

НЕРАВНОПЛЕЧИЙ ИК-ИНТЕРФЕРОМЕТР ТВАЙМАНА–ГРИНА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ НА СТАДИИ ШЛИФОВАНИЯ

© 2010 г. М. А. Абдулкадыров*, канд. техн. наук; Н. В. Барышников**, канд. техн. наук;
Д. Г. Денисов**, И. В. Животовский**, канд. техн. наук;
В. Е. Карасик**, доктор техн. наук; А. П. Семенов*, канд. техн. наук; Ю. А. Шаров*

* ОАО “Лыткаринский завод оптического стекла”, г. Лыткарино, Московская обл.

** Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: lastro@mtsmail.ru

Разработан неравноплечий интерферометр Тваймана–Грина с рабочей длиной волны излучения 10,6 мкм, позволяющий помимо контроля формы измерять параметры микрорельефа контролируемых шлифованных оптических поверхностей, по контрасту изображения регистрируемых интерференционных картин. Получено аналитическое выражение, связывающее значение контраста с основной характеристикой микронеровностей – среднеквадратическим отклонением высот микропрофиля шероховатых поверхностей. Представлен результат погрешности измерения формы контролируемой оптической поверхности в процессе ее формообразования, по данным топографической карты, полученной на основании регистрируемого изображения интерференционной картины. Приведены основные технические характеристики системы интерферометрического контроля.

Ключевые слова: телескопы, обработка оптики, оптический контроль, асферика, ИК-интерферометры.

Коды OCIS: 220.0220, 220.0230, 220.4610, 350.1260

Поступила в редакцию 04.05.2010

Высокоточное изготовление крупногабаритных оптических деталей требует постоянного оперативного контроля их поверхностей на всех стадиях технологической обработки, в том числе на стадиях шлифования. При этом значительно сокращается время технологического цикла изготовления оптических деталей и объем трудозатрат на их изготовление, поскольку местные ошибки изготовления устраняются на стадии шлифования перед полированием.

Интерферометры, работающие в видимом оптическом диапазоне, нельзя использовать для контроля поверхности на стадии шлифования из-за рассеяния излучения на шероховатых поверхностях, приводящего к разрушению пространственной когерентности и, как следствие, к низкому качеству интерференционного изображения.

В ОАО ЛЗСО для контроля шлифованных поверхностей использовали ИК-интерферометры [1–2]. С их помощью получались интерферограммы отраженного от поверхности волнового фронта, по ним строилась карта отклонений поверхности от требуемой формы и выполнялась

программно-управляемая локальная обработка поверхности шлифовальными инструментами. Недостатком данных интерферометров было отсутствие четкой и резкой интерференционной картины, слабое разрешение и быстрое действие из-за устаревшей элементной базы, не дающей требуемых в настоящее время параметров интерференционного контроля. С целью перехода на новую, современную элементную базу, а также с целью расширения функциональных возможностей ИК-интерферометра, включая разработку нового программного обеспечения, был создан новый ИК-интерферометр.

Разработанный ИК-интерферометр, работающий на длине волны 10,6 мкм, может применяться как для контроля формы оптической шлифованной поверхности на стадии ее формообразования, так и для определения величины среднеквадратического отклонения (СКО) высот микронеровностей контролируемой шлифованной поверхности.

В данной работе предложена модифицированная схема неравноплечевого интерферометра

Тваймана–Грина, т. е. функциональная схема с дополнительным реперным лазером и спектральным светоделителем (рис. 1), содержащая 4 рабочих ветви: осветительную, эталонную, измерительную, регистрирующую.

Регистрирующая ветвь интерферометра служит для наблюдения, регистрации и анализа интерференционной картины с целью определения формы контролируемой поверхности по кривизне интерференционных полос и оценки качества контролируемой поверхности (степени шероховатости) по контрасту регистрируемого изображения. В качестве фотоприемного устройства используется микроболометрическая матрица на основе аморфного кремния, которая обладает высокой чувствительностью на длине волны 10,6 мкм менее 0,08 °С, большим числом элементов (не менее 320×240) для

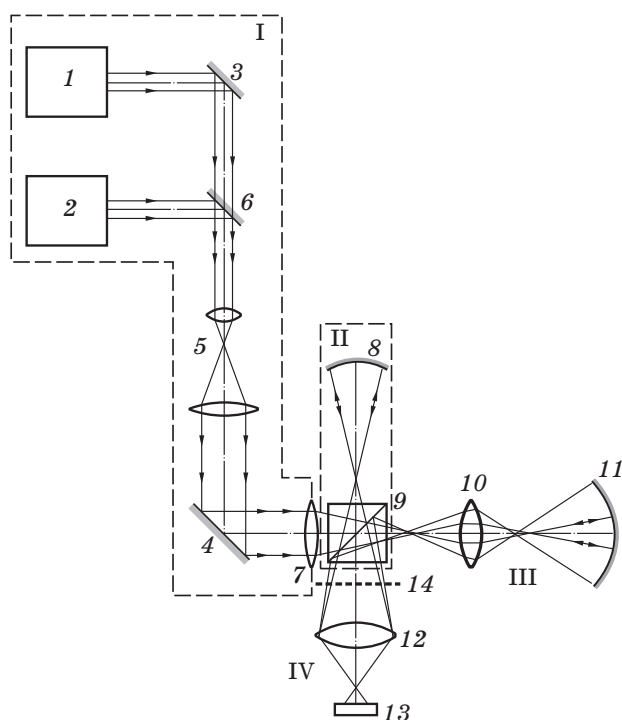


Рис. 1. Функциональная оптическая схема неравноплечего ИК-интерферометра с горизонтальной измерительной ветвью. I – осветительная ветвь: 1 – CO₂-лазер, 2 – He-Ne-лазер реперного канала, 3, 4 – наклонные зеркала, 5 – телескопическая система, 6 – зеркальная система ввода излучения, 7 – фокусирующий объектив. II – эталонная ветвь: 8 – эталонное сферическое зеркало, 9 – светоделительный кубик. III – измерительная ветвь: 10 – компенсатор волнового фронта, 11 – контролируемая деталь. IV – регистрирующая ветвь: 12 – объектив сопряжения, 13 – болометрическая камера, 14 – изображение диафрагмы контролируемого зеркала 11 (полевая диафрагма).

обеспечения хорошей детализации регистрируемой интерференционной картины, отсутствием дорогих и сложных систем охлаждения, малыми габаритами и низким энергопотреблением.

Источник излучения в измерительной ветви формирует лазерный пучок с соответствующей кривизной поверхности волнового фронта. Далее сферический волновой фронт трансформируется компенсатором (10) таким образом, что вся совокупность лучей, выходящих из него, полностью совпадает с нормальными к контролируемой асферической поверхности. После отражения волнового фронта от контролируемой поверхности (11), он вновь проходит компенсатор, на выходе из которого преобразуется в сферический волновой фронт с комплексной амплитудой $U_s(x, y)$. В эталонной ветви формируется сферическая волна, отраженная от эталонного зеркала, с комплексной амплитудой $U_0(x, y)$.

Электромагнитное поле, рассеянное шлифованной поверхностью $U_s(x, y)$, является случайным, поскольку отражается от поверхности со случайным микропрофилем, поэтому при определении среднего значения интенсивности необходимо провести статистическое усреднение по ансамблю шероховатых поверхностей. Результат интерференции двух сферических волн: $U_0(x, y)$ от эталонного зеркала и $U_s(x, y)$ от контролируемой шлифованной поверхности можно записать в виде:

$$U_{\Sigma} = U_s + U_0 = \frac{u_s}{r}(r) \times \exp\{-i(\varphi(x, y) + \varphi_h(x, y))\} + \frac{u_0}{r_0} \exp\{-i\varphi_0(x, y)\}, \quad (1)$$

где u_s – амплитуда сферической волны, отраженной от контролируемой шлифованной оптической поверхности, u_0 – амплитуда сферической волны, отраженной от эталонной (идеальной) оптической поверхности, r – радиус кривизны сферической волны, отраженной от контролируемой шлифованной (шероховатой) оптической поверхности, r_0 – радиус кривизны сферической волны, отраженной от эталонной (идеальной) оптической поверхности, $\varphi(x, y)$ – фаза сферической волны, отраженной от контролируемой (идеальной) поверхности, $\varphi_h(x, y)$ – случайный фазовый набег при отражении электромагнитной волны от шлифованной поверхности, обусловленный статистически случайным микропрофилем оптической поверхности с параметром микронеровности h , $\varphi_0(x, y)$ – фаза сферической волны, отраженной от эталонной поверхности.

Выражение для среднего значения распределения интенсивности в пределах интерференционных колец в параксиальном приближении в соответствии с (1) запишется в виде:

$$\langle I(x, y) \rangle = \langle |U_{\Sigma}|^2 \rangle = 2 \cdot \left[1 + \exp \left(-8\pi^2 \cdot \left(\frac{\sigma_h}{\lambda} \right)^2 \right) \times \right. \\ \left. \times \cos \left[2 \left[\frac{\pi(R - R_0)}{\lambda} + \frac{\pi(x^2 + y^2)}{2\lambda} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \right] \right] \right], \quad (2)$$

где $\langle \rangle$ – обозначает статистическое усреднение по ансамблю оптических шлифованных (шероховатых) поверхностей.

При получении аналитического решения (2) необходимо было определить поле, рассеянное ансамблем шероховатых оптических поверхностей $\langle u_s(x, y) \rangle$, что в свою очередь требует нахождения статистических характеристик: распределения плотности вероятности высот микронеровностей профиля шероховатой оптической поверхности, радиуса корреляции профиля шероховатой оптической поверхности ρ_k , СКО высот микронеровностей шероховатой поверхности σ_h . Кроме того, следует для каждого типа шероховатости определить средний радиус кривизны микронеровностей:

$$R_{кр} = l_{кор}^2 / h(x, y) = l_{кор}^2 / R_a, \quad (3)$$

где $l_{кор} = 2\rho_k$ – длина корреляции микропрофиля оптической шероховатой поверхности, R_a – сред-

нее арифметическое отклонение микропрофиля оптической шероховатой поверхности (высотный параметр).

С помощью профилометра – профилографа “Surfcorder 1700α” были измерены профили ряда оптических шероховатых поверхностей, соответствующие стадиям грубого, средне-грубого и среднего шлифований, обработанные абразивными микропорошками № 4, М40 и М28 соответственно.

На рис. 2 показаны семейства кривых распределений плотностей вероятностей высот микронеровностей и графики корреляционных функций профилей контролируемых поверхностей, позволяющие определить радиусы корреляции для соответствующих оптических шероховатых поверхностей. Результаты измерений статистически усредненных величин для соответствующих шлифованных (шероховатых) поверхностей приведены в табл. 1.

Проведенный анализ показал, что распределения плотностей вероятностей высот микронеровностей профилей шлифованных (шероховатых) поверхностей контролируемых деталей близки к нормальному закону распределения (рис. 2б) для всех образцов шлифованных поверхностей. Микронеровности контролируемых поверхностей обладают значительными протяженностями и большими по сравнению с длиной волны λ падающего излучения радиусами кривизны (плавностью).

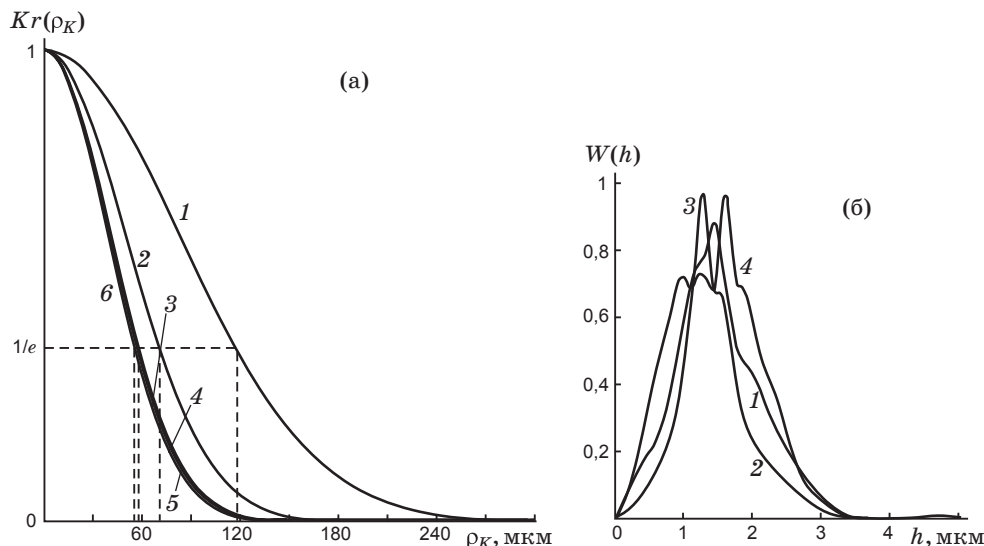


Рис. 2. Графики: а – корреляционных функций профилей шероховатых оптических поверхностей, обработанных: 1) полирующим порошком Regipol 990, 2) абразивным микропорошком М14, 3) абразивным микропорошком М28, 4) абразивным микропорошком М40, 5) абразивным шлифпорошком № 4, 6) абразивным шлифпорошком № 5. б – распределения плотностей вероятностей высот микронеровностей для профилей контролируемых шероховатых оптических поверхностей, обработанных: 1) абразивным шлифпорошком № 5, 2) абразивным шлифпорошком № 4, 3) абразивным микропорошком М28, 4) абразивным микропорошком М40.

Таблица 1. Статистические параметры шероховатых оптических поверхностей

№	Шлифующие абразивные порошки	Средний размер зерна, мкм	R_a , мкм	σ_h , мкм	ρ_K , мкм
Стадия грубого шлифования					
1	№ 5	57	1,3	1,61	55
2	№ 4	47	1,2	1,49	57
Стадия среднегрубого шлифования					
3	M40	32	0,72	0,9	60
Стадия среднего шлифования					
4	M28	18	0,64	0,8	67
Стадия тонкого шлифования					
5	M14	12	0,62	0,78	70
6	M10	6,5–7	0,56	0,7	80
Стадия полирования					
7	Полирит	≈0,5	0,004	—	117

Примечание. σ_h – СКО высот микронеровностей шероховатой поверхности, ρ_K – радиус корреляции.

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить возможность применения для нахождения поля, рассеянного шероховатыми поверхностями, метода Кирхгофа. Для этого должны выполняться следующие условия [3]:

$$\begin{aligned}
 l_K^2 &= (2 \cdot \rho_K)^2 \gg \sigma_h^2 - \text{условие пологости} \\
 l_K &= (2 \cdot \rho_K) \gg \lambda - \text{условие протяженности} \\
 &(\text{крупномасштабности) поверхности} \\
 \frac{2\pi}{\lambda} \cdot R_{кр} \cdot \cos \Theta_{\text{ПАД}} &\gg 1 - \text{условие плавности,}
 \end{aligned} \quad (4)$$

где σ_h – СКО высотного параметра на оптической шероховатой поверхности, l_K – характерный продольный размер микронеровности (длина корреляции), ρ_K – радиус корреляции, $R_{кр}$ – радиус

кривизны микронеровности, $\cos \Theta_{\text{ПАД}}$ – косинус угла падения, λ – длина волны электромагнитного излучения.

Из данных табл. 2 следует, что все указанные условия (4) выполняются для исследуемых поверхностей, поэтому для последующего анализа используется модельное представление Кирхгофа.

В рамках принятой модели шлифованные поверхности представляются в виде набора плоских площадок (модель фасеточной структуры) [3–4] касательных к вершине в каждой точке поверхности со случайным распределением наклонов, а волновое поле в каждой точке такой поверхности вычисляется в виде суммы падающего и отраженного электромагнитных полей.

Таблица 2. Условия применимости метода Кирхгофа для шлифованных оптических поверхностей на различных стадиях технологической обработки

Шлифующие абразивные порошки	$l_K^2 = (2 \cdot \rho_K)^2 \gg \sigma_h^2$	$l_K = (2 \cdot \rho_K) \gg \lambda$	$2\pi \cdot R_{кр} \cdot \cos \Theta_0 \gg \lambda$
Стадия грубого шлифования			
№ 5	12 100 \gg 2,5921	110 \gg 10,6	6,28·7100 \gg 10,6
№ 4	12 996 \gg 2,22	114 \gg 10,6	6,28·7810 \gg 10,6
Стадия среднегрубого шлифования			
M40	14 400 \gg 0,81	120 \gg 10,6	6,28·13 019,9 \gg 10,6
Стадия среднего шлифования			
M28	17 956 \gg 0,64	134 \gg 10,6	6,28·16 672 \gg 10,6
Стадия тонкого шлифования			
M14	19 600 \gg 0,6084	140 \gg 10,6	6,28·19 918,7 \gg 10,6
M10	25 600 \gg 0,16	160 \gg 10,6	6,28·42 666 \gg 10,6

С помощью метода Кирхгофа в приближении фазового экрана [3–4] определена аналитическая зависимость контраста интерференционной картины от СКО высот микронеровностей контролируемых шлифованных оптических поверхностей в соответствии с (2):

$$C = \frac{\langle I(x, y)_{\max} \rangle - \langle I(x, y)_{\min} \rangle}{\langle I(x, y)_{\max} \rangle + \langle I(x, y)_{\min} \rangle} = \exp\left(-8 \cdot \pi^2 \cdot (\sigma_h / \lambda)^2\right), \quad (5)$$

где $\langle I(x, y)_{\max} \rangle$ и $\langle I(x, y)_{\min} \rangle$ – максимальное и минимальное средние значения распределения интенсивности в интерференционных кольцах в плоскости наблюдения, σ_h – СКО высотного параметра на оптической шероховатой поверхности, λ – длина волны лазерного излучения, $\langle \rangle$ – статистическое усреднение по ансамблю поверхностей одного класса.

На основе (5) предложен и обоснован метод определения параметров микронеровностей шлифованных оптических поверхностей по измерению контраста регистрируемых интерференционных картин. Особенностью предложенного метода является возможность измерения степени шероховатости не только плоских, но и вогнутых шлифованных и полированных оптических поверхностей.

На рис. 3 приведена зависимость контраста интерференционной картины от отношения СКО высот микронеровностей к длине волны лазерного излучения σ_h / λ , построенная в соответствии с выражением (5).

Из рис. 3 видно, что с увеличением параметра микронеровностей контролируемых шлифованных оптических поверхностей, т. е. на стадиях грубого шлифования ($\sigma_h / \lambda = 0,14$), контраст

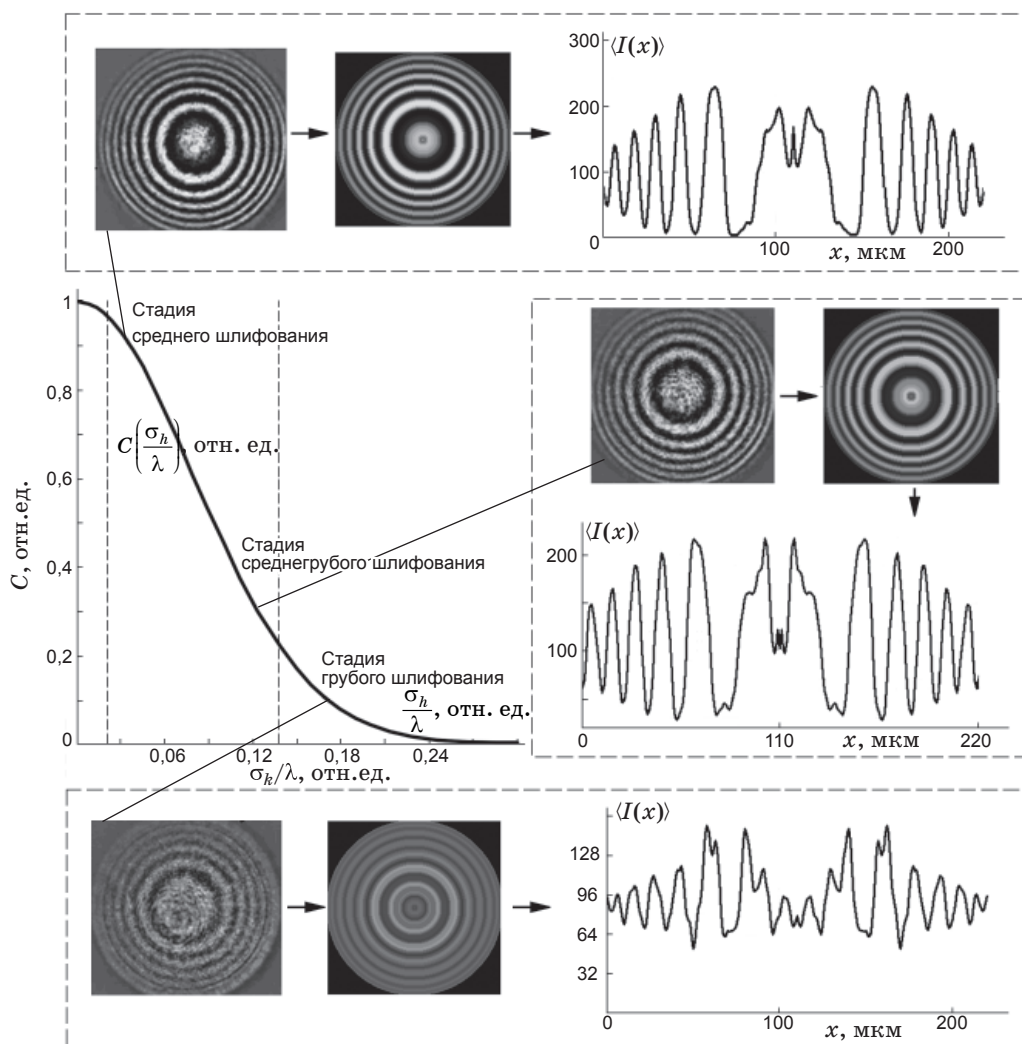


Рис. 3. График зависимости контраста интерференционной картины (для нормального распределения СКО высот микронеровностей шероховатой поверхности) от параметра σ_h / λ на стадиях среднего, средне-грубого и грубого шлифований.

регистрируемых изображений интерферограмм меньше предельно допустимой величины 0,3, обусловленной принятым алгоритмом обработки и расшифровки интерферограмм.

В результате рекомендовано осуществлять начальный интерференционный контроль формы поверхности на стадии среднегрубого шлифования при использовании абразивного шлифовального порошка М40, когда величина σ_h/λ не превышает 0,09, а контраст регистрируемой интерференционной картины достигает уровня 0,4–0,5.

В результате проведенных интерферометрических измерений формы шлифованных оптических поверхностей, обработанных абразивными порошками № 4, М40, М28, были получены интерференционные изображения (рис. 3), по контрасту которых в соответствии с (5) были определены величины СКО высот микронеровностей контролируемых поверхностей – σ_h .

Из-за случайного характера распределения микронеровностей контролируемых поверхностей использовалось усреднение по 50 интерференционным изображениям. В результате были найдены распределения средних значений интенсивностей в пределах интерференционных колец и величины контраста в интерференционных картинах при контроле шлифованных оптических поверхностей, обработанных абразивными порошками № 4, М40, М28 с использованием разработанного макетного образца неравноплечего ИК-интерферометра Тваймана–Грина.

Полученные значения величин СКО высот микронеровностей были сопоставлены с результатами измерений, проведенными на профилометре – профилографе “Surfcorder 1700α” для соответствующих шлифованных оптических

поверхностей (табл. 1), и результаты сравнения представлены в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что значения среднеквадратических величин параметров микронеровностей, измеренных на профилометре – профилографе, хорошо согласуются со среднеквадратическими значениями параметров микронеровностей, найденных в результате интерферометрического контроля шлифованных оптических поверхностей, при помощи созданного макетного образца ИК-интерферометра.

Полученные результаты также хорошо соотносятся с результатами, полученными в работах [5–6].

Исходные данные о форме контролируемой оптической поверхности в процессе ее формообразования формируются в результате регистрации изображений интерференционных картин (рис. 3) при помощи микроболометрической матрицы, сигнал с которой передается на ЭВМ. На основе алгоритма автоматизированной обработки строится топографическая карта поверхности или топографическая сетка оптической детали, которая представляет собой геометрическую модель волновой аберрационной функции, задающую удвоенное отклонение формы контролируемой сферической (асферической) поверхности от ближайшей сферы сравнения с помощью введения уровней квантования волновой аберрации на элементарных квадратных обрабатываемых участках.

В случае интерференционного контроля асферической поверхности отраженный от нее волновой фронт предварительно преобразуется при помощи компенсатора волнового фронта (поз. 10, рис. 1) в сферический.

Разбиение поверхности детали на элементарные квадратные обрабатываемые участки позво-

Таблица 3. Результаты измерений СКО высот микронеровностей шлифованных оптических поверхностей

Шлифующие абразивные порошки	Средний размер зерна, мкм	СКО высот микропрофиля, мкм (профилометр)	СКО высот микропрофиля, мкм (интерферометр)	Δ_σ , %	C , отн.ед.
Стадия грубого шлифования					
№ 4	47	1,49	1,47	1,3	0,216
Стадия среднегрубого шлифования					
М40	32	0,9	0,87	3	0,634
Стадия среднего шлифования					
М28	18	0,8	0,76	5	0,8

Примечание. Δ_σ – относительная погрешность измерения СКО высот микронеровностей, в %; C – величина контраста изображения регистрируемой интерференционной картины.

ляет получить полную информацию как о форме поверхности, так и о профиле съема в результате перехода от координатной к топографической сетке.

Созданный алгоритм автоматизированной обработки интерферограмм контролируемой поверхности используется в дальнейшем при разработке технологического процесса автоматизированного формообразования для количественной оценки качества формы поверхности и задания припуска на обработку, а также позволяет одновременно устранять все виды ошибок (зональные, локальные, астигматизм) на поверхности оптической детали.

В данной работе при помощи разработанной системы интерферометрического контроля был

проведен ряд измерений формы поверхности контролируемой оптической детали, обработанной на стадии среднегрубого шлифования и при помощи автоматизированной системы обработки по ансамблю интерферограмм построена топографическая карта поверхности. Показано, что СКО отраженного волнового фронта от контролируемой поверхности оптической детали составило $0,03\lambda$.

На рис. 4 показаны топографическая карта и вид интерференционных полос соответствующих данной карте для контролируемой оптической поверхности.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что предложенная система интерферометрического контроля крупногабаритных оп-

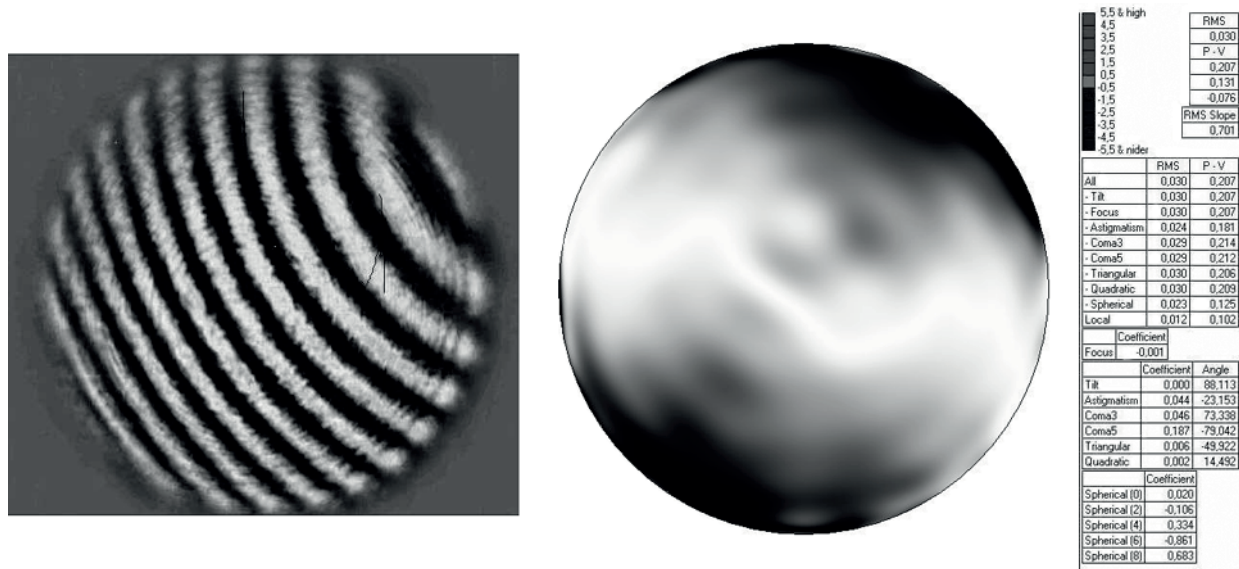


Рис. 4. Изображение полученной интерференционной картины и соответствующая топографическая карта поверхности контролируемой оптической детали на стадии среднегрубого шлифования.

Таблица 4. Основные технические характеристики разработанного неравноплечего интерферометра Тваймана–Грина

Характеристика	Значение характеристики
Длина волны, мкм	$\lambda = 10,6$
Относительное отверстие формирующего объектива	1:2,1:3,1:4
Тип матричного фотоприемника/число элементов	IR112/384×288 THERMAL-EYE 300D/320×240
Погрешность измерения формы поверхности – СКО, мкм	$<0,03\lambda$
Погрешность измерения параметра микронеровности шлифованной оптической поверхности – $\sigma_h = R_a$, мкм относительно измерения профилометра–профилографа	$<11\%$
Габаритные размеры, мм	700×400×500
Масса, кг	50

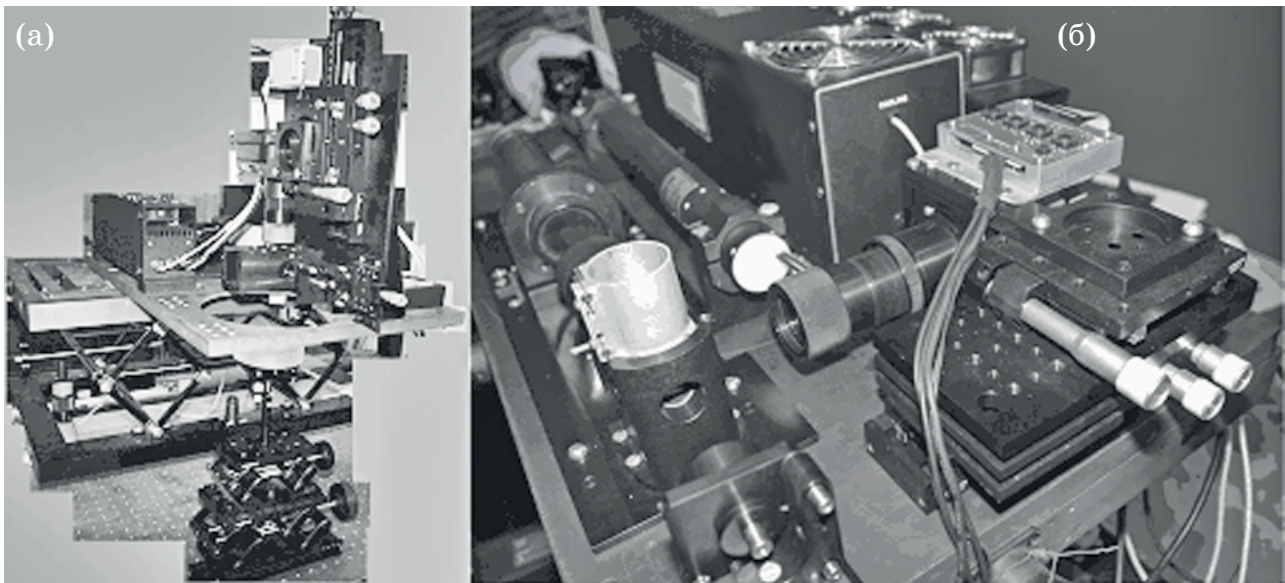


Рис. 5. Внешний вид неравноплечего ИК-интерферометра Тваймана–Грина. а – вертикального контроля, б – горизонтального контроля.

тических поверхностей на стадии шлифования, позволяет контролировать с высокой точностью не только форму оптической поверхности, но и определять среднеквадратические отклонения высот микронеровностей от базовой плоскости (табл. 3). Необходимо также отметить, что разработанный неравноплечий интерферометр Тваймана–Грина позволяет оценить шероховатость крупногабаритных вогнутых (сферических и асферических) оптических поверхностей, что невозможно реализовать контактными методами, в частности профилометрами – профилографами.

В табл. 4 приведены основные технические характеристики разработанного неравноплечего ИК-интерферометра Тваймана–Грина, а на рис. 5 представлен его внешний вид.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V.,*

Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4451. P. 131–137.

2. *Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov F.V., Semenov A.P., Sharov Y.A., Atad-Ettengui E., Egan I., Bennet R.J., Craig S.C.* M1 and M2 mirrors manufacturing for VISTA telescope // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5494. P. 374–381.

3. *Басс Ф.Г., Фукс И.И.* Рассеяние волн на статистической неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.

4. *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука. Часть II. Случайные поля. 1966. 404 с.

5. *Osuk Kwon, Wyant J.C., Hayslett C.R.* Rough surface interferometry at 10,6 мк // *Appl. Opt.* 1980. V. 19. № 11/1.

6. *Sinha J.K., Tippur H.V.* Infrared interferometry for rough surface measurements: application to failure characterization and flaw detection // *Opt. Eng.* 1997. V. 36. № 8. P. 2233–2239.