

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ В БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫЕ СВЕТОВЫЕ ПЯТНА ПРИ ОСВЕЩЕНИИ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРОТКИМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ

Хонина С.Н.^{1,2}, Дегтярев С.А.^{1,2}, Порфирьев А.П.^{1,2}, Моисеев О.Ю.^{1,2}, Полетаев С.Д.^{1,2},
Ларькин А.С.³, Савельев-Трофимов А.Б.³

¹Институт систем обработки изображений РАН,

²Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ),

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Аннотация

Выполнено сравнительное численное исследование формирования в фокальной плоскости близкорасположенных световых пятен с помощью дифракционной решётки и бинарных оптических элементов, согласованных с модами Эрмита–Гаусса. Показано, что при низких индексах мод обеспечивается хорошее качество формирования световых пятен и относительная устойчивость к хроматической дисперсии. Эксперименты с импульсным и перестраиваемым лазерами показали перспективность использования фазовых оптических элементов, согласованных с модами ТЕМ(1,0) и ТЕМ(1,1), для фокусировки в набор близкорасположенных световых пятен.

Ключевые слова: фокусировка в набор световых пятен, дифракционный оптический элемент, бинарная фаза, короткие лазерные импульсы, хроматическая дисперсия.

Цитирование: Хонина, С.Н. Исследование фокусировки в близкорасположенные световые 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.

Введение

Одним из важнейших достижений лазерных технологий является возможность генерации очень коротких лазерных импульсов, которые нашли широкое применение в обработке материалов, формировании микроструктур, управлении потоком заряженных частиц [1–7].

На данный момент разработано множество методов управления временной формой лазерных импульсов, однако в приложениях, основанных на взаимодействии электромагнитного излучения с веществом, не менее важным является пространственная структура лазерного пучка. Классические элементы (линзы и зеркала) [8, 9] предлагают довольно скромные возможности в управлении пространственной структурой лазерного пучка. Интерференционные схемы [10–12] также позволяют формировать только определённые наборы периодических структур.

Наиболее широкий спектр пространственных преобразований лазерного излучения обеспечивают средства дифракционной оптики [13, 14]. Чаще всего используются дифракционные решётки и пространственные модуляторы света (*spatial light modulator*, SLM) [15–20]. При всех динамических достоинствах пространственные модуляторы проигрывают дифракционным оптическим элементам по эффективности и разрешению.

Однако структура дифракционных элементов такова, что изготовленный микрорельеф является оптимальным для монохроматического излучения. Спектральная дисперсия, сопровождающая короткие лазерные импульсы, приводит к потере качества формируемого пространственного распределения.

Для предотвращения такого эффекта предлагаются различные методы, в частности, использование двух фокусирующих элементов – дифракционного и рефракционного [15] или двух дифракционных элементов – рассеивающего и фокусирующего [21]. Также используются более сложные компенсаторы хроматизма в виде гибридных дифракционно-рефракционных линзовых систем [22, 23].

В то же время в работе [24] было показано, что фазовые дифракционные элементы, согласованные с модами лазерного излучения, довольно устойчивы к отклонению длины волны используемого излучения от оптимальной для изготовленного микрорельефа длины волны.

В данной работе мы сравниваем формирование в фокальной плоскости близкорасположенных световых пятен с помощью дифракционной решётки и дифракционных оптических элементов (ДОО), согласованных с модами Эрмита–Гаусса (ЭГ). При этом особое внимание уделяется влиянию хроматической дисперсии на искажение фокальной картины.

1. Моделирование

В данном разделе на основе численного моделирования исследуется влияние отклонения длины волны излучения от базовой, использованной при расчёте высоты рельефа дифракционной решётки и формирователя мод ЭГ.

На рис. 1 показаны результаты фокусировки ($f=60$ мм) Гауссова лазерного пучка радиусом 8 мм с базовой длиной волны 800 нм, прошедшего бинарную дифракционную решётку, формирующую четыре световых пятна примерно одинаковой интенсивности. Общий случай такой фокусировки рассматривался в работе [25].

На рис. 2 показаны аналогичные результаты при различной длине волны освещающего пучка. Для наглядности соответствующие сечения представлены в фокальной плоскости.

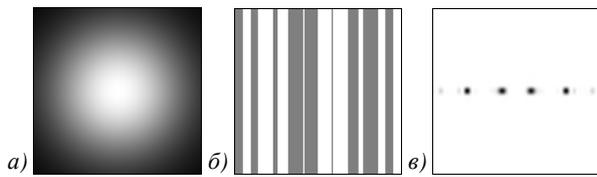


Рис. 1. Формирование четырёх световых пятен с помощью бинарной дифракционной решётки: освещающий пучок (а), бинарная решётка (серый цвет соответствует фазе π -радиан) (б), картина в фокальной плоскости (размер $0,1 \times 0,1$ мм) (негативное изображение) (в)

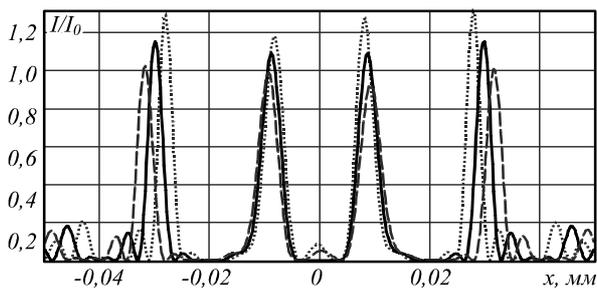


Рис. 2. Формирование четырёх световых пятен с помощью бинарной дифракционной решётки при освещении излучением с различной длиной волны: 750 нм (точечная линия), 800 нм (сплошная линия), 850 нм (пунктирная линия)

Как видно из рис. 2, при отклонении от базовой длины волны меняется не только масштаб формируемой картины, но и происходит некоторое искажение – интенсивность световых пятен становится менее равномерной, а также появляется нулевой дифракционный порядок.

Заметим, что решётка успешно формирует набор световых пятен, если они расположены не слишком близко друг к другу.

Если же задача состоит в формировании фокальных пятен, отстоящих друг от друга на расстояние, сравнимое с их размером, то решётка в этом случае становится очень низкочастотной и фактически вырождается. На рис. 3 показано формирование двух дифракционных порядков (световых пятен) с помощью низкочастотной (рис. 3а,б) и вырожденной решётки (рис. 3в,г). В последнем случае, когда два световых пятна максимально приближены друг к другу, фаза оптического элемента соответствует первой моде лазерного излучения.

Формирование большого числа световых пятен, расположенных наиболее плотно, возможно с помощью фазовых ДОЭ, согласованных с модами ЭГ [26–28].

На рис. 4 показано формирование 4 плотно расположенных световых пятен в различных конфигурациях.

Как видно из рис. 4, если не учитывать амплитудную составляющую моды и использовать для освещения обычный Гауссов пучок, то для мод с высокими индексами искажения становятся существенными (четыре световых пятна в ряду формируются значительно хуже, чем по углам).

Устойчивость модовых структур низкого порядка к эффекту хроматической дисперсии также выше, чем у мод высокого порядка (рис. 5).

Изменение радиуса Гауссова пучка позволяет немного варьировать распределение в фокальной плоскости [28], но для существенной коррекции необходимо внести в фазу оптического элемента дополнительную информацию об амплитудной составляющей. Это можно сделать с помощью методов цифровой голографии [29–31], однако при этом значительная часть падающего излучения отбрасывается за пределы полезной области. Чтобы повысить эффективность оптического элемента, следует воспользоваться методом частичного кодирования [32–34], который позволяет достичь компромисса между точностью формируемого поля и потерей энергии.

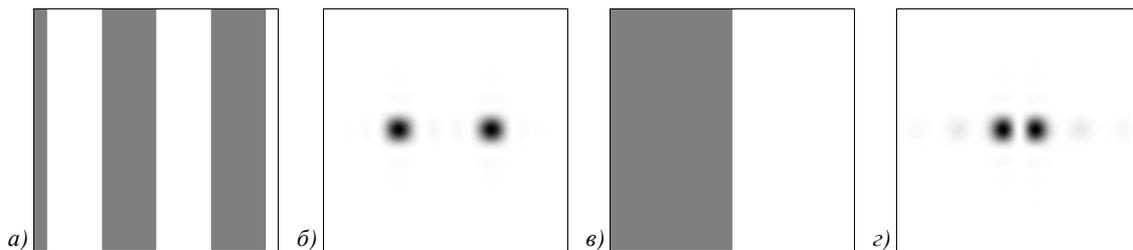


Рис. 3. Формирование двух световых пятен с помощью бинарной дифракционной решётки: низкочастотная бинарная (а), вырожденная решётка (в), соответствующие картины в фокальной плоскости (б, г) (негатив) (размер $0,04 \times 0,04$ мм)

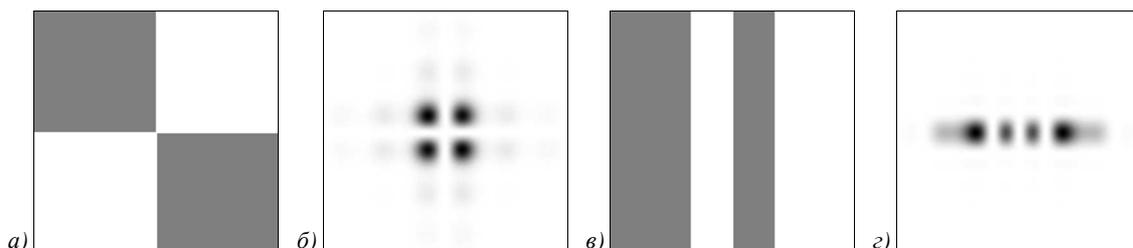


Рис. 4. Формирование четырёх световых пятен с помощью фазовых формирователей мод ЭГ: фаза моды $TEM(1,1)$ (а), фаза моды $TEM(3,0)$ (в), соответствующие картины в фокальной плоскости (б, г) (негатив) (размер $0,04 \times 0,04$ мм)

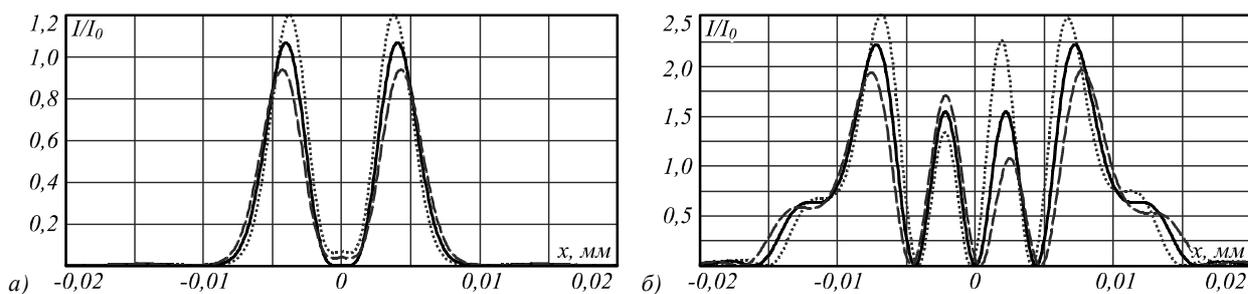


Рис. 5. Влияние хроматической дисперсии на ДОО, согласованный с модой ЭГ ТЕМ(1,1) (а) и модой ЭГ ТЕМ(3,0) (б): 750 нм (точечная линия), 800 нм (сплошная линия), 850 нм (пунктирная линия)

На рис. 6 показано формирование четырёх световых пятен с помощью частично-кодированных фазовых ДОО, согласованных с модой ЭГ ТЕМ(3,0) с различной степенью погрешности и эффективности. При высоком уровне кодирования (0,8) эффективность упала на порядок по сравнению с фазовым элементом, представленным на рис. 4в, а при низком уровне кодирования (0,3) эффективность упала в 5 раз. При этом погрешность формирования моды во втором случае – около 10 %.

К сожалению, кодированные элементы очень чувствительны к хроматической дисперсии (рис. 7), причём увеличение уровня кодирования только усиливает степень искажения при освещении излучением с длиной волны, отличной от базовой.

Заметим также, что масштаб световых пятен, формируемых кодированными ДОО, больше. Это связано с более точным воспроизведением мод Гаусса–Эрмита.

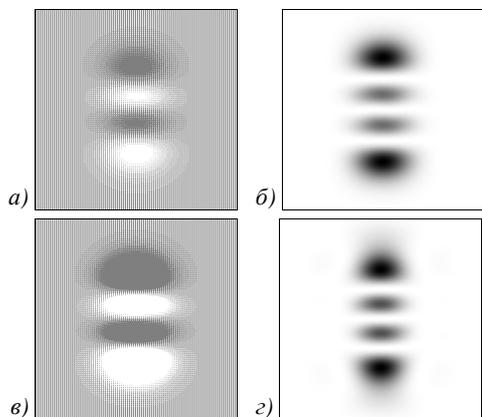


Рис. 6. Формирование четырёх световых пятен с помощью кодированных фазовых формирователей мод Гаусса–Эрмита (3,0): фаза при уровне кодирования 0,8 (а), фаза при уровне кодирования 0,3 (в), соответствующие картины в фокальной плоскости (б, г) (негативное изображение) (размер 0,04×0,04 мм)

2. Экспериментальное исследование влияния хроматической дисперсии на фокальную картину при использовании слабокодированных ДОО

На рис. 8 показаны фазовые функции пропускания ДОО, использованных в описанных далее экспериментах для формирования мод ЭГ ТЕМ(1,0) и ТЕМ(1,1). С учётом приведённых в первом разделе исследований, при расчёте фазы использовался очень низкий уровень кодирования (0,02) лишь с целью уб-

рать влияние излучения, выходящего за пределы апертуры.

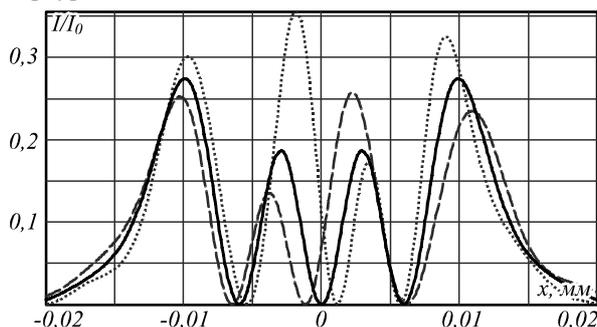


Рис. 7. Влияние хроматической дисперсии на ДОО, согласованный с модой ЭГ (3,0) с уровнем кодирования 0,3: 750 нм (точечная линия), 800 нм (сплошная линия), 850 нм (пунктирная линия)

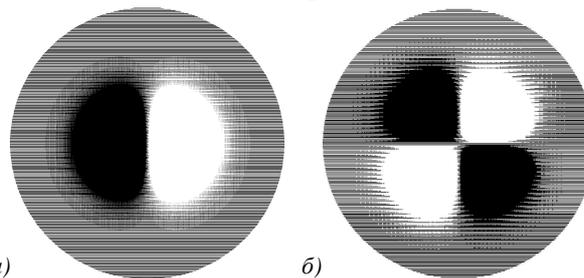


Рис. 8. Фазовые функции слабокодированных ДОО, формирующих моды ЭГ ТЕМ(1,0) (а) и ТЕМ(1,1) (б)

Данный элемент был изготовлен методом фотолитографии (разрешение записи шаблона – 10 мкм, глубина травления – 920 нм). Исходя из значения глубины травления и значения показателя преломления кварцевого стекла ($n = 1,46$), оптимальная длина волны для формирования нужного распределения светового поля составляет примерно 846 нм.

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 9.

Для генерации излучения заданной длины волны был использован перестраиваемый лазер с диодной накачкой NT200 фирмы EKSPILA. Светофильтр F был использован для ослабления выходного пучка лазера. Система из микрообъектива MO (40×, NA = 0,6), линзы L₁ ($f_1 = 150$ мм) и пинхола PH (размер отверстия – 40 мкм) была использована для повышения качества лазерного пучка за счёт осуществления высокочастотной пространственной фильтрации. Также это позволяло произвести расширение пучка, для того чтобы он полностью перекрывал ДОО. Расширенный пучок с

помощью поворотной призмы RP и зеркала M направлялся на ДОО (DOE). Система линз L_2 ($f_2 = 350$ мм) и L_3 ($f_3 = 100$ мм) была использована для построения в плоскости линзы L_4 ($f_4 = 60$ мм) изображения плоскости, сопряжённой с плоскостью ДОО. Для записи распределений интенсивности в плоскости, сопряжённой с плоскостью ДОО, и в фокусе линзы L_4 были использованы CMOS-камеры MDCE-5A (1/2", разрешение – 1280×1024 пикселей) Cam₁ и Cam₂. Микрообъектив MO₂ (40×, NA=0,6) был использован для построения на матрице камеры Cam₁ распределения интенсивности, сформированного в фокусе линзы L_4 .

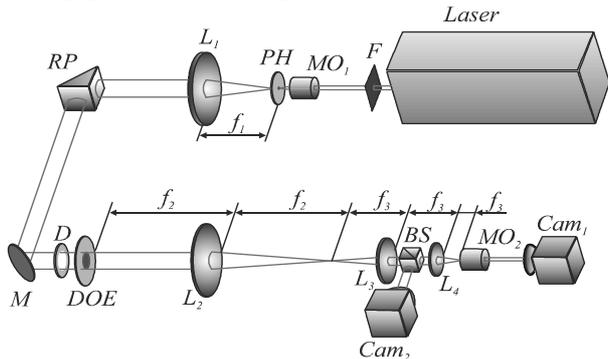


Рис. 9. Оптическая схема эксперимента: Laser – лазер с перестраиваемой длиной волны EKSPLA NT200, F – светофильтр, MO₁ – микрообъектив (40×, NA = 0,6), PH – пинхол (40 мкм), L₁, L₂, L₃, L₄ – линзы с фокусными расстояниями $f_1 = 150$ мм, $f_2 = 250$ мм, $f_3 = 100$ мм, $f_4 = 60$ мм, D – диафрагма, DOE – ДОО, BS – делитель пучка, RP – поворотная призма, M – зеркало, MO₂ – микрообъектив (40×, NA = 0,6), Cam₁, Cam₂ – CMOS-камеры MDCE-5A (1280×1024)

Была проведена серия экспериментов, направленных на исследование влияния длины волны на распределение светового поля, формируемого в фокусе линзы L_4 . В этой серии экспериментов был использован ДОО, формирующий моду ЭГ TEM (1,0). Для этого производилось изменение длины волны выходного лазерного излучения и съёмка распределений интенсивности с помощью камеры Cam₁. Диаметр ДОО равен 15 мм. Такой диаметр изготовленных ДОО был необходим для их дальнейшего использования в экспериментах с импульсным лазером, описанных в следующем разделе. При этом размер освещающего пучка совпадал с размером ДОО. Результаты экспериментов представлены на рис. 10.

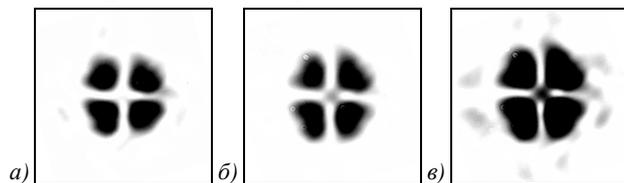


Рис. 10. Экспериментально сформированные распределения интенсивности (негативное изображение, размер изображений – 1,5×1,5 мм) для моды TEM(1,1) в фокусе линзы L_4 для излучения с длиной волны: 846 нм (а); 906 нм (б); 946 нм (в)

Видно, что распределения, формируемые при различных длинах волн, качественно совпадают, что было

обосновано в работе [24]. Отметим, что в случае использования излучения различных длин волн полученные распределения интенсивности из-за дисперсии света формировались на различных расстояниях от плоскости линзы L_4 .

Также была проведена серия экспериментов, направленных на исследование влияния несоответствия размеров освещающего пучка и размеров ДОО при разных длинах волн. Для изменения радиуса пучка была использована диафрагма D. В этих экспериментах производилась не только съёмка распределений интенсивности, формируемых в фокусе линзы L_4 , но также и распределений интенсивности в плоскости, сопряжённой с плоскостью ДОО, с помощью камеры Cam₂. Благодаря этому производился контроль соответствия размеров освещающего пучка и ДОО. Результаты экспериментов представлены на рис. 11.

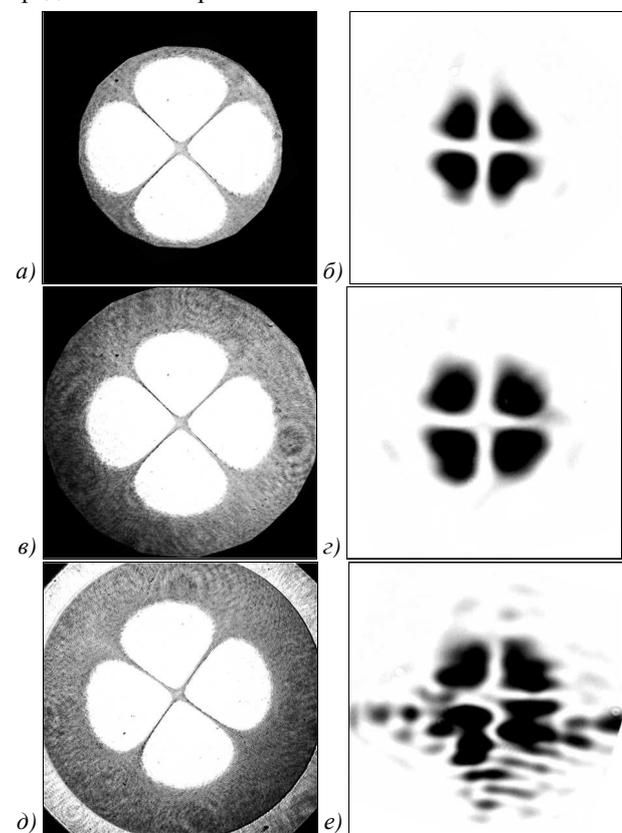


Рис. 11. Изображение плоскости, сопряжённой с плоскостью ДОО, формирующего моду ЭГ TEM(1,1) (левая колонка, размер изображений – 5×5 мм) и экспериментально сформированные распределения интенсивности (правая колонка, негатив, размер изображений – 1,5×1,5 мм) в фокусе линзы L_4 для излучения с длиной волны 846 нм для различных случаев несоответствия размеров освещающего пучка и ДОО

В тех случаях, когда ДОО освещался полностью и когда освещалась только центральная часть элемента, удавалось добиться формирования распределения, соответствующего моде ЭГ TEM(1,1). В случае, когда размер пучка оказывался больше размера ДОО, происходило искажение формируемого распределения. Это происходило из-за фокусировки той части освещающего пучка, которая распространялась мимо ДОО. Именно

для того, чтобы уменьшить влияние этого фактора, было использовано кодирование фазы на низком уровне.

В третьей серии экспериментов было проведено исследование влияния несоосности освещающего пучка и ДОЭ на формируемую в фокальной плоскости картину. В этом случае радиус освещающего пучка был чуть меньше радиуса ДОЭ. Распределения интенсивности, полученные при различных случаях неравномерности засветки ДОЭ, показаны на рис. 12. На рис. 12а видно, что ДОЭ освещается неравномерно: одна из частей картинке ярче другой. Из полученных распределений интенсивности видно, что несоосность освещающего пучка и ДОЭ искажает формируемые распределения интенсивности сильнее, чем в случае несоответствия размеров пучка и ДОЭ: в центре картины появляется световой пик, который не должен формироваться при фокусировке моды ЭГ ТЕМ(1,1).

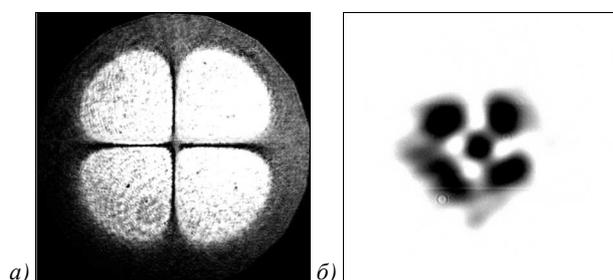


Рис. 12. Изображение плоскости, сопряжённой с плоскостью ДОЭ, формирующей моду ЭГ ТЕМ(1,1) (а) (размер изображения – 4,3×4,3 мм), и экспериментально сформированное распределение интенсивности (б) (негатив, размер изображения – 1,5×1,5 мм) в фокусе линзы L_4 для излучения с длиной волны 846 нм в случае несоосности освещающего пучка и ДОЭ

3. Изучение формирования мод Эрмита–Гаусса при использовании фемтосекундного лазерного излучения

В экспериментах в качестве источника лазерного излучения использовалась фемтосекундная лазерная система МЛЦ МГУ на кристалле Ti:Sa (длина волны – 800 нм, длительность импульса – 50 фс, энергия импульса – до 100 мДж, частота повторения – 10 Гц, контраст на наносекундном масштабе – 5×10^{-8}) [35]. В данных экспериментах энергия импульса не превышала 1 мДж. Диаметр исходного пучка составлял ~7 мм. Параметр качества пучка M^2 составлял ~1,2. На рис. 13 приведена принципиальная схема эксперимента.

В ходе эксперимента прозрачная фазовая пластина из плавного кварца 1 (толщиной 3 мм) устанавливалась в пучок либо после компрессора 2 (для формирования моды использовался фемтосекундный импульс), либо перед компрессором (сформированная мода проходила через компрессор). Последний способ установки пластины позволяет заведомо избежать эффекта фазовой самомодуляции при прохождении излучения через кварцевую пластину, поскольку длительность несжатого импульса составляет сотни пикосекунд. Затем излучение фокусировалось линзой 3 с фокусным расстоянием $f = 4,7$ м. Изображение распределения плотности энергии пучка вблизи фокуса

линзы регистрировалось с помощью ПЗС-камеры 5 (размер пикселя – 8,3 мкм), использовавшейся вместе с нейтральными светофильтрами 4. Имеющиеся ДОЭ позволяли исследовать формирование мод ЭГ ТЕМ(1,0) и ТЕМ(1,1). Фазовые функции элементов представлены на рис. 8.

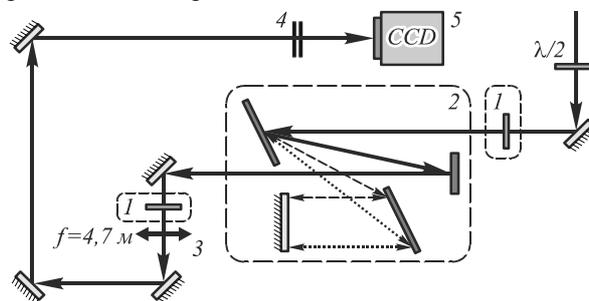


Рис. 13. Схема эксперимента: 1 – фазовая пластина, 2 – решёточный компрессор, 3 – собирающая линза ($f = 4,7$ м), 4 – нейтральные светофильтры, 5 – ПЗС-камера

На рис. 14 приведено полученное изображение распределения плотности энергии в фокусе линзы для основного излучения ТЕМ(0,0) (без внесения в пучок фазовой пластины), а также на расстоянии 10 см перед (« $f-10$ см») и за фокусом линзы (« $f+10$ см»). Распределение энергии в фокусе линзы имеет Гауссов профиль с диаметром 275 мкм по уровню 1/2 (FWHM). Площадь пятна по уровню 1/2 составляет ~10% от площади апертуры и содержит ~40% полной энергии пучка. Эллиптичность пучка вне фокуса линзы связана главным образом с аберрацией, вносимой линзой.

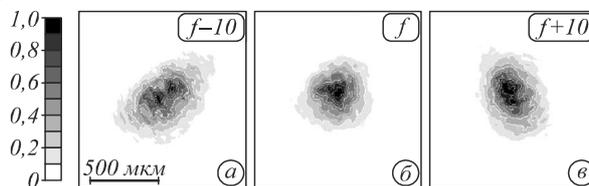


Рис. 14. Распределение плотности энергии исходного импульса в фокусе линзы (« f ») и на расстоянии 10 см перед фокусом (« $f-10$ ») и за фокусом (« $f+10$ ») линзы

На рис. 15 приведены изображения распределения плотности энергии в фокусе линзы, полученные для мод ЭГ ТЕМ(1,0) и ТЕМ(1,1) в двух случаях: когда фазовая пластина находилась после компрессора и перед ним. Очевидно, что формирующаяся мода качественно остаётся одинаковой в обоих случаях. Оценённая доля энергии исходного пучка, переданная моде и зарегистрированная в апертуре $1,25 \times 1,25$ мм для моды ЭГ ТЕМ(1,0) составила ~90% в обоих случаях (когда фазовая пластина находилась после компрессора и перед ним). Для моды ЭГ ТЕМ(1,1) аналогичное значение доли энергии, зарегистрированной в апертуре $1,66 \times 1,66$ мм, также составило ~90%. Плотность энергии (при полной энергии пучка 1 мДж) по уровню 1/2 для исходного пучка (ТЕМ(0,0)) составляет $0,8$ Дж/см², для моды ЭГ ТЕМ(1,0) – около $0,3$ Дж/см², а для моды ТЕМ(1,1) – около $0,2$ Дж/см² (независимо от положения пластины относительно компрессора).

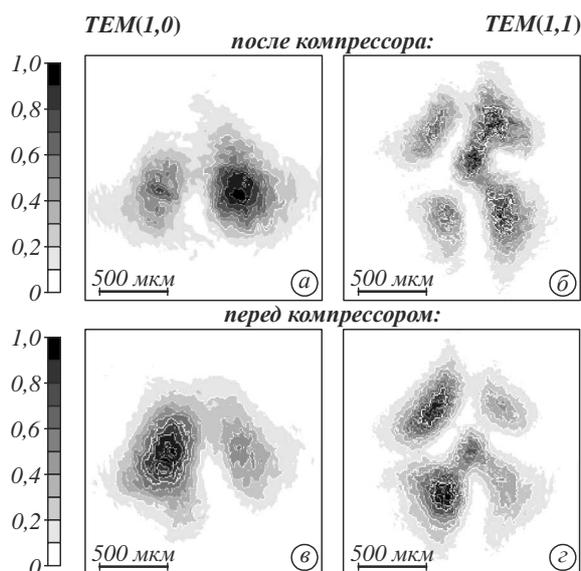


Рис. 15. Измеренное распределение энергии в модах Гаусса–Эрмита $TEM(1,0)$ (а, в) и $TEM(1,1)$ (б, г) в случае, когда фазовая пластина располагалась после компрессора (а, б) и перед компрессором (в, г). Размер апертуры для моды $TEM(1,0)$ составляет $1,25 \times 1,25$ мм, для моды $TEM(1,1)$ – $1,66 \times 1,66$ мм

Таким образом, как видно из полученных результатов, экспериментально была установлена возможность формирования мод Гаусса–Эрмита как проходящим фемтосекундным импульсом с небольшой энергией (≤ 1 мДж), так и несжатым (пикосекундным, чирпированным) импульсом с последующим сжатием в решёточном компрессоре. Это делает возможным использование фазовых ДОЭ, например, для управления формированием микроструй над поверхностью мишени из расплава металла под действием лазерного предимпульса [36, 37].

Заключение

Проведено численное исследование фокусировки в набор близкорасположенных световых пятен и показано, что период дифракционной решётки в этом случае становится очень малым и фаза фактически соответствует модам Эрмита–Гаусса.

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 как к снижению дифракционной эффективности, так и к большим искажениям при хроматической дисперсии.

Проведены экспериментальные исследования как с перестраиваемым, так и с импульсным лазером для фазовых ДОЭ, согласованных с модами ЭГ $TEM(1,0)$ и $TEM(1,1)$, продемонстрировавшие перспективность использования таких оптических элементов для фокусировки в набор близкорасположенных световых пятен.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, а также Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 12-02-01161, 13-07-00266, 14-32-50355-мол_нр).

Литература

1. **Umstadter, D.** Relativistic laser-plasma interactions / D. Umstadter // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2003. – Vol. 36(8). – P. R151-R165.
2. **Sun, H.-B.** Two-photon photopolymerization and 3D lithographic microfabrication / H.-B. Sun, S. Kawata // *Advances in Polymer Science*. – 2004. – Vol. 170. – P. 169-273.
3. **Salamin, Y.I.** Relativistic high-power laser–matter interactions / Y.I. Salamin, S.X. Hu, K.Z. Hatsagortsyan, C.H. Keitel // *Physics Reports*. – 2006. – Vol. 427(2-3). – P. 41-155.
4. **Malka, V.** Principles and applications of compact laser-plasma accelerators / V. Malka, J. Faure, Y.A. Gauduel, E. Lefebvre, A. Rousseau, K.T. Phuoc // *Nature Physics*. – 2008. – Vol. 4. – P. 447-453.
5. **Cheng, J.** A review of ultrafast laser materials micro-machining / J. Cheng, C. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden and K. Watkins // *Optics and Laser Technology*. – 2013. – Vol. 46. – P. 88-102.
6. **Андреев, А.В.** Ядерные процессы в высокотемпературной плазме, индуцируемой сверхкоротким лазерным импульсом / А.В. Андреев, В.М. Гордиенко, А.Б. Савельев // *Квантовая электроника*. – 2001. – Т. 31, № 11. – С. 941-956.
7. **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. – № 11. – С. 1061-1065.
8. **Kato, N.** Multiple-spot parallel processing for laser micromanufacturing / N. Kato, N. Takeyasu, Y. Adachi, H.-B. Sun and S. Kawata // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 86(4). – P. 044102-044104.
9. **Salter, P.S.** Addressable microlens array for parallel laser microfabrication / P.S. Salter and M.J. Booth // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36(12). – P. 2302-2304.
10. **Shoji, S.** Photofabrication of three-dimensional photonic crystals by multibeam laser interference into a photopolymerizable resin / S. Shoji and S. Kawata // *Applied Physics Letters*. – 2000. – Vol. 76(19). – P. 2668-2670.
11. **Kondo, T.** Multiphoton fabrication of periodic structures by multibeam interference of femtosecond pulses / T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis, V. Mizeikis and H. Misawa // *Applied Physics Letters*. – 2003. – Vol. 82(17). – P. 2758-2760.
12. **Dong, X.-Z.** Micromanufacturing of assembled three-dimensional microstructures by designable multiple beams multiphoton processing / X.-Z. Dong, Z.-S. Zhao and X.-M. Duan // *Applied Physics Letters*. – 2007. – Vol. 91(12). – P. 124103.
13. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
14. Дифракционная нанофотоника / А.В. Гаврилов, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, П.Н. Дьяченко, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, Д.В. Нестеренко, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина, Я.О. Шуюпова; под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2011. – 680 с.

15. **Kuroiwa, Y.** Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements / Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka and K. Hirao // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12(9). – P. 1908-1915.
16. **Hayasaki, Y.** Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator / Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita and N. Nishida // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 87(3). – P. 031101.
17. **Kelemen, L.** Parallel photopolymerisation with complex light patterns generated by diffractive optical elements / L. Kelemen, S. Valkai and P. Ormos // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15(22). – P. 14488-14497.
18. **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 and K.G. Watkins // *Applied Surface Science*. – 2008. – Vol. 255(5). – P. 2284-2289.
19. **Kuang, Z.** Fast parallel diffractive multi-beam femtosecond laser surface micro-structuring / Z. Kuang, D. Liu, W. Perrie, S. Edwardson, M. Sharp, E. Fearon, G. Dearden and K. Watkins // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255(13-14). – P. 6582-9588.
20. **Obata, K.** Multi-focus two-photon polymerization technique based on individually controlled phase modulation / K. Obata, J. Koch, U. Hinze and B.N. Chichkov // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18(16). – P. 17193-17200.
21. **Amako, J.** Chromatic-distortion compensation in splitting and focusing of femtosecond pulses by use of a pair of diffractive optical elements / J. Amako, K. Nagasaka and N. Kazuhiro // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27(11). – P. 969-971.
22. **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 and J. Lancis // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(26). – P. 31830-31836.
23. **Zapata-Rodríguez, C.J.** Isotropic compensation of diffraction-driven angular dispersion / C.J. Zapata-Rodríguez and M.T. Caballero // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32(17). – P. 2472-2474.
24. **Карпеев, С.В.** Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / С.В. Карпеев, С.В. Алфёров, С.Н. Хонина, С.И. Кудряшов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 689-694.
25. **Berezny, A.E.** Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E. Berezny, S.V. Karpeev, G.V. Uspleniev // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 331-340.
26. **Хонина, С.Н.** Формирование мод Гаусса–Эрмита с помощью бинарных ДОЭ. I. Моделирование и эксперимент / С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Сойфер, М. Хонканен, Я. Турунен // *Компьютерная оптика*. – 1998. – № 18. – С. 24-28.
27. **Khonina, S.N.** Generation of Gauss-Hermite modes using binary DOEs / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Lautanen, M. Honkanen, J. Turunen // *Proceedings of SPIE*. – 1999. – Vol. 4016. – P. 234-239.
28. **Хонина, С.Н.** Формирование мод Гаусса–Эрмита с помощью бинарных ДОЭ. II. Оптимизация апертурной функции / С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 1998. – № 18. – С. 28-36.
29. **Kirk, J.P.** Phase-only complex-valued spatial filters / J.P. Kirk and A.L. Jones // *Journal of the Optical Society of America*. – 1971. – Vol. 61(8). – P. 1023-1028.
30. **Haskell, R.E.** New coding technique for computer-generated holograms / R.E. Haskell and B.C. Culver // *Applied Optics*. – 1972. – Vol. 11(11). – P. 2712-2714.
31. **Chu, D.C.** Recent approach to computer-generated holograms / D.C. Chu and J.R. Fienup // *Optical Engineering*. – 1974. – Vol. 13(3). – P. 189-195.
32. **Котляр, В.В.** Метод частичного кодирования для расчета фазовых формирователей мод Гаусса–Эрмита / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, В.А. Сойфер // *Автометрия*. – 1999. – № 6. – С. 74-83.
33. **Kotlyar, V.V.** Fractional encoding method for spatial filters computation / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.S. Melekhin, V.A. Soifer // *Asian Journal of Physics*. – 1999. – Vol. 8(3). – P. 273-286.
34. **Khonina, S.N.** Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayev, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Paivanranta, J. Turunen // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2009. – Vol. 11(6). – P. 065702.
35. **Ivanov, K.** Acceleration of heavy multicharged ions in the interaction of a subrelativistic femtosecond laser pulse with a melted metal surface / K. Ivanov, D. Uryupina, N. Morshedian, R. Volkov and A. Savel'ev // *Plasma Physics Reports*. – 2010. – Vol. 36(2). – P. 99-104.
36. **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. – P. 013104(1-8).
37. **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 and V.T. Tikhonchuk // *Physics of Plasmas*. – 2014. – Vol. 21. – P. 093103(1-7).

References

1. **Umstadter, D.** Relativistic laser-plasma interactions / D. Umstadter // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2003. – Vol. 36(8). – P. R151-R165.
2. **Sun, H.-B.** Two-photon photopolymerization and 3D lithographic microfabrication / H.-B. Sun, S. Kawata // *Advances in Polymer Science*. – 2004. – Vol. 170. – P. 169-273.
3. **Salamin, Y.I.** Relativistic high-power laser-matter interactions / Y.I. Salamin, S.X. Hu, K.Z. Hatsagortsyan, C.H. Keitel // *Physics Reports*. – 2006. – Vol. 427(2-3). – P. 41-155.
4. **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.
5. **Cheng, J.** A review of ultrafast laser materials micromachining / J. Cheng, C. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden and K. Watkins // *Optics and Laser Technology*. – 2013. – Vol. 46. – P. 88-102.
6. **Andreev, A.V.** Nuclear processes in a high-temperature plasma produced by an ultrashort laser pulse / A.V. Andreev, V.M. Gordienko, A.B. Savel'ev // *Quantum Electronics*. – 2001. – Vol. 31(11). – P. 941-956.
7. **Alferov, S.V.** On the possibility of controlling laser ablation by tightly focused femtosecond radiation / S.V. Alferov, S.V. Karpeev, S.N. Khonina, K.N. Tukmakov, O.Yu. Moiseev, S.A. Shulyapov, K.A. Ivanov, A.B. Savel'ev-Trofimov // *Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 11. – P. 1061-1065.

8. **Kato, N.** Multiple-spot parallel processing for laser micromanofabrication / N. Kato, N. Takeyasu, Y. Adachi, H.-B. Sun and S. Kawata // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 86(4). – P. 044102-044104.
9. **Salter, P.S.** Addressable microlens array for parallel laser microfabrication / P.S. Salter and M.J. Booth // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36(12). – P. 2302-2304.
10. **Shoji, S.** Photofabrication of three-dimensional photonic crystals by multibeam laser interference into a photopolymerizable resin / S. Shoji and S. Kawata // *Applied Physics Letters*. – 2000. – Vol. 76(19). – P. 2668-2670.
11. **Kondo, T.** Multiphoton fabrication of periodic structures by multibeam interference of femtosecond pulses / T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis, V. Mizeikis and H. Misawa // *Applied Physics Letters*. – 2003. – Vol. 82(17). – P. 2758-2760.
12. **Dong, X.-Z.** Micromanofabrication of assembled three-dimensional microstructures by designable multiple beams multiphoton processing / X.-Z. Dong, Z.-S. Zhao and X.-M. Duan // *Applied Physics Letters*. – 2007. – Vol. 91(12). – P. 124103.
13. **Computer Design of Diffractive Optics** / D.L. Golovashkin, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov; ed. by V.A. Soifer. – Cambridge International Science Publishing Limited & Woodhead Publishing Limited, 2012. – 896 p.
14. **Diffractive Nanophotonics** / A.V. Gavrilov, D.L. Golovashkin, L.L. Doskolovich, P.N. Dyachenko, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov, D.V. Nesterenko, V.S. Pavelyev, Y.O. Shuyupova, R.V. Skidanov, V.A. Soifer; ed. by V.A. Soifer. – CRC Press, Taylor&Francis Group, CISP, Boca Raton, 2014. – 679 p.
15. **Kuroiwa, Y.** Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements / Y. Kuroiwa, N. Takeshima, Y. Narita, S. Tanaka and K. Hirao // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12(9). – P. 1908-1915.
16. **Hayasaki, Y.** Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator / Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita and N. Nishida // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 87(3). – P. 031101.
17. **Kelemen, L.** Parallel photopolymerisation with complex light patterns generated by diffractive optical elements / L. Kelemen, S. Valkai and P. Ormos // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15(22). – P. 14488-14497.
18. **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 and K.G. Watkins // *Applied Surface Science*. – 2008. – Vol. 255(5). – P. 2284-2289.
19. **Kuang, Z.** Fast parallel diffractive multi-beam femtosecond laser surface micro-structuring / Z. Kuang, D. Liu, W. Perrie, S. Edwardson, M. Sharp, E. Fearon, G. Dearden and K. Watkins // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255(13-14). – P. 6582-9588.
20. **Obata, K.** Multi-focus two-photon polymerization technique based on individually controlled phase modulation / K. Obata, J. Koch, U. Hinze and B.N. Chichkov // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18(16). – P. 17193-17200.
21. **Amako, J.** Chromatic-distortion compensation in splitting and focusing of femtosecond pulses by use of a pair of diffractive optical elements / J. Amako, K. Nagasaka and N. Kazuhiro // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27(11). – P. 969-971.
22. **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 and J. Lancis // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(26). – P. 31830-31836.
23. **Zapata-Rodríguez, C.J.** Isotropic compensation of diffraction-driven angular dispersion / C.J. Zapata-Rodríguez and M.T. Caballero // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32(17). – P. 2472-2474.
24. **Karpeev, S.V.** Study of the broadband radiation intensity distribution formed by diffractive optical elements / S.V. Karpeev, S.V. Alferov, S.N. Khonina, S.I. Kudryashov // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(4). – P. 689-694.
25. **Berezny, A.E.** Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E. Berezny, S.V. Karpeev, G.V. Uspleniev // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 331-340.
26. **Khonina, S.N.** Formation of Gaussian-Hermite modes using binary DOEs. I. Modeling and experiments / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Turunen // *Computer Optics*. – 1998. – Vol. 18. – P. 24-28.
27. **Khonina, S.N.** Generation of Gauss-Hermite modes using binary DOEs / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Lautanen, M. Honkanen, J. Turunen // *Proceedings of SPIE*. – 1999. – Vol. 4016. – P. 234-239.
28. **Khonina, S.N.** Formation of Gaussian-Hermite modes using binary DOEs. II. Optimization of the aperture function / S.N. Khonina // *Computer Optics*. – 1998. – Vol. 18. – P. 28-36.
29. **Kirk, J.P.** Phase-only complex-valued spatial filters / J.P. Kirk and A.L. Jones // *Journal of the Optical Society of America*. – 1971. – Vol. 61(8). – P. 1023-1028.
30. **Haskell, R.E.** New coding technique for computer-generated holograms / R.E. Haskell and B.C. Culver // *Applied Optics*. – 1972. – Vol. 11(11). – P. 2712-2714.
31. **Chu, D.C.** Recent approach to computer-generated holograms / D.C. Chu and J.R. Fienup // *Optical Engineering*. – 1974. – Vol. 13(3). – P. 189-195.
32. **Kotlyar, V.V.** A partial encoding technique to design phase shapers for generating Hermite-Gaussian modes / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Avtometriya*. – 1999. – Vol. 6. – P. 74-83.
33. **Kotlyar, V.V.** Fractional encoding method for spatial filters computation / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.S. Melekhin, V.A. Soifer // *Asian Journal of Physics*. – 1999. – Vol. 8(3). – P. 273-286.
34. **Khonina, S.N.** Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayev, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Paivanranta, J. Turunen // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2009. – Vol. 11(6). – P. 065702.
35. **Ivanov, K.** Acceleration of heavy multicharged ions in the interaction of a subrelativistic femtosecond laser pulse with a melted metal surface / K. Ivanov, D. Uryupina, N. Morshedjan, R. Volkov and A. Savel'ev // *Plasma Physics Reports*. – 2010. – Vol. 36(2). – P. 99-104.
36. **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. – P. 013104(1-8).
37. **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. Dorchie, C. Fourment, P.-M. Leguay and V.T. Tikhonchuk // *Physics of Plasmas*. – 2014. – Vol. 21. – P. 093103(1-7).

STUDY OF FOCUSING INTO CLOSELY SPACED SPOTS VIA ILLUMINATING A DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT BY A SHORT-PULSE LASER BEAM

S.N. Khonina^{1,2}, S.A. Degtyarev^{1,2}, A.P. Porfirev^{1,2}, O.Yu. Moiseev^{1,2}, S.D. Poletaev^{1,2},
A.S. Larkin³, A.B. Savelyev-Trofimov³

¹Image Processing Systems Institute,

Russian Academy of Sciences,

²Samara State Aerospace University,

³Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Abstract

We perform a comparative numerical study of the formation of closely spaced focal spots in the focal plane with diffraction gratings and binary optical elements matched with the Hermite-Gaussian modes. It is shown that low-index modes provide the generation of good-quality focal spots and relative tolerance to chromatic dispersion. Experiments with pulsed and tunable lasers have shown that phase optical elements matched with TEM(1,0) and TEM(1,1) modes show promise for creation of arrays of closely spaced focal spots.

Keywords: focusing into focal spot arrays, diffractive optical element, binary phase, short laser pulses, chromatic dispersion.

Citation: Khonina SN, Degtyarev SA, Porfirev AP, Moiseev OYu, Poletaev SD, Larkin AS, and Savelyev-Trofimov AB. Study of focusing into closely spaced spots at illuminating diffractive optical element by short pulse laser beam. *Computer Optics* 2015; 39(2): 187-4.

Сведения об авторах

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений.

E-mail: khonina@smr.ru.

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (National Research University). Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.

Дегтярев Сергей Александрович, аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), стажёр-исследователь Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная и сингулярная оптика.

E-mail: sealek@gmail.com.

Sergei Alexandrovich Degtyarev, post-graduate student, trainee-researcher of the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Research interests: diffractive and singular optics.

Сведения об авторе **Порфирьев Алексей Петрович** – см. стр. 180 этого номера.

Моисеев Олег Юрьевич, 1959 года рождения, в 1982 г. окончил 5-й факультет Куйбышевского авиационного института. В 2000 г. защитил кандидатскую диссертацию. На данный момент занимает должность старшего научного сотрудника Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: технологические процессы создания микроструктур дифракционной оптики.

E-mail: moiseev@smr.ru.

Oleg Yurevich Moiseev, Candidate of Technical Sciences; senior staff scientist of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: technological process of diffractive optics.

Поletaев Сергей Дмитриевич, 1985 года рождения, окончил СГАУ по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», работает инженером в СГАУ, аспирант кафедры наноинженерии, стажёр-исследователь ИСОИ РАН. Область научных интересов: технология создания дифракционных оптических элементов.

E-mail: sergpolet@gmail.com.

Sergey Dmitriyevich Poletayev, the 1985th year of birth, graduated from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (National Research University) (SSAU) in the specialty «Design and Technology of Radio-electronic Means», postgraduate student of Nanoengineering department, works as an engineer in SSAU, probationer-researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: creation technology of diffraction optical elements.

Ларькин 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.

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.

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.

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

*Поступила в редакцию 6 марта 2015 г.
Окончательный вариант – 8 апреля 2015 г.*