

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИНАРНЫХ ФОКУСАТОРОВ ДЛЯ МОЩНОГО ND-YAG ЛАЗЕРА

А.В. Волков, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, Г.В. Успенъев, А. Занелли*)

Институт систем обработки изображений РАН,

*) Fiat Research Center, Italy

1. Введение

Рассматривается задача создания и исследования дифракционных оптических элементов (ДОЭ), предназначенных для преобразования лазерного пучка в пятно сложной геометрической формы [1]. Имеется в виду геометрическая форма пятна, отличающаяся от «точки». Такая конфигурация фокальной области может быть получена на основе применения сложных оптических схем или с помощью специальным образом рассчитанных ДОЭ – фокусаторов лазерного излучения [1,2]. Для краткости требуемое пятно в фокусе будем называть фигурой. Каждая фигура должна иметь строго определенное распределение интенсивности вдоль линии или внутри области фокусировки, т.е. можно говорить о статичном управлении лазерным излучением с помощью фокусаторов.

Работа состояла из трех этапов. На первом этапе были проведены экспериментальные исследования для проверки возможностей лазерной сварки с использованием "неточечной" фокальной области. Для формирования неточечной области фокусировки использовались классические оптические элементы: призмы и цилиндрические линзы. С помощью классических оптических устройств удается сформировать две геометрические фигуры: кольцо и две отстоящие друг от друга точки. Были проведены серии экспериментов по одномоментной лазерной сварке и сделаны заключения об удовлетворении минимальным требованиям нормативов точечной сварки.

На втором этапе были изготовлены и исследованы дифракционные оптические элементы – фокусаторы в кольцо и две точки для маломощного источника лазерного излучения с рабочей длиной волны 1,06 мкм [3]. Целью второго этапа был анализ

возможностей создания альтернативной системы лазерной сварки на основе ДОЭ. Фокусаторы были выполнены по технологии фотолитографии в стеклянной подложке [3] и поэтому не могли выдерживать большие мощности излучения, необходимые для сварки. Тогда же были отработаны технологические приемы изготовления фокусаторов с использованием плазмохимического травления [4] и проанализированы их основные недостатки, связанные с потерей энергии в фокальном пятне вследствие технологических погрешностей, присущих трудоемкому процессу изготовления многоуровневых ДОЭ.

На третьем этапе, описанию которого посвящена настоящая работа, были изготовлены и детально исследованы три уникальных бинарных ДОЭ, предназначенных для фокусировки: а) в "уширенное" кольцо; б) две "жирные" касающиеся друг друга точки; в) тонкий прямоугольный штрих ("отрезок"). ДОЭ рассчитывались таким образом, чтобы работать на основе одновременного использования формируемого ими первого и минус первого порядков дифракции, замкнутых в непрерывную фигуру с помощью обычной фокусирующей линзы [1, 5]. Бинарные фокусаторы были выполнены в субстрате искусственного кварца, способного выдерживать мощности лазерного излучения вплоть до 10 кВт. Методика расчета таких бинарных ДОЭ [1, 5] предсказывает энергетическую эффективность фокусировки около 81% относительно эффективности идеального фокусатора, которая может быть оценена в 90%.

2. Изготовление бинарных фокусаторов

Геометрические параметры фигур в фокальной области и оптическая схема фокусировки представлены на рис.1.

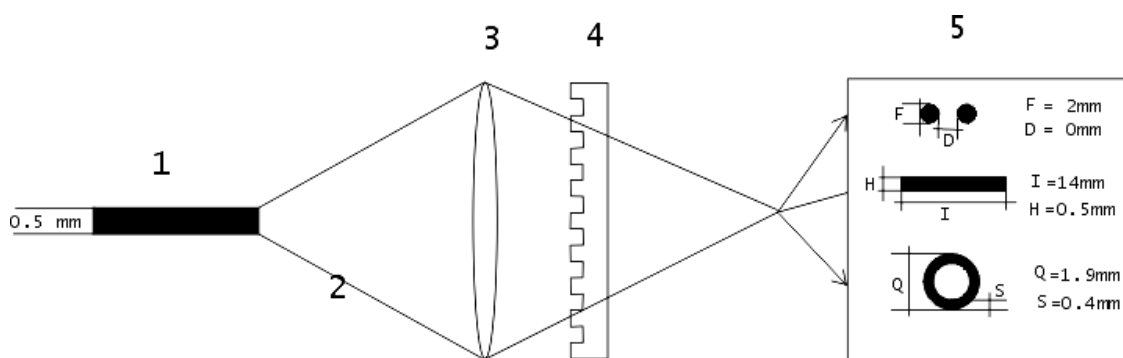


Рис.1. Оптическая схема и геометрия фигур в фокальной плоскости.

Параметры лазерной установки:

- рабочая длина волны Nd-Yag лазера - 1,064 мкм;
- максимальная мощность - 3000 Вт;
- диаметр оптического волокна - 0,6 мм;

- расходимость пучка после волокна - 219 милли- радиан;
- диаметр падающего пучка на фокусирующую линзу - 35 мм (86% интенсивности);

- фокусное расстояние линзы - 200 мм.

Для реализации задач лазерной сварки с использованием описанной лазерной установки были выбраны следующие параметры фокусаторов:

- диаметр апертуры - 50 мм,
- субстрат подложки - искусственный кварц,
- толщина подложки - 8 – 10 мм,
- форма фокального пятна - отрезок («прямоугольный штрих» размером 14 мм x 0,5 мм); кольцо с внешним диаметром в 3,9 мм и толщиной 0,7 мм); две «точки» (два круга диаметром 2 мм каждый, расположенных вплотную друг к другу).

На рис.1. схематично указано расположение линзы в фокусирующей оптической головке лазера: на расстоянии 200 мм от оптического волокна 1 располагается линза 3 с фокусом 100 мм, которая фокусирует лазерный пучок приблизительно на расстоянии 200 мм. Дифракционный элемент 4 должен быть расположен как можно ближе к фокусирующей линзе, чтобы обеспечить максимальную эффективность фокусировки. Все фигуры 5 в фокальной плоскости имеют толщину, значительно превышающую дифракционную толщину линий для этого значения числовой апертуры линзы, т.е. стоит задача фокусировки лазерного излучения в область с двумерным заданным (равномерным) распределением интенсивности. Все ДОЭ были изготовлены на подложках из плавленого кварца (показатель преломления $n = 1,45$) диаметром 76 мм. В центральной части подложки диаметром 50 мм был сформирован дифракционный микрорельеф, обеспечивающий требуемое распределение интенсивности в области фокусировки. Значение фокального числа (отношение расстояния до плоскости, где формируется фигура к диаметру ДОЭ) было равно трем для всех трех ДОЭ.

Фотошаблоны фокусаторов в кольцо и две точки были выведены на круговой лазерной записывающей системе (КЛЗС) на стеклянные пластины, покрытые хромом [6]. Диаметр рабочей зоны фокусаторов составляет 50 мм. Фотошаблон фокусатора в отрезок был записан на электронном литографе [7] и имеет размеры 50x50 мм. Для рассматриваемых фокусаторов, работающих в качестве дополнения к фокусирующей линзе, минимальная ширина зон измеряется десятками микрон, что при выбранных системах записи фотошаблонов обеспечивает требуемую точность воспроизведения линий (рассчитанных кривизны и размеров в каждой точке) [1].

Процесс обработки и изготовления микрорельефа фокусаторов был аналогичен технологии, описанной в [3-4], за исключением этапов совмещения, которые в случае бинарного ДОЭ попросту отсутствуют. Однако попытки травления субстрата кварцевой подложки жидкостным химическим травлением не дали приемлемых результатов. При жидкостном травлении кварца присутствует сильно выраженный изотропный характер травления, поэтому происходит подтравливание под защитный слой фоторези-

ста, а затем - его отрыв от поверхности подложки. В результате чего края линий получаются неровными, и достичь без этого дефекта требуемой глубины травления за один шаг не удастся, поскольку скорость травления плавленого кварца намного ниже, чем у обычного стекла. Поэтому для травления искусственного кварца была отработана методика использования анизотропного плазмохимического травления субстрата подложки сквозь открытые «окна» в защитной маске из фоторезиста ФП 3518 и хрома. Фоторезистивная маска перед травлением кварца подвергалась обычной термообработке.

Параметры процесса сухого травления кварца следующие:

- предварительная откачка рабочей камеры установки – не хуже $1,5 \cdot 10^{-2}$ Па;
- установившееся рабочее давление хладона-14 (CF_4) в реакционной камере $1,5 \cdot 10^{-1}$ Па (при работающих средствах откачки);
- установившийся расход рабочего газа $Q = 0,3 \cdot 10^{-6}$ м³/с (или 1,08 л/час);
- ток электромагнита – 0,6 А;
- напряжение отрицательного смещения на подложкодержателе – 300 В;
- ВЧ – мощность ~ 550 Вт;
- скорость травления кварца в данном режиме – около 550 Å/мин.

При таких параметрах процесса травления требуемая высота микрорельефа должна быть достигнута через 33 мин. Однако фоторезист, выступающий в качестве защитной маски для хрома, не выдерживает столь продолжительный период воздействия, поэтому процесс травления повторялся несколько раз с новым фоторезистом. После каждого шага травления в установке глубина рельефа проверялась на микроинтерферометре на очищенном от остатков фоторезиста фокусаторе, и если высота травления еще не достигала требуемых значений, то процесс травления продолжался.

3. Исследование микрорельефа фокусаторов

Для каждого оптического элемента были измерены величины характеристических параметров микрорельефа. Далее представлены описания топологии микрорельефов и их характеристики для каждого типа исследуемых ДОЭ. На рис. 2 представлено увеличенное с помощью микроскопа изображение микрорельефа фокусатора в две точки, на котором видны границы линий. Изображение берется в области ДОЭ, в которой линии наиболее тонкие, т.е. сами зоны, состоящие из таких линий, наиболее трудно изготовить.

Характеристические параметры микрорельефа фокусатора в две точки следующие:

- размер самой большой зоны, мкм - 980;
- размер самой маленькой зоны (на краю линзы), мкм - 54;
- высота центральной зоны, мкм - 1,225;
- высота зоны на краю, мкм - 1,280.

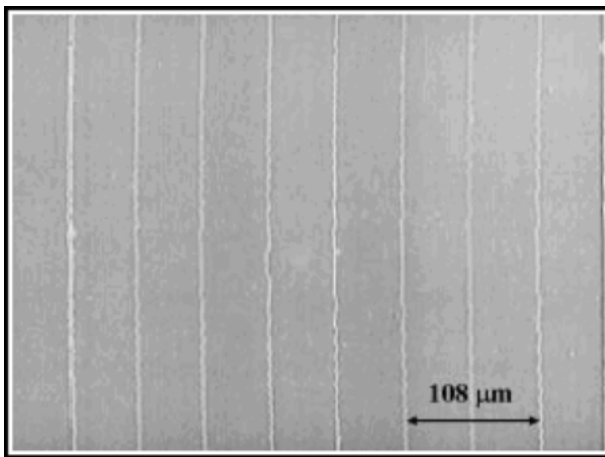


Рис. 2. Фрагмент микрорельефа фокусатора в две точки.

Первые два параметра зависят от рассчитанного рисунка линий на шаблоне и влияют на форму фокусируемой фигуры. Изменение этих параметров может влиять на расстояние между двумя точками и их диаметр.

Исследование высоты профиля микрорельефа выполнялось на микропрофилометре - инструменте, используемом для оценки профиля поверхности с высокой точностью. Значение высоты микрорельефа влияет на качество формируемой фигуры. Используя формулу для определения теоретической высоты ступеньки

$$H = \lambda / 2(n - 1), \quad (1)$$

находим, что в случае длины волны $\lambda = 1,064$ мкм в среде искусственного кварца с показателем преломления $n = 1,45$ - значение H высоты микрорельефа должно быть равно 1,182 мкм. Отклонение значения реальной высоты микрорельефа от требуемой теоретической приводит к потере части энергии, которая тем больше, чем больше указанное отклонение. В данном случае, отклонение от теоретического значения высоты микрорельефа составляло 5%.

Профиль крайней зоны фокусатора в две точки представлен на рис.3

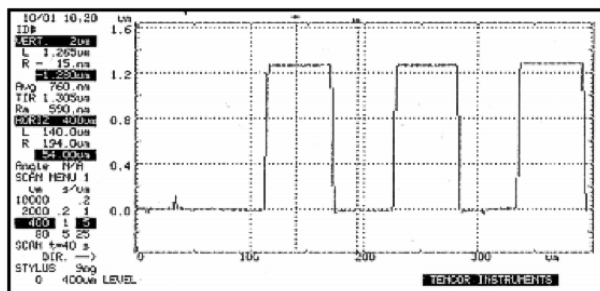


Рис.3. Профиль крайней зоны фокусатора в две точки.

Шаблон фокусатора в кольцо выглядит как две секции (половинки), состоящие из концентрических полуокружностей. На рис.4 показан фрагмент рельефа в центральной части ДОЭ, увеличенный в 80 раз с помощью микроскопа. Такая структура шаблона

требует точной центровки оси пучка лазера, падающего на фокусатор. Как показали экспериментальные исследования, ошибка в центровке приводит к неосесимметричному распределению интенсивности в фокальной плоскости.

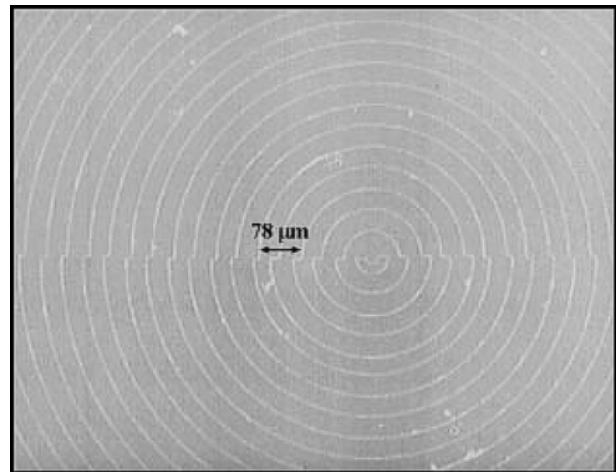


Рис.4. Центральный участок бинарного фокусатора в кольцо.

Параметры микрорельефа, измеренные на фокусаторе:

- период зоны - 75 мкм;
- высота микрорельефа - 1,210 мкм.

В этом случае средний период зоны влияет только на диаметр и толщину кольца, получаемого в фокальной плоскости. Отклонение от теоретического значения высоты равно 2%, что также как и для фокусатора в две точки приводит к энергетическим потерям фокусировки.

Фрагмент профиля микрорельефа фокусатора в кольцо представлен на рис.5.

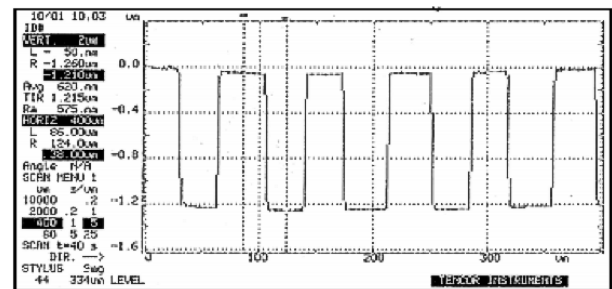


Рис.5. Фрагмент профиля микрорельефа фокусатора в кольцо.

Топология фотошаблона фокусатора в линию, работающего как дополнение к фокусирующей линзе, состоит из параллельных линий с шагом, возрастающим к краю ДОЭ. На следующем рисунке (рис.6) представлены изображения той части ДОЭ, где ширина зон минимальна:

Параметры микрорельефа фокусатора в отрезок следующие:

- размер максимальной зоны - 200 мкм;
- размер минимальной зоны - 13 мкм;
- высота там, где ширина зон максимальна, - 1,110 мкм;

- высота там, где ширина зон минимальна, - 1,125 мкм.
- отклонение от теоретической высоты - 5 %.

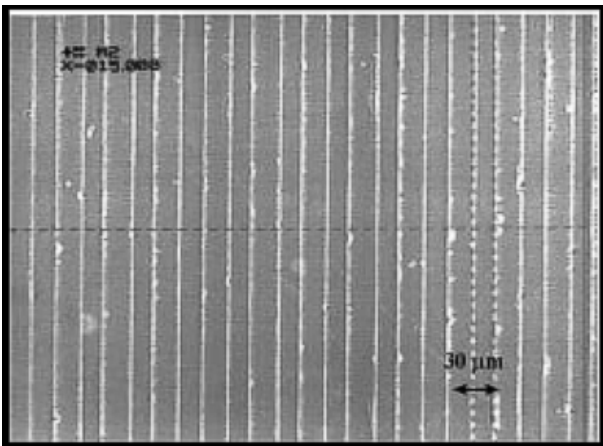


Рис. 6. Изображение зон фокусатора в линию, имеющих минимальную ширину.

4. Измерения распределений интенсивности

Были выполнены измерения для оценки распределений в разных плоскостях интенсивности пучка, проходящего через дифракционные элементы и фокусирующую линзу. Для измерений был использован анализатор лазерного излучения Prometec Laserscope UFF 100.

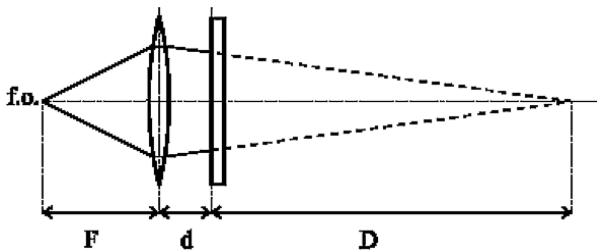


Рис. 7. Параметры оптической схемы лазерного испытательного стенда, представленной на рис. 1.

Была использована фокусирующая линза с фокусным расстоянием F , для которой выполняется условие $F \approx D + d$, где приближительность обусловлена

тем, что фокусное расстояние ДОЭ влияет на расстояние между плоскостью, в которой располагают дифракционный элемент, и «фокальной плоскостью», в которой реализуется требуемая фигура. В плоскостях, параллельных фокальной плоскости и отстоящих от нее на много длин волн, присутствует не «расфокусированная» фигура, а совсем другие по форме фигуры.

Для начала исследования была выбрана базовая точка отсчета - позиция «ноль» на расстоянии 155 мм от выходной плоскости ДОЭ. Все остальные положения плоскости исследования, превышающие нулевую, соответствуют большему расстоянию от линзы.

На первой фазе исследований было изучено изменение формы пучка, формируемого фокусатором в кольцо в плоскостях, расположенных на различных расстояниях от ДОЭ. Изучение этого изменения было осуществлено в три этапа: сначала были выполнены отпечатки на фоточувствительной бумаге формы пучка на разных расстояниях от плоскости ДОЭ; затем были получены замеры полей интенсивности на различных расстояниях, используя инструмент Prometec Laserscope UFF 100. Измерения в этих экспериментах были выполнены с интервалом 5 мм, последовательно удаляя плоскость регистрации от позиции «ноль». Определена плоскость, находящаяся на расстоянии 20 мм от нулевой, в которой требуемое изображение наилучшим образом реконструируется. Положение этой плоскости было уточнено за счет смещения плоскости регистрации около нее с шагом 1 мм. Все измерения были выполнены с помощью Prometec при мощности излучения 3000 W.

В таблице 1 представлены поля интенсивностей, формируемых фокусатором в кольцо, для некоторых расстояний от «нулевой» плоскости (первый столбец). Оценка энергетической эффективности фокусировки (доля энергии, попавшая в кольцо) в фокальной плоскости фокусатора - 67,1%.

Таблица 1.

Распределения интенсивности в фокальной (20 мм относительно «нулевой» плоскости) и в параллельных к ней плоскостях для ДОЭ, фокусирующего в «уширенное» кольцо.

0 мм	20 мм	35 мм

Для исследования фокусатора в сдвоенную точку были использованы та же последовательность операций и оборудование, которые были применены для фокусатора в кольцо. В таблице 2 представлены изображения на фоточувствительной бумаге на различных расстояниях от плоскости ДОЭ (с шагом 5 мм). Оценка энергетической эффективности фокусировки (доля энергии, попавшая в два кружка) в фокальной плоскости фокусатора – 66,4%.

Таблица 2.

Распределения интенсивности в фокальной (20 мм относительно «нулевой» плоскости) и параллельных к ней плоскостях для ДОЭ, фокусирующего в «две точки».

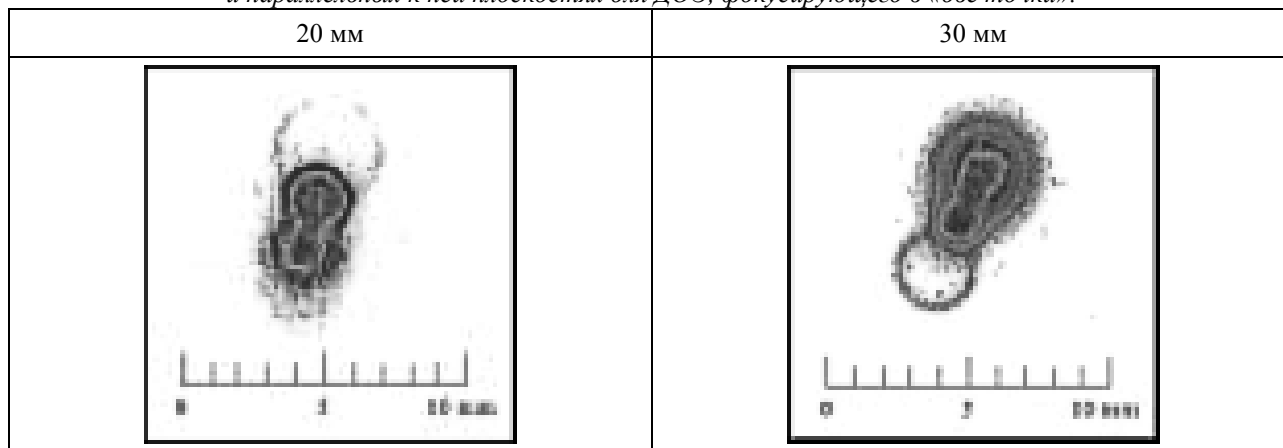
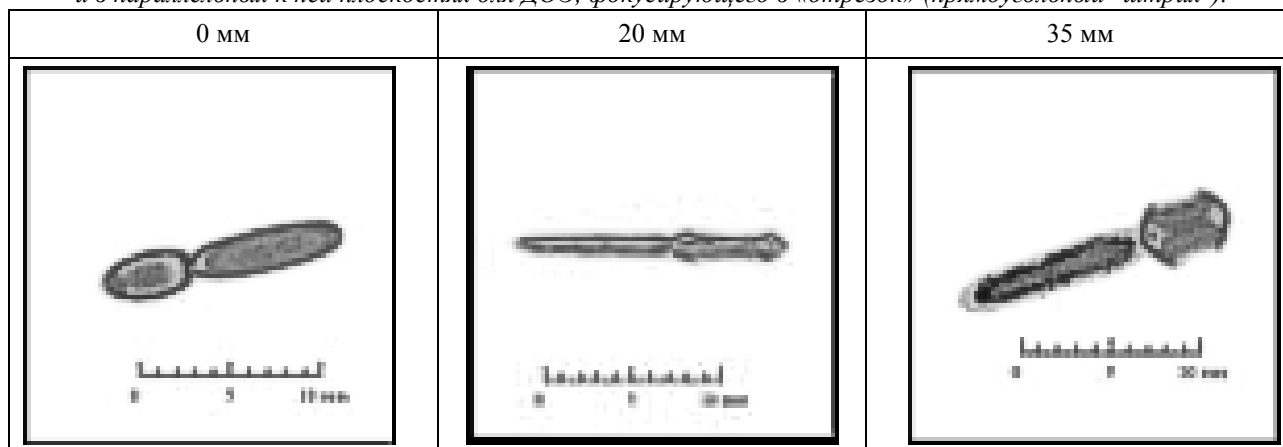


Таблица 3 представляет результаты исследования бинарного фокусатора в отрезок: изображения отпечатков на фоточувствительной бумаге на различных расстояниях от ДОЭ (с шагом 5 мм). Фокальная плоскость, в которой формируется распределение интенсивности, максимально близкое к требуемой форме, и в этом случае находилась на расстоянии 20 мм от позиции «ноль». Фокусатор демонстрирует разрыв между двумя половинками отрезка, формируемыми разными дифракционными порядками, а также различные толщины полуотрезков на различных расстояниях от ДОЭ (вне фокальной плоскости - см. Табл. 3.) Оценка энергетической эффективности фокусировки (доля энергии, попавшая в прямоугольный «штрих») в фокальной плоскости фокусатора – 63,8%.

Таблица 3.

Распределения интенсивности в фокальной (20 мм относительно «нулевой» плоскости) и в параллельных к ней плоскостях для ДОЭ, фокусирующего в «отрезок» (прямоугольный "штрих").



Для всех фокусаторов большое значение имеет центрирование оси рабочей апертуры ДОЭ с осью распространения лазерного пучка, поскольку их несовпадение приводит к сильному искажению области фокусировки. Может оказаться, что распределение интенсивности в обоих половинках фигур не совпадает не в результате дефектов микрорельефа, а всего лишь из-за неравномерного освещения ДОЭ пучком, имеющим явно выраженный Гауссовский характер.

Сверх тех, что проведены и описаны выше, для фокусаторов были выполнены несколько общих экспериментов для определения инвариантности качества пучка к повороту ДОЭ и существованию эффекта термического линзования.

Вращая дифракционный оптический элемент на 90° внутри головки фокусирующего узла были обнаружены только вращения изображения от каждого ДОЭ без каких либо существенных изменений в плотности энергии сформированного пятна.

Проверка термического линзования была выполнена в течение длительной экспозиции при мощности 3000 W. Оптический узел охлаждался только на оптическом волокне и в части фокусирующей линзы. Для всех фокусаторов не было получено никаких изменений в распределении плотности энергии в пятне, однако было показано, что потери энергии при прохождении непросветленных ДОЭ составили 4%. Указанные потери намного меньше для рассматриваемых ДОЭ, выполненных на кварцевых подложках, по сравнению с фокусаторами на стеклянных подложках [3], однако и они могут быть дополнительно снижены за счет просветления.

5. Заключение

Результаты экспериментальных исследований фокусаторов показывают хорошее совпадение с теоретическими и расчетными данными и демонстрируют именно те фигуры в фокальной плоскости, которые были сформулированы в техническом задании. Кроме того, подтверждаются предсказанная в теории многопорядковых фокусаторов энергетическая эффективность фокусировки: в ходе экспериментов было установлено, что плотности мощности в фокальной плоскости ДОЭ достаточно для осуществления сварки двух металлических пластин толщиной 0,8 мм и 1,2 мм. В результате проведенных исследований показана перспективность использования высокоэффективных бинарных ДОЭ в лазерных технологических установках, важность качественного изготовления микрорельефа и прецизионной юстировки ДОЭ в лазерной головке.

6. Благодарность

Авторы выражают благодарность за помощь в изготовлении и исследовании оптических элементов сотрудникам Института автоматики и электрометрии СО РАН А.Г. Полещуку и В.В. Черкашину, ве-

дущему инженеру Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН В.А. Данилову, сотрудникам Института систем обработки изображений РАН О.Ю. Моисееву, О.Е. Рыбакову и Ю.А. Рункову, особую признательность - коллективу Исследовательского центра ФИАТ (г. Орбассано, Италия).

Литература

1. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2000, 688 с.
2. Golub M.A., Sisakian I.N., Soifer V.A. Infra-red radiation focusators // Optics and Lasers in Engineering. - 1991. - Vol.15, № 5. - P.297-309.
3. Волков А.В., Казанский Н.Л., Успенцев Г.В. Изготовление и экспериментальное исследование фокусаторов в кольцо и две точки // Компьютерная оптика, 1999, № 19, с. 137-143.
4. Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е. Исследование технологии плазмохимического травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика, 1998, № 18, с.127-130.
5. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Сойфер В.А. Расчет двухпорядковых фокусаторов // Автоматика, 1993, № 1, с.58-63.
6. Точность изготовления дифракционных оптических элементов лазерными записывающими системами с круговым сканированием / В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, А.А. Харисов, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика, 1997, № 17, С.63-74.
7. Babin S., Danilov V. Photomask fabrication of focusing diffractive optical elements using electron beam lithography // Proceedings SPIE. – 1995. – Vol. 2426 “9th Meeting on Optical Engineering in Israel”, p. 215-227.