МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 681.7.08

Гартманометр для контроля параметров формы плоских оптических поверхностей

Веремьёва А. А., студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»

Научный руководитель: Денисов Д.Г., к.т.н., доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>rl2@bmstu.ru</u>

Контроль параметров формы оптических поверхностей - одна из важнейших технологических задач оптического производства, для осуществления которой широко применяют интерференционный метод. Этот метод основан на интерференции между двумя пучками лучей: первый - отраженный от эталонной поверхности, а второй - от контролируемой поверхностей. Большое распространение для контроля таким способом получил интерферометр Физо, структурно-функциональная схема которого представлена на рис. 1. Интерферометр типа Физо - простейший двухлучевой интерферометр с совмещенными ветвями. Это означает, что в таком интерферометре рабочая и эталонная ветви совмещены. Такая особенность позволяет уменьшить погрешность измерения параметров формы поверхности, т.к. пучок лучей проходит один и тот же путь в прямом и обратном направлении, за счет чего происходит вычитание ошибок волнового фронта. Для контроля плоских поверхностей в качестве эталона используется клиновидная пластина, последняя поверхность которой является эталоном. [1, 2]



Рис. 1. Структурно-функциональная схема интерферометра Физо для контроля параметров формы плоской поверхности

Автором статьи был проведен обзор современных интерферометров Физо для контроля параметров формы оптических поверхностей. Были проанализированы интерферометры ведущих зарубежных компаний таких, как Zygo, ESDI. Основные характеристики, техника и возможности измерения рассмотренных систем контроля приведены в таблице 1. Наиболее важным параметром является погрешность измерения, которая, как видно из табл. 1, обычно составляет $\frac{\lambda}{15} - \frac{\lambda}{10}$ PV для одного эталона. Качество измерения в значительной степени определяется точностью изготовления эталона.

Таблица 1

Основные характеристики, техника и возможности измерения некоторых современных интерферометров Физо

| Характеристика | Zygo Mini TM | DynaFiz TM | Zygo Verifire | Intellium TM Z40 | |
|----------------|--|--|--|-----------------------------|--|
| Возможности | измерение | измерение | измерение | измерение | |
| измерения | параметров | параметров | параметров | параметров | |
| | формы и | формы | формы | формы плоских | |
| | радиуса | оптических | оптических | и сферических | |
| | кривизны | поверхностей | поверхностей | оптических | |
| | поверхностей | | | поверхностей | |
| Техника | фазо- | динамическая | фазо-сдвиговая | динамическая | |
| измерения | сдвиговая | интерферо- | интерферо- | интерферо- | |
| | интерферомет | метрия | метрия | метрия | |
| | рия | | | | |
| Источник | лазерный диод | НеNелазер | НеNелазер | НеNелазер | |
| излучения | (классІІ), | (класс IIIA), | (класс IIIA), | (класс IIIA), | |
| | λ=637 нм | λ=632,8 нм | λ=633 нм | λ=632,8 нм | |
| Погрешность | $\frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2} PV$ | $\frac{\lambda}{\lambda} - \frac{\lambda}{\lambda} PV$ | $\frac{\lambda}{\lambda} - \frac{\lambda}{\lambda} PV$ | $\frac{\lambda}{PV}$ | |
| измерения | 15 10 | 15 10 | 15 10 | 10 | |
| Повторяемость | ≤ 4 нм <i>PV</i> | ≤ 4 нм <i>PV</i> | ≤ 0,035 нм <i>PV</i> | $\frac{\lambda}{PV}$ | |
| результата | | | | 15 | |
| измерения | | | | | |
| Длина | >0,5 м | >100 м | >100 м | >100 м | |
| когерентности | | | | | |

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038, ISSN 2307-0609

Существует ряд проблем, возникающих в связи с контролем оптических поверхностей указанным методом. Среди этих проблем можно выделить основные:

- Необходимость соблюдения высокой точности эталонной поверхности приводит к технологическим трудностям изготовления эталона, особенно для контроля крупногабаритных деталей, а, следовательно, производство таких эталонов является дорогостоящим;
- Условия наблюдения интерференции накладывают ограничение на выбор источника излучения: он должен обладать большой длиной когерентности: Δ<<l_{k2}, где Δ - оптическая разность хода лучей, l_{k2} - длина когерентности. Такое требование к источнику излучения также существенно при контроле крупногабаритных деталей и деталей со значительными радиусами кривизны;
- Неустойчивость к вибрациям и неоднородность воздушного промежутка между эталонной и контролируемой поверхностями оказывает влияние на качество результатов измерения.

Для решения перечисленных проблем автором статьи совместно с ООО «Активная оптика НайтН» предлагается на основе показанной схемы классического интерферометра Физо структурно-функциональная схема интерферометра (рис. 2), так называемого гартманометра, с использованием датчика волнового фронта (ДВФ) вместо обычной камеры в ветви регистрации. Для проведения измерений необходимо предварительно записать плоский эталонный волновой фронт.



Рис. 2. Структурно-функциональная схема гартманометра: 1 – источник излучения с микрообъективом; 2, 6 – точечная диафрагма; 3 – светоделитель; 4, 7 – объектив; 5 – плоская контролируемая деталь; 8 – ДВФ

Принцип работы гартманометра

Пучок лучей, выходящий из источника, фокусируется микрообъективом и преобразуется в расходящийся пучок, который после прохождения светоделителя 3 преобразуется объективом 4 в параллельный. Затем, отразившись от контролируемой детали 5, лучи идут в обратном направлении, снова проходят через объектив 4 и светоделителем направляются в сторону ДВФ 8, перед которым установлен объектив 7, преобразующий падающий на него пучок лучей в параллельный. Важно отметить, что в такой системе интерферограмма является результатом математической обработки двух волновых фронтов: предварительно записанного плоского эталонного и исследуемого (отраженного от контролируемой детали).

Принцип работы ДВФ

Далее будет рассмотрен принцип работы ДВФ подробнее. В гартманометре используется ДВФ Шака-Гартмана, структурно-функциональная схема которого изображена на рис. 3.



Рис. 3. Структурно-функциональная схема ДВФ Шака-Гартмана

Главными элементами датчика являются приемник ПЗС или КМОП камеры и линзовый растр. Линзовый растр представляет собой матрицу микролинз (рис. 4), которые разбивают приходящий волновой фронт на локальные участки, фокусирующиеся затем на приемнике. На приемнике формируется изображение, называемое гартманограммой. Пример гартманограммы показан на рис. 5.



Рис. 4. Микролинзовый растр

Принцип действия датчика Шак-Гартмановского типа основан на измерении локальных наклонов волнового фронта, которые пропорциональны локальным смещениям фокальных пятен. [3, 4]



Рис. 5. Пример гартманограммы

На рис. 6 представлен алгоритм измерения ДВФ. Сначала, регистрируя распределение интенсивности в пределах каждого локального участка, получают гартманограмму. Затем проводят обработку изображения с помощью быстрого преобразования Фурье. Целью такой обработки является определение числа фокальных пятен по оси *x* и по оси *y*.



Рис. 6. Алгоритм измерения ДВФ

В третьем блоке центры фокальных пятен (x_k, y_k) находят методом центроидов для каждой из локальных областей, на которые разбивается вся поверхность приемника по формулам:

$$x_{k} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (\sum_{i=1}^{m} x_{i} I_{ij})}{\sum_{i=1}^{n} (\sum_{i=1}^{m} I_{ij})}, y_{k} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (\sum_{i=1}^{m} y_{i} I_{ij})}{\sum_{i=1}^{n} (\sum_{i=1}^{m} I_{ij})},$$

где *m*, *n* – число пикселей ПЗС-матрицы по осям *x*, *y* в пределах *k*-ой локальной области, *I*_{*i,j*} – значение интенсивностей в пикселе.

Далее в четвертом блоке определяют смещения фокальных пятен исследуемого волнового фронта, соответственно по оси х и по оси у (рис. 7):



Рис. 7. Смещение фокальных пятен по оси у

В пятом блоке вычисляют локальный наклон исследуемого волнового фронта по формуле:

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \frac{1}{f} S_x^k, \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \frac{1}{f} S_y^k, k = 1, \dots, NK,$$
(1)

где *f*- фокусное расстояние микролинзы, *NK* – число фокальных пятен на гартманограмме.

С другой стороны локальный наклон можно представить в виде разложения по полиномам Цернике:

$$\frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial F_p(x_k, y_k)}{\partial x}, \quad \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} = \sum_{p=1}^{NP} a_p \frac{\partial F_p(x_k, y_k)}{\partial y}, \quad (2)$$

где NP – число полиномов разложения, a_p – коэффициенты при полиномах разложения, $F_p(x_k, y_k)$ – значение полинома Цернике *p*-го порядка в точке (x_k, y_k).

Приравнивая правые части (1) и (2) получаем систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов Цернике. В матричной форме система выглядит $S = a \cdot A$, где S – вектор смещений, отнесенных к фокусному расстоянию микролинзы, a – коэффициенты Цернике, A – прямоугольная матрица производных от двумерных полиномов Цернике размером 2NPNK.

И, наконец, в последнем шестом блоке определяют коэффициенты при полиномах Цернике, решая систему методом наименьших квадратов, суть которого заключается в минимизации функционала разности между наклонами волнового фронта, определенными экспериментально по (1), с одной стороны, и, представленными по разложению (2). Метод удобно представить в матричной форме: $min | S - a \cdot A |^2$. Решение системы уравнений получают в виде:

$$a = (A^T A)^{-1} A^T S.$$

Коэффициенты при полиномах Цернике показывают величину аберраций волнового фронта, например, дефокусировку, астигматизмы, комы и т.д. Аберрации и вид полиномов Цернике представлены в табл. 2. [6]

| Полином | Описание | Декартовая форма | | |
|---------|--|--|--|--|
| Zem0 | Общий сдвиг фазу (Piston) (не используется) | 1 | | |
| Zem1 | Наклон по осн Х | x | | |
| Zem2 | Наклон по осн У | у | | |
| Zern3 | Дефокусировка (кривизна) | $-1 + 2x^2 + 2y^2$ | | |
| Zem4 | Астнгматизм по осям 0 ог $\pi/2$ | $y^2 - x^2$ | | |
| Zem5 | Астигматизм по осям ±π/4 | 2xy | | |
| Zern6 | Кома третьего порядка по оси Х | $-2x + 3xy^2 + 3x^3$ | | |
| Zem7 | Кома третьего порядка по оси Ү | $-2y + 3x^2y + 3y^3$ | | |
| Zern8 | Сферическая аберрация | $1 - 6x^2 - 6y^2 + 6x^4 + 12x^2y^2 + 6y^4$ | | |
| | | | | |
| | До 36 полинома | | | |

Полиномы Цернике

Для представления фазового распределения в виде интерференционной картины, удобной для визуальной оценки величины аберраций, волновой фронт рассчитывался по найденным коэффициентам Цернике:

$$\varphi(x,y) = \sum_{p=1}^{NP} a_p F_p(x,y),$$

а распределение интенсивности света для каждой точки апертуры рассчитывалось по формуле:

$$I(k_x, k_y) = \left| \iint \sqrt{I(x, y)} exp\left[\frac{2\pi i}{\lambda}\varphi(x, y)\right] exp\left[-2\pi i \left(k_x x + k_y y\right)\right] \right|^2,$$
где $k_x = \frac{x}{f\lambda}, \ k_y = \frac{y}{f\lambda}.$

Габаритный расчет афокальной системы, согласующей размер контролируемой детали и размер приемника излучения

По описанной выше структурно-функциональной схеме был проведен габаритный расчет афокальной системы (рис. 8) по следующим формулам:

для видимого увеличения: $\Gamma = \frac{f'_1}{f'_2}$ и $\Gamma = \frac{D}{D'}$, где f'_1 и f'_2 – фокусные расстояния первого и второго объективов соответственно; для длины афокальной системы L: $L = f'_1 + f'_2$.

Расчет был выполнен для приемника диаметром 2,9 мм и для набора апертур входных апертур.



Рис. 8. Афокальная система для согласования размера детали и приемника излучения

Таблица 3

| D , мм | D', мм | f ₁ , мм | $f'_{2},$ MM | Γ, [×] | L, мм |
|---------------|--------|---------------------|--------------|-----------------|--------|
| 20 | 2,9 | 150 | 21,73 | 6,9 | 171,74 |
| 20 | 2,9 | 200 | 28,99 | 6,9 | 228,99 |
| 20 | 2,9 | 250 | 36,23 | 6,9 | 286,23 |
| 20 | 2,9 | 300 | 43,48 | 6,9 | 343,48 |
| 20 | 2,9 | 350 | 50,72 | 6,9 | 400,72 |
| 25 | 2,9 | 150 | 17,4 | 8,62 | 167,4 |
| 25 | 2,9 | 200 | 23,2 | 8,62 | 223,2 |
| 25 | 2,9 | 250 | 29 | 8,62 | 279 |
| 25 | 2,9 | 300 | 34,8 | 8,62 | 334,8 |
| 25 | 2,9 | 350 | 40,6 | 8,62 | 390,6 |
| 25 | 2,9 | 400 | 46,4 | 8,62 | 446,4 |

Результаты габаритного расчета

| 30 | 2,9 | 150 | 14,51 | 10,34 | 164,5 |
|----|-----|-----|-------|-------|--------|
| 30 | 2,9 | 200 | 19,34 | 10,34 | 219,34 |
| 30 | 2,9 | 250 | 24,18 | 10,34 | 274,18 |

Для последующего проектирования были выбраны следующие параметры афокальной системы:

D = 25 мм, $f'_2 = 350$ мм, D' = 2,9 мм, $f'_2 = 40$ мм, $\Gamma = 8,75^{\times}$.

Динамический диапазон ДВФ

Выполнен расчет динамического диапазона ДВФ. Целью данного расчета является определение предельной чувствительности ДВФ, как максимальной стрелки прогиба по оси (рис. 9). Характеристики ДВФ, для которого проводится расчет, указаны в табл. 4.

Таблица 4

| Основные параметры ДВФ | |
|------------------------------------|---------|
| Размер матрицы, мм | 2,9×4,6 |
| Фокусное расстояние микролинзы, мм | 12 |
| Диаметр микролинзы, мкм | 200 |

Параметры ДВФ



Рис. 9. Схема для расчета предельной чувствительности ДВФ: *θ* – максимальный угол отклонения нормали волнового фронта; *l*' - максимальное отклонение от идеального плоского волнового фронта по оси; *f*_л' - фокусное расстояние микролинзы

Путем несложных геометрических преобразований из рис. 10 получим формулу для вычисления радиуса кривизны волнового фронта, приходящего на ДВФ:

$$R=\frac{D_{\rm M}f_{\pi}'}{d}.$$

Зная радиус кривизны, определим стрелку прогиба по известной формуле:

$$l'=R-\sqrt{R^2-\frac{D_{\rm M}^2}{4}}.$$

Итак, численное значение предельной чувствительности ДВФ:

$$l' = D_{\rm M} \left[\frac{f_{\rm A}'}{d} - \sqrt{\frac{f_{\rm A}'^2}{d^2}} - \frac{1}{4} \right] = 2.9 \left[\frac{12}{0.2} - \sqrt{\frac{12^2}{0.2^2}} - \frac{1}{4} \right] = 0.00604 \text{ MM} = 6.04 \text{ MKM}.$$

Рис. 10. Определение максимально возможного отклонения *l*' волнового фронта по оси:

а) максимальное смещение х фокального пятна на крайней микролинзе; б)

определение радиуса кривизны *R* волнового фронта;

d – диаметр микролинзы; $D_{\rm M}$ – диаметр матрицы приемника излучения

Максимальное отклонение по оси детали от плоскостности

Тогда, исходя из расчета динамического диапазона ДВФ, максимально возможное для измерения отклонение по оси контролируемой детали от плоскостности составит (при рассчитанных ранее параметрах афокальной системы):

$$l = l' \Gamma^2 = 6.04177 \cdot 8.75^2 \approx 462 \text{ мкм.}$$

Преимущества и особенности гартманометра

В результате проведенных рассуждений и расчетов проектируемый гартманометр дает следующие преимущества при контроле параметров плоских поверхностей:

1. Отсутствие эталонной поверхности;

- Возможность проведения измерений параметров плоских оптических деталей с отклонением от плоскостности до 462 мкм при одном записанном эталонном волновом фронте;
- 3. Возможность использования лазера с малой длиной когерентности;
- Контроль оптических деталей с различными покрытиями благодаря возможности расширить спектральный диапазон, т.к. нет строгих требований по длине когерентности источника излучения: l_{кг} = ^{λ²}/_{Δλ};
- 5. Возможность работы в ИК-диапазоне;
- 6. Работа с адаптивным эталоном.

Экспериментальные исследования

На основе разработанной структурно-функциональной схемы, изображенной на рис. 2, собран стенд, внешний вид которого представлен на рис. 11.



Рис. 11. Внешний вид экспериментального стенда: 1 – юстировочный лазер: He-Ne лазер; 2 – источник излучения: лазер BOB WFS650; 3 – светоделитель; 4 – объектив, f'_1 =350 мм; 5 – исследуемая поверхность; 6 – точечная диафрагма D_{∂} =20 мкм; 7 – объектив,

f′₂=40 мм; 8 – ДВФ

Осветительная ветвь состоит из волоконного лазера 2, светоделителя 3 и объектива 4, преобразующего падающий на него пучок лучей в параллельный. Для юстировки был использован He-Ne лазер.

Регистрирующая ветвь состоит из согласующей афокальной системы, в которую входит объектив 4 и объектив 7, светоделитель, точечная диафрагма 6 и ДВФ 8. В качестве контролируемой поверхности использовалось эталонное стекло типа РПС, показанное на рис. 12.



Рис. 12. Эталонное пробное стекло

Эксперимент измерения были проведены на интерферометре Zygo PTI 250 и на гартманометре, результаты измерений представлены на рис. 13 и рис. 14 соответственно.



Рис. 13. Результаты измерения параметров формы на интерферометре Zygo PTI 250

| Title: | 21.04.2014 | | | | | Tim | e: 18 | :42:19 |
|--------|------------|-------------------------|--------------------|-------------|---------|-----------|---------------------|-------------------|
| Note: | | | | | | Date | e: 14 | /04/21 |
| Ren | ort # 2 | Wavelength = 650 nm | Waves/Fringe = 0.5 | | | | | |
| P | | Reference file name: 21 | .04.2014.ref | | | | | |
| | | | Ze | rnike P | olynon | nial E× | cpansi | on |
| | | | | | Zernike | e fit: 36 | | |
| | | | (-2.2) | 23) (-3.818 |) 0.001 | -0.014 | -0.003 | -0.010 |
| | | | -0.02 | 4 0.001 | 0.037 | -0.011 | -0.001 | 0.004 |
| | | | -0.00 | 1 0.007 | 0.002 | -0.001 | 0.013 | -0.013 |
| | | | -0.00 | 4 -0.001 | -0.004 | 0.007 | 0.002 | -0.002 |
| | | | 0.01 | -0.005 | 0.006 | 0.000 | 0.005 | 0.001 |
| | | | 0.00 | -0.000 | -0.005 | -0.001 | 0.002 | -0.003 |
| | | | 9 | eidel P | olynon | nial E× | cpansi | on |
| | | | Name | | | Maj (M | gnitude (icrons) | Angle (Degree) |
| | | | Tilt | | | 0 | .051 | -68.20 |

| Mana | | | Magnitude | Angle | |
|----------------|-------------|------------|-----------------|----------|--|
| Name | | | (Microns) | (Degree) | |
| | Tilt | | 0.051 | -68.20 | |
| | Focus | | 0.012 | | |
| | Astigmatism | | -0.028 | 84.49 | |
| | Coma | | 0.077 | 111.80 | |
| | Spherical | | 0.005 | | |
| Wavefront Data | | | | | |
| | P-V: 0.113 | RMS: 0.020 | Fit Error: 0.01 | 18 | |

Рис. 14. Результаты измерения на гартманометре

Приведенные результаты получены по 15 реализациям, и достигнута достаточная сходимость экспериментальных результатов двух методов: при контроле на интерферометре отклонение детали от плоскостности составило 0,1 λ по параметру PV, а при измерениях на гартманометре – 0,113 λ по параметру PV. При рабочей длине волны λ = 650 нм отклонение составляет 0,065 мкм. В то время как по выпускному аттестату проконтролированное зеркало имеет отклонение от плоскостности 0,07 мкм.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- Проведен габаритный расчет афокальной системы, согласующей размер детали и размер приемника излучения. Даны следующие рекомендации по конструктивным особенностям оптических элементов системы: D=25 мм, f'₁ = 350 мм, D' = 2,9 мм, f'₂ = 40 мм;
- Выполнен расчет предельной чувствительности ДВФ (при диаметре микролинзового растра 2,9 мм, фокусном расстоянии микролинзы 12 мм, диаметре микролинзы 200 мкм): Δ*l*′=6 мкм;
- Определено максимально возможное для измерения отклонение от плоскостности поверхности детали при одном записанном эталонном волновом фронте: ∆*l*=462 мкм;
- 4. Рассмотрен алгоритм и принцип работы системы;
- Получены экспериментальные результаты измерения эталонного пробного стекла на интерферометре Zygo PTI 250 и гартманометре, обладающие удовлетворительной сходимостью.

Список литературы

- Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения: Учебник для вузов по специальностям «Оптико-электронные приборы» и «Технология оптического приборостроения» / под ред. Д.Т. Пуряева. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
- Пуряев Д.Т., Лазарева Н.Л., Иконина А.В. Оптические системы двухлучевых интерферометров: Учебное пособие / под ред. Д.Т. Пуряева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 24 с.

- Берченко Е.А., Калинин Ю.А., Киселев В.Ю., Полынкин М.А., Прилепский Б.В., Филатов А.С. Датчики волнового фронта // Лазерно-оптические системы и технологии. 2009. С. 64-69.
- 4. Адаптивная оптическая система для коррекции излучения лазера. Техническое описание, инструкции пользователя, 2012. 70 с.
- 5. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2010. 304 с.
- Zavalova V.Ye., Kudryashov A.V. Shack-Hartmann wavefront sensor for laser beam analyses. Proc. SPIE 4493, High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications III, 2002. DOI: 10.1117/12.454723.