучения.

Для преобразования (1) известно свойство смещения:

$$G(u - \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} g_s(x) \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda f} x u \right] dx, \tag{2}$$

где  $g_s(x) = g(x) \exp \left( i \frac{2\pi\alpha}{\lambda f} x \right)$ .

Свойство (2) позволяет формировать произвольный набор смещённых копий исходного объекта. Если в объектной плоскости установить оптический элемент с комплексной функцией вида:

$$\tau(x) = \sum_p c_p \exp \left( i \frac{2\pi\alpha_p}{\lambda f} x \right), \tag{3}$$

то в фокальной плоскости в точках  $\alpha_p$ , соответствующих пространственным несущим частотам, будут формироваться копии объекта с интенсивностью, пропорциональной  $|c_p|^2$ .

Этот способ размножения световых распределений в заданной конфигурации используется для оп-

тического захвата и манипулирования частицами [20, 21], для оптического разложения светового поля по некоторому базису [22, 23], а также для разделения лазерного пучка [24, 25].

На рис. 1 показаны результаты фокусировки ( $f=250$  мм) плоского лазерного пучка радиусом 10 мм с базовой длиной волны 800 нм, прошедшего бинарную дифракционную решётку, формирующую восемь световых пятен с коэффициентами  $c_p$  в (3), имеющими одинаковую амплитуду, но противоположную фазу у соседних слагаемых. В этом случае формируемые решёткой дифракционные порядки, расположенные даже очень близко друг к другу, не будут сливаться в отличие от случая, рассмотренного в [12].

Как видно из рис. 1, уменьшать расстояние между световыми пятнами за счёт уменьшения размера несущей пространственной частоты  $\alpha_p$  можно лишь до определённого предела. В частности, до момента, когда расстояние между световыми пятнами становится равным размеру самих пятен (рис. 1б). В этом случае ширина световых пятен равна  $\Delta = 0,02$  мм.

Дальнейшее уменьшение  $\alpha_p$  приводит не только к сближению световых точек с одновременным их сужением  $\Delta = 0,01$  мм, но и к перераспределению энергии между ними нежелательным образом (рис. 1в).

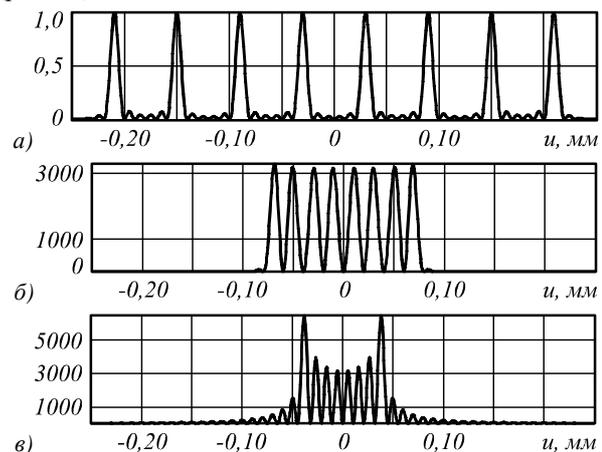


Рис. 1. Формирование 8 световых пятен с помощью дифракционной решётки – нормированное распределение в фокальной плоскости для различных значений параметра  $\alpha_p$ : 0,93 мм (а), 0,31 мм (б), 0,16 мм (в)

Расстояние между дифракционными порядками однозначно определяется из соотношения для дифракционной решётки:

$$d \sin \theta_m = m\lambda, \tag{4}$$

где  $d$  – размер периода решётки,  $m$  – номер дифракционного порядка.

В частности, первый порядок дифракции соответствует отношению длины волны излучения к размеру периода решётки:

$$\sin \theta_1 = \lambda/d. \tag{5}$$

Чтобы приблизить дифракционные порядки друг к другу, нужно сделать угол дифракции как можно

меньше, т.е. максимально увеличить размер периода решётки.

Очевидно, что минимальное расстояние не может быть меньше дифракционного предела:

$$\delta = \frac{\lambda f}{2R}, \tag{6}$$

где  $R$  – радиус оптического элемента.

В соответствии с формулой (6) дифракционный предел для иллюстрируемого на рис. 1 случая равен  $\delta = 0,01$  мм. Однако наилучшая ситуация по равномерности интенсивности и близости световых пятен наблюдается для  $\Delta = 0,02$  мм (рис. 1б).

Попытка сблизить дифракционные порядки приведёт к увеличению периода до размера оптического элемента, что фактически означает вырождение решётки, т.к. в этом случае она будет работать в нулевом порядке дифракции. Данный факт детально обсуждался в работе [12]. Поэтому было предложено использовать для формирования близкорасположенных световых точек бинарные ДОЭ, согласованные с модами ЭГ [26].

Однако распределение световых пятен у мод ЭГ не очень равномерное – крайние пятна крупнее и интенсивность в них выше. Поэтому в данной работе мы рассматриваем ещё один тип пучков, обладающих модовыми свойствами – симметризованные или зеркальные пучки Эйри [17].

Моды ЭГ во входной плоскости имеют следующий вид:

$$\Psi_n(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) H_n\left(\frac{x\sqrt{2}}{\sigma}\right), \tag{7}$$

где  $\sigma$  – радиус перетяжки Гауссова пучка,  $H_n(x)$  – полином Эрмита.

Распространение мод ЭГ в параксиальной области свободного пространства описывается следующей формулой:

$$\Psi_n(x, z) = \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma(z)}} \exp\left[-i\left(n + \frac{1}{2}\right)\eta(z)\right] \times \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2(z)}\right) \exp\left(-\frac{ikx^2}{2R(z)}\right) H_n\left(\frac{x\sqrt{2}}{\sigma(z)}\right), \tag{8}$$

где  $\eta(z) = \arctg(z/z_0)$ ,  $R(z) = z(1 + z_0^2/z^2)$ ,  $z_0 = k\sigma^2/2$ ,

$\sigma(z) = \sigma\sqrt{1 + z^2/z_0^2}$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

Из выражения (8) видно, что моды ЭГ распространяются в свободном пространстве без изменения структуры, лишь масштабно увеличиваясь.

Функции Эйри как решение параксиального волнового уравнения распространения в свободном пространстве имеет следующий вид:

$$\psi(x, z) = \text{Ai}\left[x - \left(\frac{z}{2k}\right)^2\right] \exp\left\{\frac{iz}{2k}\left[x - \frac{2}{3}\left(\frac{z}{2k}\right)^2\right]\right\}. \tag{9}$$

Из вышеприведённого выражения видно, что интенсивность функции (9) не меняется при различных значениях  $z$ , а лишь смещается пропорционально квадрату этого параметра.

Однако, так как функция Эйри является бесконечной, то реализовать её проблематично. Поэтому обычно во входной плоскости ( $z=0$ ) рассматривают ограниченную по энергии функцию [18, 19]:

$$\psi(x, 0) = \text{Ai}(x) \exp(ax), \tag{10}$$

или

$$\psi(x, 0) = \text{Ai}(x) \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right). \tag{11}$$

Заметим, однако, что аподизация функции Эйри экспоненциальной или Гауссовой функцией приводит к быстрой потере модовых свойств такого пучка при распространении. Поэтому в работе [17] было предложено формировать функции Эйри, ограниченные апертурной функцией:

$$\Psi_n(x) = \text{Ai}(x) \cdot \text{rect}\left(\frac{x + (x_n + c_0)/2}{c_0 - x_n}\right), \tag{12}$$

где  $c_0$  – граница справа в соответствии с затуханием функции в положительной части аргумента,  $x_n$  – граница слева, соответствующая  $n$ -му корню.

Известно, что для действительных  $x$ :

$$\text{Ai}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[i\left(\frac{t^3}{3} + xt\right)\right] dt. \tag{13}$$

Рассмотрим сумму функции Эйри с её зеркальным отражением. С учётом (13) и масштабирующего коэффициента получим:

$$\text{Ai}(x) + \text{Ai}(-x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\alpha t^3) \exp(ixt) dt, \tag{14}$$

т.е. в пространственной спектральной (фокальной) плоскости получаем набор световых точек, в соответствии с  $\cos(\alpha t^3)$ , которые являются близкорасположенными и имеют одинаковую интенсивность.

Аналогичный результат можно получить для суммы смещённых в разные стороны функций Эйри. Таким образом, зеркальные пучки Эйри можно формировать в виде суммы смещённых ограниченных распределений (12):

$$\hat{\Psi}_n = \text{Ai}_n(x - x_n) + (-1)^{n-1} \text{Ai}_n(-x - x_n). \tag{15}$$

Введение коэффициента в (15) связано с соблюдением гладкости сшивки двух функций в точке зеркального отражения (в данном случае при  $x=0$ ).

На рис. 2 показаны результаты сравнительного моделирования формирования набора из 8 световых пятен с использованием мод ЭГ и зеркальных пучков Эйри.

Как видно, пучок Эйри обеспечивает более равномерное распределение интенсивности световых точек, чем моды ЭГ, хотя крайние световые пятна остаются более широкими, чем остальные.

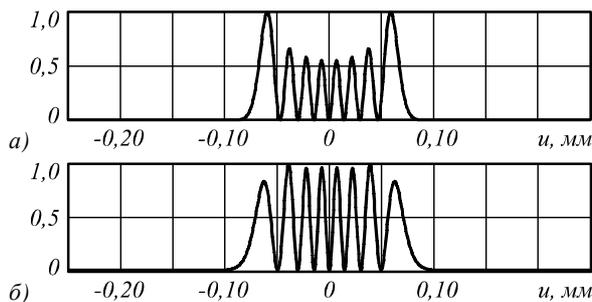


Рис. 2. Формирование набора световых пятен в фокальной плоскости с использованием мод ЭГ (а) и зеркальных пучков Эйри (б)

Это общий недостаток модовых распределений по сравнению с распределением, обеспечиваемым решётками с комплексно сопряженными дифракционными порядками (рис. 1). Хотя нужно отметить, что распределения интенсивности на рис. 1в и 2а похожи.

Тем не менее, модовые пучки обладают другим преимуществом, не свойственным полям, созданным решётками, а именно, сохранение своей структуры при распространении в свободном пространстве и прохождении через линзовые системы, включая устойчивость к дефокусировке.

На рис. 3 показано моделирование распространения рассмотренных распределений вблизи фокальной плоскости.

Как видно, распределения, формируемые решётками, очень быстро теряют свою структуру при смещении поля из фокальной плоскости (рис. 3а, б). Причём чем меньше размер световых пятен, тем быстрее они рассеиваются. Модовые распределения (рис. 3в, г) сохраняют свою структуру, меняется только масштаб.

Таким образом, рассмотренные способы формирования ближкорасположенных световых пятен обладают различными преимуществами и недостатками. Выбрать более подходящий способ можно в зависимости от особенностей решаемой задачи.

**2. Экспериментальное исследование влияния хроматической дисперсии на фокальную картину при использовании ДОЭ**

Одна из трудностей, возникающих при использовании средств дифракционной оптики для формирования заданного распределения плотности энергии в пучке фемтосекундного излучения, связана с широким спектром фемтосекундного импульса (вплоть до 200 нм FWHM) [27]. Микрорельеф ДОЭ является оптимальным для монохроматического излучения, поэтому на качество формируемого распределения интенсивности в этом случае большое влияние оказывает хроматическая дисперсия [12]. Поэтому в данном разделе исследуется влияние хроматической дисперсии на фокальную картину при использовании рассмотренных ДОЭ.

Технологически создавать заданное амплитудно-фазовое распределение сложно, но полное игнорирование амплитудной информации может приводить к очень существенному искажению фокальной картины (рис. 4).

Причём в зависимости от размера освещающего пучка картина может заметно меняться [5, 6, 10, 20].

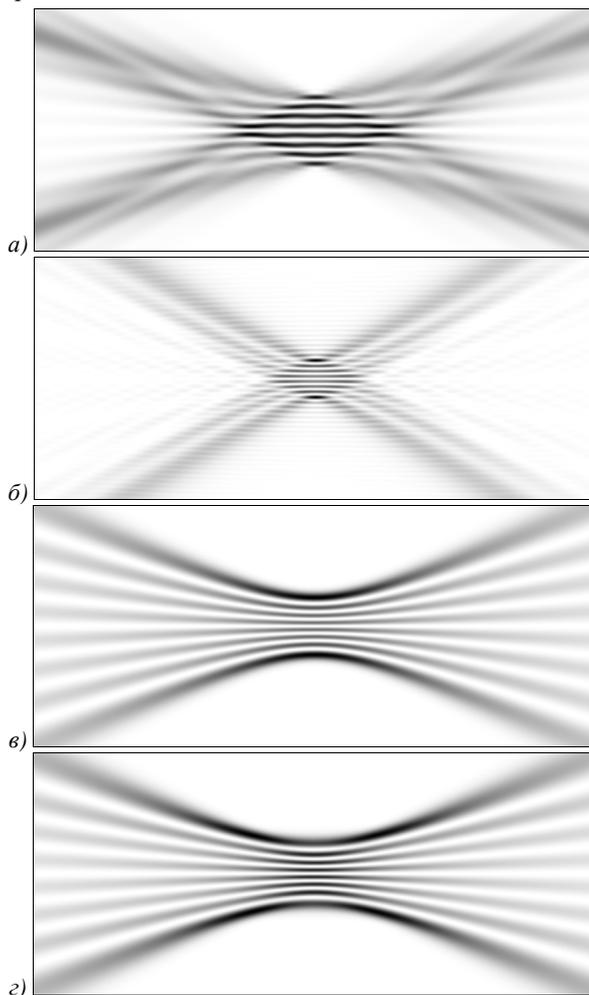


Рис. 3. Картины интенсивности вблизи фокальной плоскости  $z \in [240 \text{ мм}, 260 \text{ мм}]$ ,  $u \in [-0,25 \text{ мм}, 0,25 \text{ мм}]$  для решёток с  $\alpha_p = 0,31 \text{ мм}$  (а),  $\alpha_p = 0,16 \text{ мм}$  (б); моды ЭГ (в) и зеркального пучка Эйри (г) (негативные изображения)

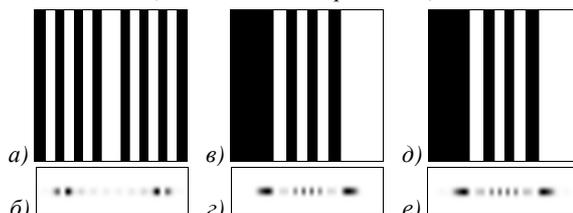


Рис. 4. Формирование набора световых пятен (нижний ряд) при освещении Гауссовым пучком некодированных фазовых ДОЭ (верхний ряд): для решётки (а),(б), мод ЭГ (в),(г) и зеркальных пучков Эйри (д),(е)

Для снижения погрешности формирования заданного распределения и снижения зависимости от размера пучка применяют частичное кодирование амплитудной информации в фазовую [9, 20]. Результаты оптимизации кодирования показаны на рис. 5.

Экспериментальное исследование изготовленных образцов ДОЭ, формирующих моды ЭГ и зеркальные пучки Эйри, производилось с помощью перестраиваемого по длине волны лазера EKSPLA NT200 Series.

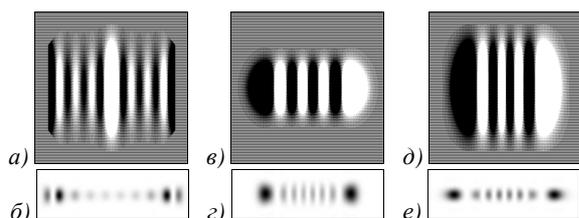


Рис. 5. Формирование набора световых пятен (нижний ряд) при освещении Гауссовым пучком кодированных фазовых ДОЭ (верхний ряд): для решётки (а), (б), мод ЭГ (в), (z) и зеркальных пучков Эйри (д), (е)

Длина волны перестраивалась в диапазоне от 840 нм до 1000 нм с шагом 20 нм. Экспериментальная схема показана на рис. 6. С помощью системы, образованной пинхолом *PH* (размер апертуры 40 мкм) и микрообъективом *МО* (20×, NA=0,4), осуществлялась процедура пространственной фильтрации исходного лазерного пучка перестраиваемого лазера *Laser*. Затем расходящийся лазерный пучок направлялся на исследуемый дифракционный оптический элемент *DOE*. Лазерный пучок, падающий на ДОЭ, совпадал по диаметру с диаметром ДОЭ (20 мм). Преобразованный с помощью ДОЭ лазерный пучок фокусировался с помощью линзы *L* ( $f=250$  мм) на матрице видеокамеры *CCD*.

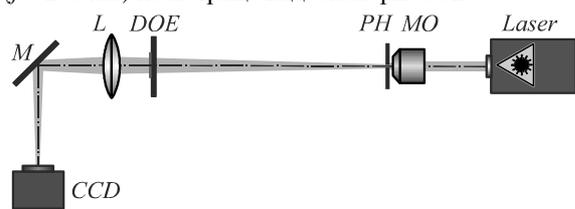


Рис. 6. Экспериментальная схема:

*Laser* – перестраиваемый лазер *EKSPLA NT200 Series*, *МО* – микрообъектив (20×, NA = 0,4), *PH* – пинхол, *DOE* – исследуемый дифракционный оптический элемент, *L* – линза, *M* – зеркало, *CCD* – видеокамера

В экспериментах были использованы ДОЭ с глубокой травлением 870 нм. Элементы были изготовлены методом фотолитографии (разрешение записи шаблона 10 мкм).

Экспериментально сформированные распределения интенсивности при использовании перестраиваемого лазера для мод ЭГ показаны на рис. 7, а для зеркальных пучков Эйри – на рис. 8. Видно, что зеркальные пучки Эйри обеспечивают более равномерное распределение интенсивности в световых точках.

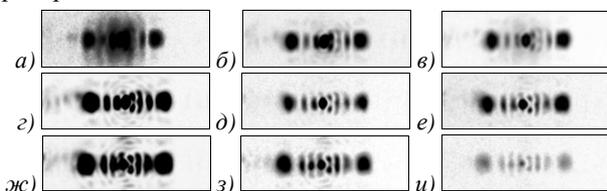


Рис. 7. Влияние хроматической дисперсии на ДОЭ, согласованный с модой ЭГ (7,0): распределения интенсивности при различных длинах волн освещающего излучения (от 840 нм (а) до 1000 нм (и) с шагом 20 нм). Негативные изображения, размер изображений – 3×3 мм

Из представленных изображений видно, что распределения интенсивности для мод ЭГ наилучшего

качества формируются в диапазоне 920–1000 нм, для зеркальных пучков Эйри этот диапазон несколько шире – от 880 до 1000 нм.

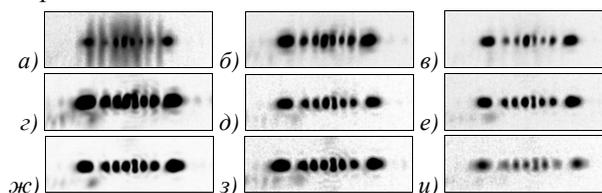


Рис. 8. Влияние хроматической дисперсии на ДОЭ, согласованный с зеркальным пучком Эйри: распределения интенсивности при различных длинах волн освещающего излучения (от 840 нм (а) до 1000 нм (и) с шагом 20 нм). Негативные изображения, размер изображений – 3×3 мм

Таким образом, можно сказать, что изготовленные ДОЭ обладают спектральной устойчивостью. При отклонении длины волны от оптимального диапазона происходит только уменьшение эффективности формирования пятен, вызванное тем, что не вся энергия исходного пучка преобразуется в энергию, идущую в эти порядки. Данная часть излучения не подвергается модуляции при прохождении ДОЭ и направляется в нулевой порядок. При этом стоит отметить, что из-за дисперсии при изменении длины волны происходит смещение положения фокальной точки вдоль оси распространения пучка. При съёмке экспериментальных распределений интенсивности видеокамеру не перемещали. Такая устойчивость к дефокусировке обеспечивается модовым характером сформированных распределений.

### Заключение

Выполнено сравнительное численное исследование формирования в фокальной плоскости близкорасположенных световых пятен с помощью дифракционных решёток с комплексно сопряжёнными порядками и бинарных оптических элементов, согласованных с модами Эрмита–Гаусса и зеркальными пучками Эйри.

Показано, что решётки позволяют формировать набор равномерных световых точек с высокой точностью, но формируемая картина быстро портится при смещении из плоскости фокуса. Пучки Эрмита–Гаусса в соответствии со своими модовыми свойствами обладают высокой устойчивостью к дефокусировке, но распределение интенсивности и размер световых точек в этом случае неравномерные. Зеркальные пучки Эйри представляют собой компромиссный вариант – они имеют более равномерную интенсивность световых пятен, чем моды Эрмита–Гаусса, и в то же время устойчивы к дефокусировке.

Эксперименты с перестраиваемым лазером подтвердили упомянутые преимущества зеркальных пучков Эйри по сравнению с модами Эрмита–Гаусса, а также показали хорошую спектральную устойчивость изготовленных дифракционных оптических элементов.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант №16-42-01060.

*Литература*

- Malka, V.** Principles and applications of compact laser-plasma accelerators / V. Malka, J. Faure, Y.A. Gauduel, E. Lefebvre, A. Rousse, K.T. Phuoc // *Nature Physics*. – 2008. – Vol. 4. – P. 447-453. – DOI: 10.1038/nphys966.
- Cheng, J.** A review of ultrafast laser materials micromachining / J. Cheng, C. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden, K. Watkins // *Optics and Laser Technology*. – 2013. – Vol. 46. – P. 88-102. – DOI: 10.1016/j.optlas-tec.2012.06.037.
- Uryupina, D.S.** Femtosecond laser-plasma interaction with prepulse-generated liquid metal microjets / D.S. Uryupina, K.A. Ivanov, A.V. Brantov, A.B. Savel'ev, V.Yu. Bychenkov, M.E. Povarnitsyn, R.V. Volkov, V.T. Tikhonchuk // *Physics of Plasmas*. – 2012. – Vol. 19, Issue 1. – 013104 (8 p.). – DOI: 10.1063/1.3675871.
- Lar'kin, A.** Microjet formation and hard x-ray production from a liquid metal target irradiated by intense femtosecond laser pulses / A. Lar'kin, D. Uryupina, K. Ivanov, A. Savel'ev, T. Bonnet, F. Gobet, F. Hannachi, M. Tarisien, M. Versteegen, K. Spohr, J. Breil, B. Chimier, F. Dorchies, C. Fourment, P.-M. Leguay, V.T. Tikhonchuk // *Physics of Plasmas*. – 2014. – Vol. 21, Issue 9. – 093103 (7 p.). – DOI: 10.1063/1.4894099.
- Алфёров, С.В.** О возможности управления лазерной абляцией при острой фокусировке фемтосекундного излучения / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, К.Н. Тукмаков, О.Ю. Моисеев, С.А. Шуляпов, К.А. Иванов, А.Б. Савельев-Трофимов // *Квантовая электроника*. – 2014. – Т. 44, № 11. – С. 1061-1065.
- Hayasaki, Y.** Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator / Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita, N. Nishida // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 87, Issue 3. – 031101. – DOI: 10.1063/1.1992668.
- Kuang, Z.** High throughput diffractive multi-beam femtosecond laser processing using a spatial light modulator / Z. Kuang, W. Perrie, J. Leach, M. Sharp, S.P. Edwardson, M. Padgett, G. Dearden, K.G. Watkins // *Applied Surface Science*. – 2008. – Vol. 255, Issue 5-1. – P. 2284-2289. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.07.091.
- Chen, Y.** Self-splitting properties of a Hermite-Gaussian correlated Schell-model beam / Y. Chen, J. Gu, F. Wang, Y. Cai // *Physical Review A*. – 2015. – Vol. 91. – 013823. – DOI: 10.1103/PhysRevA.91.013823.
- Дифракционная оптика и нанофотоника** / Е.А. Безус, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович, А.А. Ковалев, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.С. Стафеев, С.Н. Хонина, под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2014. – 608 с. – ISBN 978-5-922115711.
- Kuroiwa, Y.** Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements / Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka, K. Hirao // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12, Issue 9. – P. 1908-1915.
- Torres-Peiró, S.** Parallel laser micromachining based on diffractive optical elements with dispersion compensated femtosecond pulses / S. Torres-Peiró, J. González-Ausejo, O. Mendoza-Yero, G. Mínguez-Vega, P. Andrés, J. Lancis // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 26. – P. 31830-31836. – DOI: 10.1364/OE.21.031830.
- Хонина, С.Н.** Исследование фокусировки в близкорасположенных световых пятна при освещении дифракционных оптических элементов коротким импульсным лазерным пучком / С.Н. Хонина, С.А. Дегтярев, А.П. Порфирьев, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев, А.С. Ларькин, А.Б. Савельев-Трофимов // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 187-196. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-187-196.
- Ларькин, А.С.** Формирование мод Эрмита-Гаусса пучка мощного фемтосекундного лазерного излучения с помощью бинарно-фазовых дифракционных оптических элементов / А.С. Ларькин, Д.В. Пушкарев, С.А. Дегтярев, С.Н. Хонина, А.Б. Савельев // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46, № 8. – С. 733-737.
- Kirk, J.P.** Phase-only complex-valued spatial filters / J.P. Kirk, A.L. Jones // *Journal of the Optical Society of America*. – 1971. – Vol. 61, Issue 8. – P. 1023-1028. – DOI: 10.1364/JOSA.61.001023.
- Khonina, S.N.** Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayevev, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Päivänranta, J. Turunen // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2009. – Vol. 11, Issue 6. – 065702 (7 p.). – DOI: 10.1088/1464-4258/11/6/065702.
- Хонина, С.Н.** Саморепродукция многомодовых пучков Гаусса-Эрмита / С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Сойфер // *Письма в Журнал технической физики*. – 1999. – Т. 25, № 12. – С. 62-69.
- Khonina, S.N.** Specular and vortical Airy beams / S.N. Khonina // *Optics Communications*. – 2011. – Vol. 284, Issue 19. – P. 4263-4271. – DOI: 10.1016/j.optcom.2011.05.068.
- Banders, M.A.** Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical systems / M.A. Banders, J.C. Gutiérrez-Vega // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15, Issue 25. – P. 16719-16728. – DOI: 10.1364/OE.15.016719.
- Siviloglou, G.A.** Accelerating finite energy Airy beams / G.A. Siviloglou, D.N. Christodoulides // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32, Issue 8. – P. 979-981. – DOI: 10.1364/OL.32.000979.
- Dufresne, E.R.** Computer-generated holographic optical tweezer arrays / E.R. Dufresne, G.C. Spalding, M.T. Dearing, S.A. Sheets, D.G. Greer // *Review of Scientific Instruments*. – 2001. – Vol. 72, Issue 3. – P. 1810-1816. – DOI: 10.1063/1.1344176.
- Сойфер, В.А.** Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порожденные дифракционной оптикой / В.А. Сойфер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2004. – Т. 35, № 6. – С. 1368-1432.
- Khonina, S.N.** Generation and selection of laser beams represented by a superposition of two angular harmonics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Turunen // *Journal of Modern Optics*. – 2004. – Vol. 51, Issue 5. – P. 761-773. – DOI: 10.1080/09500340408235551.
- Porfirev, A.P.** Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A.P. Porfirev, S.N. Khonina // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9807. – 98070E. – DOI: 10.1117/12.2231378.
- Golub, M.A.** Laser beam splitting by diffractive optics / M.A. Golub // *Optics and Photonics News*. – 2004. – Vol. 15, Issue 2. – P. 36-41. – DOI: 10.1364/OPN.15.2.000036.
- Zhu, L.** Three-dimensional shape-controllable focal spot array created by focusing vortex beams modulated by multi-value pure-phase grating / L. Zhu, M. Sun, M. Zhu, J. Chen, X. Gao, W. Ma, D. Zhang // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 18. – P. 21354-21367. – DOI: 10.1364/OE.22.021354.

26. **Khonina, S.N.** Generation of Gauss-Hermite modes using binary DOEs / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Lahtanen, M. Honkanen, J.P. Turunen // Proceedings of SPIE. – 1999. – Vol. 4016. – P. 234-239. – DOI: 10.1117/12.373630.
27. **Backus, S.** High power ultrafast lasers / S. Backus, C.G. Durfee, M.M. Murnane, H.C. Kapteyn // Review of Scientific Instruments. – 1998. – Vol. 69, Issue 3. – P. 1207-1223. DOI: 10.1063/1.1148795.

### Сведения об авторах

**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).

**Порфирьев Алексей Петрович**, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладная математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год). Доцент кафедры технической кибернетики Самарского университета, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическое манипулирование. E-mail: [porfirev.alexey@smr.ru](mailto:porfirev.alexey@smr.ru).

**Фомченков Сергей Александрович**, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладная математика и физика». Аспирант кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптические фильтры. E-mail: [s.a.fom@mail.ru](mailto:s.a.fom@mail.ru).

**Ларкин Алексей Станиславович**, аспирант физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: фемтосекундная лазерная плазма, лазерно-плазменное ускорение частиц, лазерная физика, нелинейная оптика. E-mail: [larkin@physics.msu.ru](mailto:larkin@physics.msu.ru).

**Савельев-Трофимов Андрей Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Область научных интересов: взаимодействие сверхсильных световых полей с веществом, ускорение заряженных частиц в лазерной плазме, фемтосекундная нелинейная оптика. E-mail: [abst@physics.msu.ru](mailto:abst@physics.msu.ru).

ГРПТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 15 августа 2017 г. Окончательный вариант – 7 сентября 2017 г.

## GENERATION OF CLOSELY LOCATED LIGHT SPOTS USING SPECULAR AIRY LASER BEAMS

S.N. Khonina<sup>1,2</sup>, A.P. Porfirev<sup>1,2</sup>, S.A. Fomchenkov<sup>1,2</sup>, A.S. Larkin<sup>3</sup>, A.B. Savelyev-Trofimov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of RAS, – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,

<sup>2</sup> Samara National Research University, Samara, Russia,

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

### Abstract

We conduct a comparative numerical study of the formation of closely located light spots in the focal plane of diffraction gratings and binary optical elements matched with Hermite-Gaussian modes and specular Airy beams. It is shown that while gratings allow a set of uniform focal spots to be generated with high accuracy, the resulting pattern quickly deteriorates when displaced from the focal plane. Due to their modal properties, Hermite-Gaussian beams are low-sensitive to defocusing, but produce focal spots different in size and intensity. Specular Airy beams offer a trade-off solution - they produce a more uniform intensity pattern of light spots than the Hermite-Gaussian modes, at the same time showing a lower sensitivity to defocusing. Experiments with a tunable laser have confirmed the above-mentioned advantages of the specular Airy beams in comparison with the Hermite-Gaussian modes, also showing good spectral stability of the manufactured diffraction optics.

**Keywords:** focusing into a set of light spots, diffractive optical element, Hermite-Gaussian modes, specular Airy beams, depth of focus, chromatic dispersion.

**Citation:** Khonina SN, Porfirev AP, Fomchenkov SA, Larkin AS, Savelyev-Trofimov AB. Generation of closely located light spots using specular Airy laser beams. Computer Optics 2017; 41(5): 661-669. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-661-669.

*Acknowledgement:* This work was financially supported by the Russian Scientific Foundation (RSF), grant No. 16-42-01060.

### References

- [1] Malka V, Faure J, Gauduel YA, Lefebvre E, Rousse A, Phuoc KT. Principles and applications of compact laser-plasma accelerators. *Nat Phys* 2008; 4: 447-453. DOI: 10.1038/nphys966.
- [2] Cheng J, Liu C, Shang S, Liu D, Perrie W, Dearden G, Watkins K. A review of ultrafast laser materials micromachining. *Opt Laser Technol* 2013; 46: 88-102. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.06.037.
- [3] Uryupina DS, Ivanov KA, Brantov AV, Savel'ev AB, Bychenkov VYu, Povarnitsyn ME, Volkov RV, Tikhonchuk VT. Femtosecond laser-plasma interaction with prepulse-generated liquid metal microjets. *Physics of Plasmas* 2012; 19(1): 013104. DOI: 10.1063/1.3675871.
- [4] Lar'kin A, Uryupina D, Ivanov K, Savel'ev A, Bonnet T, Gobet F, Hannachi F, Tarisien M, Versteegen M, Spohr K, Breil J, Chimier B, Dorchie F, Fourment C, Leguay P-M, Tikhonchuk VT. Microjet formation and hard x-ray production from a liquid metal target irradiated by intense femtosecond laser pulses. *Physics of Plasmas* 2014; 21(9): 093103. DOI: 10.1063/1.4894099.
- [5] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Tukmakov KN, Moiseev OYu, Shulyapov SA, Ivanov KA, Savel'ev-Trofimov AB. On the possibility of controlling laser ablation by tightly focused femtosecond radiation. *Quantum Electronics* 2014; 44(11): 1061-1065. DOI: 10.1070/QE2014v044n11ABEH015471.
- [6] Hayasaki Y, Sugimoto T, Takita A, Nishida N. Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator. *Appl Phys Lett* 2005; 87(3): 031101. DOI: 10.1063/1.1992668.
- [7] Kuang Z, Perrie W, Leach J, Sharp M, Edwardson SP, Padgett M, Dearden G, Watkins KG. High throughput diffractive multi-beam femtosecond laser processing using a spatial light modulator. *Applied Surface Science* 2008; 255(5-1): 2284-2289. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.07.091.
- [8] Chen Y, Gu J, Wang F, Cai Y. Self-splitting properties of a Hermite-Gaussian correlated Schell-model beam. *Phys Rev A* 2015; 91: 013823. DOI: 10.1103/PhysRevA.91.013823.
- [9] Soifer VA, ed. *Diffractive Nanophotonics*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CISP; 2014. ISBN: 978-1-466590694.
- [10] Kuroiwa Y, Takeshima N, Narita Y, Tanaka S, Hirao K. Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements. *Opt Express* 2004; 12(9): 1908-1915.
- [11] Torres-Peiró S, González-Ausejo J, Mendoza-Yero O, Mínguez-Vega G, Andrés P, Lancis J. Parallel laser micromachining based on diffractive optical elements with dispersion compensated femtosecond pulses. *Opt Express* 2013; 21(26): 31830-31836. DOI: 10.1364/OE.21.031830.
- [12] Khonina SN, Degtyarev SA, Porfirev AP, Moiseev OYu, Poletaev SD, Larkin AS, Savelyev-Trofimov AB. Study of focusing into closely spaced spots via illuminating a diffractive optical element by a short-pulse laser beam [In Russian]. *Computer Optics* 2015; 39(2): 187-196. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-187-196.
- [13] Larkin AS, Pushkarev DV, Degtyarev SA, Khonina SN, Savel'ev AB. Generation of Hermite-Gaussian modes of high-power femtosecond laser radiation using binary-phase diffractive optical elements. *Quantum Electronics* 2016; 46(8): 733-737. DOI: 10.1070/QEL16114.
- [14] Kirk JP, Jones AL. Phase-only complex-valued spatial filters. *J Opt Soc Am* 1971; 61(8): 1023-1028. DOI: 10.1364/JOSA.61.001023.
- [15] Khonina SN, Balalayev S.A., Skidanov RV, Kotlyar VV, Päivänranta B, Turunen J. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams. *J Opt A: Pure Appl Opt* 2009; 11(6): 065702. DOI: 10.1088/1464-4258/11/6/065702.
- [16] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA. Self-reproduction of multimode Hermite-Gaussian beams. *Tech Phys Lett* 1999; 25(6): 489-491. DOI: 10.1134/1.1262525.
- [17] Khonina SN. Specular and vortical Airy beams. *Opt Commun* 2011; 284: 4263-4271. DOI: 10.1016/j.optcom.2011.05.068.
- [18] Banders MA, Gutiérrez-Vega JC. Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical systems. *Opt Express* 2007; 15(25): 16719-16728. DOI: 10.1364/OE.15.016719.
- [19] Siviloglou GA, Christodoulides DN. Accelerating finite energy Airy beams. *Opt Lett* 2007; 32(8): 979-981. DOI: 10.1364/OL.32.000979.
- [20] Dufresne ER, Spalding GC, Dearing MT, Sheets SA, Greer DG. Computer-generated holographic optical tweezer arrays. *Rev Sci Instrum* 2001; 72(3): 1810-1816. DOI: 10.1063/1.1344176.
- [21] Soifer VA, Kotlyar VV, Khonina SN. Optical microparticle manipulation: Advances and new possibilities created by diffractive optics. *Physics of Particles and Nuclei* 2004; 35(6): 733-766.
- [22] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Jefimovs K, Turunen J. Generation and selection of laser beams represented by a superposition of two angular harmonics. *J Mod Opt* 2004; 51(5): 761-773. DOI: 10.1080/09500340408235551.
- [23] Porfirev AP, Khonina SN. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions. *Proc SPIE* 2016; 9807: 98070E. DOI: 10.1117/12.2231378.
- [24] Golub MA. Laser beam splitting by diffractive optics. *Optics & Photonics News* 2004; 15(2): 36-41. DOI: 10.1364/OPN.15.2.000036.
- [25] Zhu L, Sun M, Zhu M, Chen J, Gao X, Ma W, Zhang D. Three-dimensional shape-controllable focal spot array created by focusing vortex beams modulated by multi-value pure-phase grating. *Opt Express* 2014; 22(18): 21354-21367. DOI: 10.1364/OE.22.021354.
- [26] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Lautanen J, Honkanen M, Turunen J. Generation of Gauss-Hermite modes using binary DOEs. *Proc SPIE* 1999; 4016: 234-239. DOI: 10.1117/12.373630.
- [27] Backus S, Durfee CG, Murnane MM, Kapteyn HC. High power ultrafast lasers. *Rev Sci Instrum* 1998; 69(3): 1207-1223. DOI: 10.1063/1.1148795.

### Authors' information

**Svetlana Nikolaevna Khonina**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Re-

search interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru) .

**Alexey Petrovich Porfirev** (b. 1987) graduated (2010) from Samara State Aerospace University, majoring in Applied Physics and Mathematics. Candidate in Physics and Mathematics (2013). Currently he is an associate professor in Technical Cybernetics department of Samara National Research University and a researcher in Micro- and Nanotechnologies laboratory of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. His current research interests include diffractive optics and optical manipulation. E-mail: [porfirev.alexey@smr.ru](mailto:porfirev.alexey@smr.ru) .

**Sergey Alexandrovich Fomchenkov** (b. 1991) graduated (2014) from Samara State Aerospace University, majoring in Applied Physics and Mathematics. Currently he is a post-graduate student in Technical Cybernetics department of Samara National Research University. His current research interests include diffractive optics and optical filters. E-mail: [s.a.fom@mail.ru](mailto:s.a.fom@mail.ru) .

**Alexey Stanislavovich Larkin**, PhD student of Physics faculty of M.V. Lomonosov Moscow State University. Research interests: femtosecond laser plasma, laser-plasma particle acceleration, laser physics, nonlinear optics. E-mail: [larkin@physics.msu.ru](mailto:larkin@physics.msu.ru) .

**Andrey Borisovich Savel'ev-Trofimov**, Doctor of Sciences, Professor of Physics faculty, Lomonosov Moscow State University. Research interests: interaction of superintense light fields with matter, charged particle acceleration in laser plasma, femtosecond non-linear optics. E-mail: [abst@physics.msu.ru](mailto:abst@physics.msu.ru) .

---

*Received August 15, 2017. The final version – September 7, 2017.*

---