

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.7.023.72; 621.373.8.038.82.3

ПАРАМЕТРЫ МЕЛКОСТРУКТУРНОЙ ОШИБКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДИСКОВЫХ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ МАЛОРАЗМЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

© 2010 г. В. Г. Бородин, канд. техн. наук; И. Г. Розивика; А. В. Чарухчев, канд. техн. наук;
В. Н. Чекаль

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: contact@niiki.ru

Рассмотрены особенности формообразования малоразмерным инструментом рабочих поверхностей крупногабаритных дисковых активных элементов. Представлены результаты измерения мелкоструктурной ошибки. Приведен алгоритм и результаты численного моделирования искажений волнового фронта пучка, прошедшего через произвольное число элементов, содержащих мелкоструктурную ошибку.

Ключевые слова: дисковый активный элемент, интерферограмма, малоразмерный инструмент, мелкоструктурная ошибка.

Коды OCIS: 120.6660, 140.3390

Поступила в редакцию 08.06.2009

Усилительные каскады мощных лазеров содержат несколько десятков активных элементов, установленных под углом Брюстера. Размер световой зоны элементов вдоль большой оси составляет до 700 мм и более. Общее число поверхностей, которые проходит лазерный пучок в процессе усиления, превышает 100. Традиционная технология, основанная на методе свободного притира полноразмерным инструментом, позволяет изготавливать дисковый элемент, ограниченный двумя плоскими силовыми поверхностями. Однако, высокая точность изготовления (менее $0,1\lambda$) делает процесс трудоемким.

В оптической промышленности освоен технологический процесс доводки поверхностей крупногабаритных оптических деталей, позволяющий достигать высокого качества при обработке поверхности [1, 2]. Программное управление малым полировальником и локализация обрабатываемых зон при оптимальном выборе режимов обработки позволяет сделать процесс полирования сходящимся, т. е. добиться монотонного уменьшения среднего квадратического отклонения (СКО) формы поверхности от заданной.

В данной работе исследовался процесс изготовления дисковых активных элементов с помощью автоматизированного формообразования оптических поверхностей малым инструментом. Световая зона представляла собой прямоугольник длиной 485 мм и шириной 250 мм. При изготовлении учитывались следующие особенности использования дисковых элементов: элементы в усилителе однозначно ориентированы относительно оптической оси и функционируют в проходящем пучке. Поэтому для формирования высокого качества проходящего пучка достаточно обеспечить параллельность поверхностей дисков без соблюдения их плоскости. Следовательно, одна из поверхностей может быть выполнена относительно невысокого качества (по указанному параметру), а вторая рассчитана и обработана, исходя из условий компенсации погрешностей первой. В общем случае при таком подходе обработка второй поверхности возможна только с помощью автоматизированного формообразования малым инструментом. Однако малоразмерный инструмент становится основной причиной мелкоструктурной ошибки (МСО) поверхности [1]. Исследования [2] показали,

что, в принципе, при правильном построении технологического процесса МСО оказывается практически в диапазоне ошибок, соответствующих полноразмерному инструменту. Основная цель работы заключалась в измерении МСО, характерной для данного технологического процесса.

Такой подход применялся при изготовлении дисковых элементов установки “Луч” [3]. Форма второй поверхности рассчитывалась по интерферограмме, зарегистрированной в проходящем пучке. Проверка технологического процесса осуществлялась экспериментально. Для этого был собран макет лазерного усилителя, состоящий из 5 элементов. Пучок Не-Не-лазера расширялся телескопом до светового диаметра 350 мм и ограничивался квадратной апертурной диафрагмой со стороной 220 мм. Макет усилителя устанавливался по оптической оси пучка. Пучок, прошедший через усилитель, отражался эталонным зеркалом назад и после второго прохода усилителя поступал на телекамеру, с помощью которой регистрировалось распределение интенсивности в дальней зоне. На рис. 1а представлена фотография фокального пятна, на рис. 1б – относительное распределение интенсивности I вдоль его диаметрального сечения t . Размер центрального максимума соответствует дифракционно ограниченному. Наблюдается разрыв первого кольца и небольшая деформация керна. Подробное исследование показало, что на выходе усилителя после прохождения пучком 20 поверхностей, расположенных под углом

Брюстера, общая ошибка волнового фронта не превышала $0,15\lambda$ ($\lambda = 0,63$ мкм). Такой результат свидетельствует о достаточно высокой эффективности техпроцесса.

В работе [2] для определения МСО была предложена методика, базирующаяся на следующих положениях: при идеальной форме оптической поверхности и настройке интерферометра на полосы интерференционная картина представляет собой прямые параллельные полосы одинаковой ширины, при этом любое нерегулярное отклонение ширины интерференционной полосы от среднего значения считалось МСО.

В данной работе для определения МСО был использован многолучевой интерферометр. На поверхность исследуемого элемента наносилось зеркальное алюминиевое покрытие. Диск располагался в горизонтальном положении. Интерферометр образовывался исследуемой поверхностью и эталонной пластиной диаметром 200 мм с частично прозрачным покрытием. Источником излучения служила ртутная лампа. Длина волны излучения составляла 546 нм. Интерферограмма приведена на рис. 2. Она представляет собой ряд тонких темных полос, разделенных широкими светлыми промежутками. Общее (крупномасштабное) искривление полос вызвано двумя причинами. Во-первых, отдельная сильная поверхность, как упоминалось выше, выполнена с некоторой общей погрешностью. Во-вторых, при регистрации возникала деформация поверхности вследствие нештатной установки диска. В данной методике наличие общей

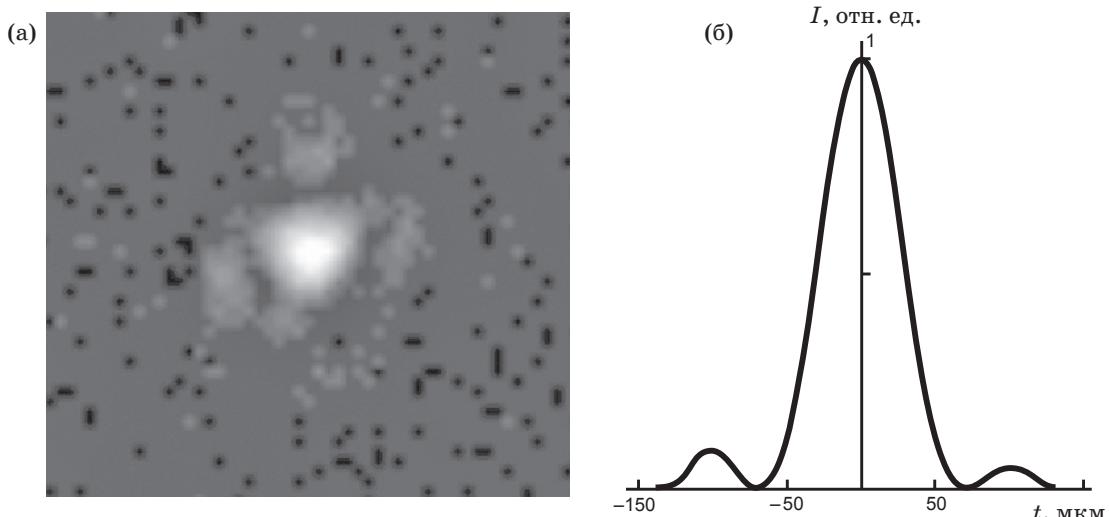


Рис. 1. Фотография фокального пятна (а) и относительное распределение интенсивности (б) в сфокусированном пучке, дважды прошедшем усилитель из пяти активных элементов.

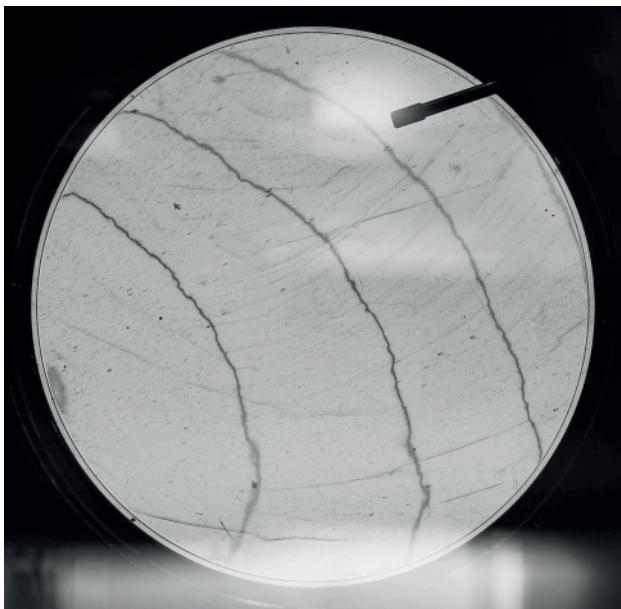


Рис. 2. Многолучевая интерферограмма поверхности дискового элемента.

ошибки не имело значения для измерения по интерферограмме мелкоструктурной составляющей. МСО на многолучевой интерферограмме проявляется как нерегулярное высокочастотное отклонение узкой тонкой полосы от гладкой кривой, аппроксимирующей форму полосы. В соответствии с разработанной методикой интерферограмма регистрировалась цифровым методом. Ее изображение привязывалось к прямоугольной системе координат. Для каждой темной полосы программно определялись координаты точек, освещенность в которых минимальна. Абсциссы точек нормировались на длину полосы и определялись в миллиметрах. Ординаты точек после соответствующей нормировки на ширину интерференционной полосы с учетом длины волны регистрирующего излучения выражались в микрометрах. Полученная в дискретных точках функция аппроксимировалась дугой окружности, рассчитанной по методу наименьших квадратов. График $Y(x)$ отклонения одной из полос от дуги окружности, ближайшей к экспериментальным точкам представлен на рис. 3 (кривая 1). Как следует из графика, $Y(x)$ можно представить в виде суммы двух кривых: низкочастотной (плавной) и высокочастотной, отождествляемой авторами с мелкоструктурной ошибкой. Для определения МСО дискретная зависимость $Y(x)$ аппроксимировалась полиномом $P(x)$, который минимизирует средний квадрат отклонения экспериментальных точек от $P(x)$.

Степень полинома определялась из условия, что период колебания функции $P(x)$ превышает диаметр полировальногоника, используемого при обработке поверхности. Полином $P(x)$ представлен на рис. 3 (кривая 2). Мелкоструктурную ошибку составляют отклонения экспериментальных точек от полинома. Эти отклонения определялись как расстояние от экспериментальных точек до $P(x)$, рассчитанное вдоль нормали к кривой. Результат представлен в виде функции $Y_1(x)$ на рис. 4. Анализ показывает, что размах МСО составляет около $0,02\lambda$ и лишь в трех-четырех отдельных узких зонах выходит за эту границу. Пространственная частота колебаний указывает на то, что остаточная погрешность не содержит крупномасштабных искажений. Однако, в эту мелкоструктурную ошибку, как указывалось в работе [2], входят местные ошибки, пространственный масштаб которых совпадает с МСО. Расчет показал, что среднеквадратическое отклонение МСО не превышает $0,01\lambda$ ($\lambda = 0,546$ нм).

Для оптических систем, содержащих значительное число поверхностей, обработанных малоразмерным инструментом, представляется важным определение мелкоструктурной ошибки волнового фронта, прошедшего эти поверхности. Непосредственное измерение ошибки

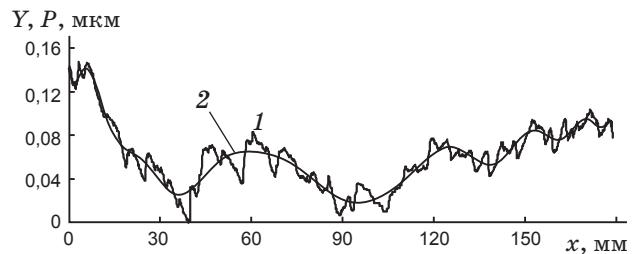


Рис. 3. Экспериментальный график $Y(x)$ интерференционной полосы (1) и аппроксимирующий его полином (2).

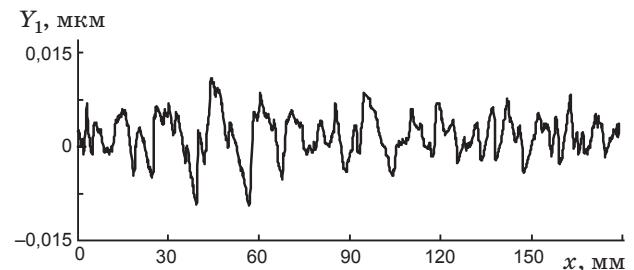


Рис. 4. Мелкоструктурная ошибка, выделенная из интерференционной полосы.

затруднительно в случае крупногабаритных устройств. В данной работе суммарная мелкоструктурная ошибка рассчитывалась путем численного моделирования. Предполагалось, что измеренная зависимость $Y(x)$ представляет собой стационарную случайную функцию. Для решения задачи требовалось сформировать ряд случайных функций статистически эквивалентных экспериментальной реализации $Y(x)$. Один из возможных алгоритмов формирования таких функций приведен в работе [4]. Алгоритм позволяет генерировать случайные функции из непрерывного белого шума с ограниченным спектром, прошедшего линейную систему, импульсная переходная характеристика которой определяется через известную корреляционную функцию. Корреляционная функция $R(\tau)$, определяемая как усредненное произведение реализации случайной функции на самоу себя, но смещенную на интервал τ , рассчитывалась по экспериментальной зависимости $Y(x)$. Затем находился энергетический спектр $G(\omega)$

$$G(\omega) = 2 \int_0^{\omega_0} R(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau. \quad (1)$$

Здесь ω – частота спектра шума, ω_0 – его граничная частота, которая определялась из условия $G(\omega_0) \leq 0,01$. По формуле (1) рассчитывалась дискретный ряд значений импульсной переходной характеристики h_k

$$h_k = (1/\sqrt{\omega_0 \pi}) \int_0^{\omega_0} [G(\omega)]^{1/2} \cos(k\omega\pi/\omega_0) d\omega, \quad (2)$$

здесь $k = 0, \dots, K$. При этом граничное значение K определялось из условия

$$\left| 1 - (1/\sigma^2) \sum_{k=-K}^K h_k^2 \right| \leq \varepsilon, \quad (3)$$

где σ^2 – дисперсия моделируемого случайного процесса, а ε – некоторое малое число (допустимая погрешность).

Белый шум N_p для каждой p -й случайной функции f_p формировался как последовательность n случайных чисел с нулевым средним значением и СКО, соответствующим экспериментальной зависимости (n – число экспериментальных точек, зарегистрированных на интерферограмме). Функция f_p формировалась на том же множестве n точек. В каждой i -ой точке значение $f_{p,i}$ рассчитывалось как результат суммирования

$$f_{p,i} = \sum_{j=0}^K |h_j| N_{p,i+j}. \quad (4)$$

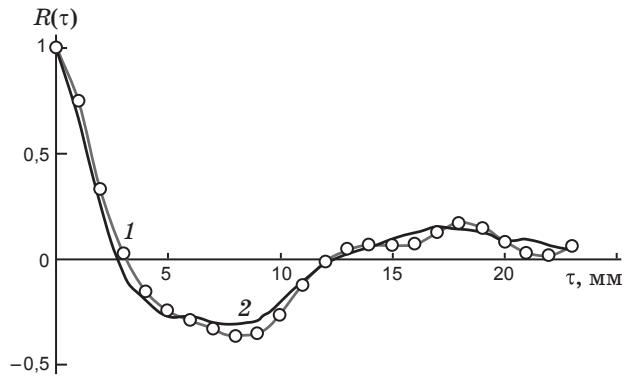


Рис. 5. Корреляционные функции: полученная экспериментально (1) для одной поверхности и расчетная (2) для пучка, прошедшего 100 поверхностей.

Функция $F = \sum_{p=0}^m f_p$ моделирует искажения волнового фронта пучка на выходе системы, содержащей m поверхностей. Анализ расчета показал следующее. При возрастании m в пределах $1 \leq m \leq 25$ максимальный размах F растет пропорционально \sqrt{m} . При дальнейшем увеличении m рост F замедляется и подчиняется зависимости $F \approx \sqrt{m/2}$. Корреляционная функция суммарного волнового фронта (рис. 5, кривая 2) тождественна в пределах погрешностей расчета корреляционной функции экспериментальной реализации МСО (рис. 5, кривая 1). Следовательно, спектр МСО волнового фронта практически не изменяется с увеличением числа поверхностей.

Таким образом, применение малоразмерного инструмента позволило отработать технологический процесс обработки поверхностей крупногабаритных дисковых активных элементов, учитывающий особенности их функционирования: качество лазерного пучка, проходящего дисковый элемент, сохраняется, если обеспечена параллельность поверхностей дисков. В общем случае такой процесс может быть реализован только с помощью малоразмерного инструмента. Для определения МСО, характерной для данного техпроцесса, использовался многолучевой интерферометр. МСО на интерферограмме выявляется как нерегулярное высокочастотное отклонение узкой тонкой полосы от гладкой кривой, аппроксимирующей форму полосы. Размах мелкоструктурной ошибки составил около $0,02\lambda$ ($\lambda = 0,546$ нм), а СКО не превысило 0,01. Эти значения находятся практически в диапазоне ошибок, соответствующих полнораз-

мерному инструменту. При этом общая ошибка волнового фронта пучка после прохождения 20 поверхностей дисковых активных элементов, расположенных под углом Брюстера, как показали измерения, не превышала $0,15\lambda$ ($\lambda = 0,63$ мкм).

Проведен расчет влияния мелкоструктурной ошибки на волновой фронт пучка, прошедшего произвольное число поверхностей, обработанных малоразмерным инструментом. Показано, что МСО волнового фронта пучка растет заметно медленнее числа m поверхностей. Если $m > 30$, то амплитуда МСО как функция m аппроксимируется зависимостью $\sqrt{m/2}$. Анализ экспериментальной и расчетной корреляционных функций, показал, что спектральный состав МСО волнового фронта соответствует составу МСО отдельной поверхности и практически не зависит от m .

ЛИТЕРАТУРА

1. Евтеев Г.В., Никитин Д.Б. Мелкоструктурная ошибка при автоматизированной доводке оптических поверхностей // Оптический журнал. 1995. № 12. С. 75–76.
2. Савельев А.С. Мелкоструктурная погрешность формообразования поверхностей крупногабаритных оптических деталей // Оптический журнал. 1994. № 6. С. 9–10.
3. Воронич И.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г., Ерошенко В.А., Зарецкий А.И., Зималин Б.Г., Игнатьев И.В., Кирдяшкин М.Ю., Кириллов Г.А., Осин В.А., Рукавишников Н.Н., Сухарев С.А., Шаров О.А., Чарухчев А.В. Измерение коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с активными элементами из неодимового фосфатного стекла // Квант. электрон. 2003. Т. 33. № 6. С. 485–488.
4. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио, 1971. 328 с.