

УДК 535-15; 535.4; 681.7.02-04; 681.787

Д. Г. Денисов, В. Е. Карасик

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СПЕКЛ-СТРУКТУРЫ
НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ
ПРИ КОНТРОЛЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАДИЯХ
ШЛИФОВАНИЯ**

Исследованы статистические характеристики поля, рассеянного контролируемой шероховатой оптической поверхностью, и определены выражения для контраста спекл-структуры в зависимости от степени монохроматичности излучения лазера ИК интерферометра.

Предложен способ частичного подавления спекл-структуры в регистрируемых изображениях, основанный на использовании пространственной фильтрации и операции усреднения по ансамблю сечений, проходящих через энергетический центр тяжести отфильтрованных изображений.

Приведены результаты экспериментальных исследований макетного образца лазерного ИК интерферометра, построенного по модифицированной функциональной схеме Тваймана–Грина, с рабочей длиной волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм и сформулированы рекомендации по выбору его элементной базы.

E-mail: denisovdg@bmstu.ru

Ключевые слова: крупногабаритная и шероховатая оптические поверхности, модель фазового экрана, спекл-структура, контраст интерференционных колец, когерентность лазерного излучения, цифровая фильтрация изображения.

Изготовление оптической поверхности крупногабаритного зеркала связано с серьезными технологическими трудностями, так как при размерах рабочей поверхности несколько десятков квадратных метров допустима погрешность формы зеркала, не превышающая нескольких сотых длины волны света.

Решение этой задачи достигается в процессе оперативного контроля изготавливаемой поверхности на всех стадиях обработки, причем финишный контроль осуществляется на стадиях полирования высокоточными интерференционными методами.

В последнее время были предприняты попытки использования лазерных интерференционных методов контроля формы поверхности зеркал на стадиях шлифования, так как в этом случае достигается существенное снижение трудозатрат.

При реализации указанных методов не удастся использовать интерферометры, работающие в видимой области спектра, из-за сильного рассеяния излучения на шероховатых поверхностях, вызывающего разрушение пространственной когерентности излучения и, как следствие, низкое качество интерференционной картины. В результате появились сообщения [1–3] о создании лазерных ИК интерферометров, у которых длина волны рабочего излучения существенно превышает значение микронеровности шлифованной оптической поверхности. При этом удастся получить качественную интерференционную картину.

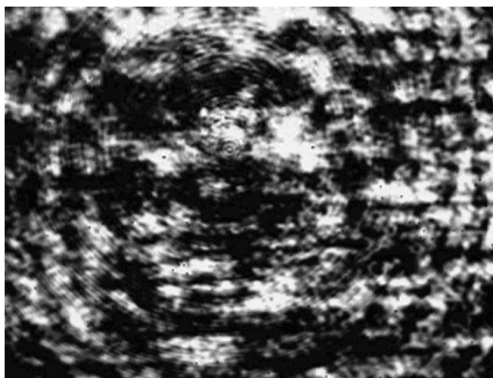


Рис. 1. Интерференционная картина, зашумленная спекл-структурой

Вместе с тем в указанных работах отмечалось, что качество зарегистрированных интерференционных картин во многих случаях было недостаточно высоким, в первую очередь, из-за сильного влияния спекл-структуры, формирующейся при отражении лазерного излучения от шероховатой поверхности.

Интерференционная картина, формируемая при контроле шлифованной оптической поверхности имеет специфику, связанную с рассеянием когерентного лазерного излучения на шероховатой поверхности и, как следствие, с возникновением спекл-структуры (рис. 1). Спекл-структура в изображающей плоскости интерферометра проявляется в виде случайных флуктуаций интенсивности и ухудшает качество изображения регистрируемой интерферограммы.

Для оценки влияния формируемой спекл-структуры на качество регистрируемого интерференционного изображения необходимо оценить ее контраст, под которым принято понимать отношение среднеквадратического значения флуктуаций интенсивности в спекл-картине к среднему значению интенсивности в пределах интерференционных колец [4, 5].

При определении контраста спекл-структуры необходимо найти статистическое распределение высот микронеровностей (параметров шероховатости) на шлифованной оптической поверхности. Для этого были измерены профили оптических шероховатых поверхностей плоских образцов, обработанных абразивными шлифующими порошками различных фракций от № 4 (используемого на стадии грубого шлифования) до М10 (используемого на стадии тонкого шлифования) [1, 2]. Измерения проводились с помощью профилометра-профилографа,

обеспечивающего требуемую точность измерений профилей оптических поверхностей. На основе экспериментальных данных установлено, что закон распределения плотностей вероятностей высот микронеровностей профилей контролируемых поверхностей хорошо аппроксимируется нормальным законом распределения, что, в свою очередь, позволило определить значения среднеквадратических отклонений (СКО) высот микронеровностей σ_h .

Этот вывод позволил, используя модель случайного фазового экрана с нормальным распределением неоднородностей (высот микронеровностей) [4–7] для монохроматического падающего лазерного излучения, получить выражение для контраста спекл-структуры:

$$C_{SM} = \sigma_I / \langle I \rangle = \sqrt{1 - \exp(2((4\pi/\lambda)^2 \sigma_h^2))}, \quad (1)$$

где σ_I — среднеквадратическое значение флуктуаций интенсивности; $\langle I \rangle$ — среднее значение интенсивности в пределах интерференционных колец; $k = 2\pi/\lambda$ — модуль волнового вектора; σ_h — СКО высот микронеровностей на оптической шероховатой поверхности.

На рис. 2 показана зависимость контраста спекл-структуры от отношения σ_h/λ (для $\lambda = 10,6$ мкм), построенная в соответствии с выражением (1) при условии монохроматичности лазерного излучения.

Анализ графика показывает, что на стадиях среднегрубого (абразивный шлифовальный порошок М40, $\sigma_h/\lambda = 0,08$) и грубого (абра-

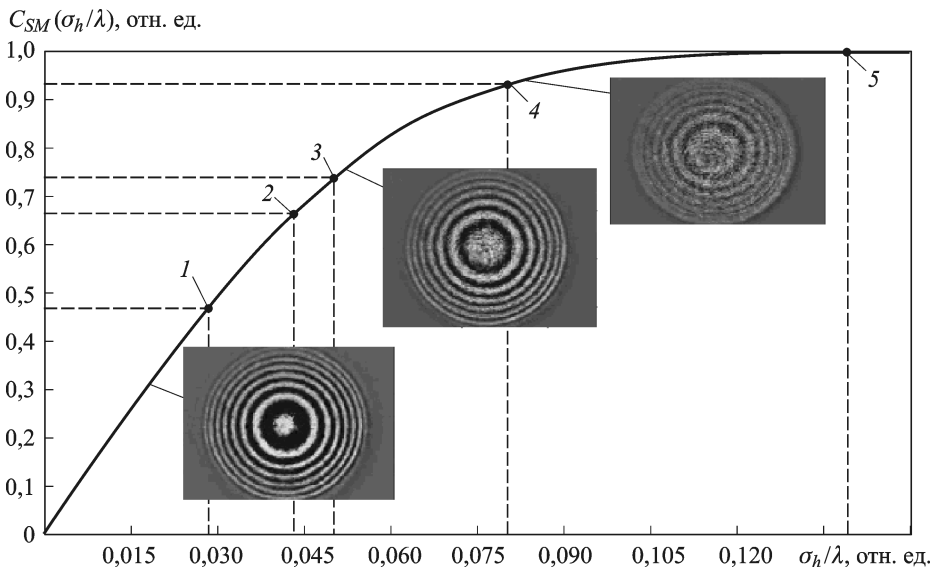


Рис. 2. График зависимости контраста спекл-структуры в интерференционной картине от параметра σ_h/λ :

1 — полирующий порошок Regipol 990; 2 — абразивный микропорошок М10; 3, 4 и 5 — соответственно абразивный микропорошок М28 ($\sigma_h/\lambda \approx 0,05$; $C_{SM}(\sigma_h/\lambda) \approx 0,7$); М40 ($\sigma_h/\lambda \approx 0,08$; $C_{SM}(\sigma_h/\lambda) \approx 0,9$) и шлифовальный порошок № 4 ($\sigma_h/\lambda \approx 0,14$; $C_{SM}(\sigma_h/\lambda) \approx 0,999$)

зивный шлифовальный порошок № 4, $\sigma_h/\lambda = 0,14$) шлифований, контраст спекл-структуры близок к единице. Несмотря на это, контраст интерференционной картины достигает уровня 0,3–0,4 [1], что достаточно для обработки и расшифровки интерферограмм. Это означает, что уже на стадии среднегрубого шлифования можно начинать процесс интерференционного контроля.

Другая особенность проявления спекл-структуры в интерференционном изображении связана с зависимостью ее контраста от временной когерентности лазерного излучения. Ее можно получить, используя модель амплитудно-фазового экрана [4–7], определив расчетное значение контраста спекл-структуры для квазимонохроматического источника излучения:

$$C_{SQ} = \frac{C_{SM}}{\sqrt[4]{1 + 2\pi^2(\Delta\nu/\nu_0)^2(\sigma_h/\lambda)^2(\cos \Theta_0 + \cos \Theta_i)^2}}, \quad (2)$$

где C_{SM} — контраст спекл-структуры при абсолютно монохроматическом излучении; $\Delta\nu = c/l_{\text{кг}}$ — ширина линии излучения лазерного источника по уровню $1/e^2$; $l_{\text{кг}}$ — длина когерентности лазерного излучения; c — скорость света; $\nu_0 = c/\lambda$ — центральная частота лазерного излучения, соответствующая длине волны λ ; σ_h — СКО высотного параметра на оптической шероховатой поверхности; Θ_0, Θ_i — углы падения и отражения лазерного излучения от поверхности профиля оптической шероховатой поверхности.

На рис. 3 приведены графики, показывающие зависимость контраста спекл-структуры в интерференционном изображении от ширины линии излучения лазерного источника $\Delta\nu$ при различных размерах ми-

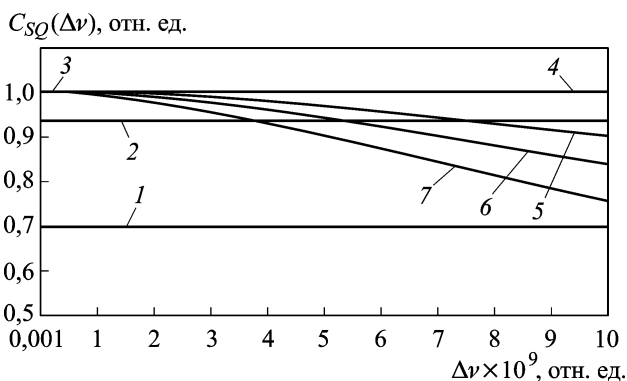


Рис. 3. Зависимости контраста спекл-структуры в интерференционном изображении от ширины линии излучения лазерного источника при контроле шлифованных поверхностей, обработанных абразивными порошками:

1 — M28, $\sigma_h = 0,8$ мкм; 2 — M40, $\sigma_h = 0,9$ мкм; 3 — № 4, $\sigma_h = 1,49$ мкм; 4 — $\sigma_h = 1000$ мкм; 5 — $\sigma_h = 5000$ мкм; 6 — $\sigma_h = 7000$ мкм; 7 — $\sigma_h = 10000$ мкм

кронеровностей контролируемых шлифованных оптических поверхностей, построенные в соответствии с уравнением (2).

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что для оптических поверхностей с размером высот микронеровностей порядка единиц микрон контраст спекл-структуры будет всегда близок к единице, тогда как для грубых оптических поверхностей с высотами микронеровностей, близкими к единицам миллиметров и более, контраст спекл-структуры существенно уменьшается с увеличением спектральной ширины линии излучения $\Delta\nu$ лазерного источника осветительной ветви.

Для проведения измерений на трассах больших протяженностей, характерных при контроле крупногабаритной оптики в производственных помещениях, требуется длина когерентности от 30 до 100 м. Вместе с тем высокая временная когерентность лазерного источника излучения приводит не только к повышению контраста спекл-структуры в формируемом интерференционном изображении, но и к ухудшению видности (контраста) интерференционного изображения.

Контраст интерференционных колец описывается выражением

$$K = \frac{\langle I_{\max} \rangle - \langle I_{\min} \rangle}{\langle I_{\max} \rangle + \langle I_{\min} \rangle}, \quad (3)$$

где $\langle I_{\max} \rangle$, $\langle I_{\min} \rangle$ — максимальное и минимальное средние значения интенсивности в пределах интерференционных колец.

Поскольку микрорельеф контролируемых оптических шероховатых поверхностей носит случайный характер, то для нахождения интенсивности результирующего интерференционного поля необходимо провести статистическое усреднение по ансамблю шероховатых поверхностей (ансамблю поверхностей различных зеркал).

Проводя статистическое усреднение по ансамблю поверхностей одного класса, используя модель случайного фазового экрана [7], получаем выражение для среднего значения интенсивности в пределах интерференционных колец:

$$\langle I(\Delta) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} F(k)(1 + \cos((k_0 + k)\Delta))dk, \quad (4)$$

где $F(k)$ — функция, описывающая форму спектральной линии излучения немонохроматического источника; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число; Δ — оптическая разность хода (ОРХ) лучей в интерферометре; $k_0 = \frac{2\pi\nu_0}{c}$ — волновое число, соответствующее центральной частоте лазерного излучения.

Подставив выражение (4) в формулу (3) для гауссовой формы линии излучения $F(k) = \frac{1}{\Delta\nu\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{k^2}{2\Delta\nu^2}\right)$, получаем

$$K = \frac{\langle I_{\max} \rangle - \langle I_{\min} \rangle}{\langle I_{\max} \rangle + \langle I_{\min} \rangle} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} F(k) \cos(k\Delta) dk}{\int_{-\infty}^{\infty} F(k) dk} = \exp(-2\pi^2 \Delta^2 (\Delta\nu)^2), \quad (5)$$

где $\Delta\nu$ — спектральная ширина линии излучения лазерного источника.

Влияние немонахроматичности рабочего лазерного излучения на среднее значение интенсивности в пределах интерференционных колец и контраст (видность) интерференционной картины при контроле зеркал с радиусами кривизны до 20 м оценивалось в соответствии с выражениями (4) и (5). На рис. 4 приведены графики зависимости распределения среднего значения интенсивности в пределах интерференционных колец и контраста от ОРХ в плечах интерферометра и ширины линии излучения лазерного источника.

Из рис. 4 следует, что в процессе интерференционного контроля зеркал с радиусом кривизны до 20 м при выполнении условия возникновения интерференции ($l_{\text{кр}} > \text{ОРХ}$), спектральная ширина линии излучения $\Delta\nu$ должна принимать значения в диапазоне от $1 \cdot 10^6$ Гц до $3 \cdot 10^6$ Гц. При соблюдении указанного требования даже при значительном уровне спекл-шума ($C_{SQ} \approx 1$, см. рис. 3) контраст интерференционной картины превышает минимально допустимое значение $K = 0,3$ (рис. 4, б).

На основе сформулированных требований в созданном макетном образце лазерного ИК интерферометра в качестве источника излучения использован волноводный CO_2 -лазер с шириной линии излучения $\Delta\nu = 2 \cdot 10^6$ Гц.

Таким образом, результаты исследований показали, что пространственная спекл-структура в значительной степени проявляется в интерферограммах при контроле формы оптических поверхностей на стадиях грубого и среднегрубого шлифований.

Для повышения качества изображений интерферограмм предложен метод, основанный на частичном подавлении спекл-структуры в изображении и реализующий четырехэтапный алгоритм цифровой обработки изображений (рис. 5): формирование спектра изображения, его пространственно-частотная фильтрация, восстановление отфильтрованного изображения, усреднение по ансамблю сечений, проходящих через энергетический центр тяжести, отфильтрованного изображения.

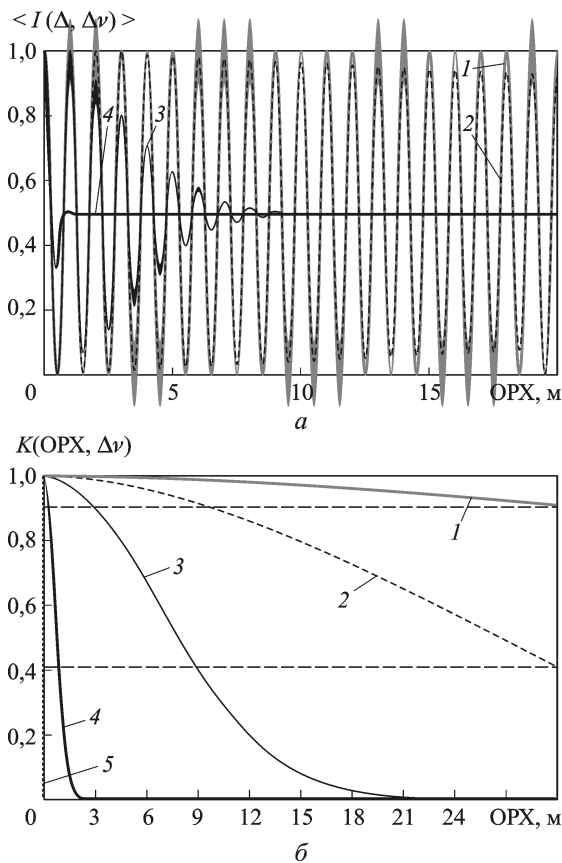


Рис. 4. Зависимости распределения среднего значения интенсивности в пределах интерференционных колец от ОРХ в плечах интерферометра и ширины линии излучения лазерного источника $\Delta\nu$ (а) и зависимости контраста интерференционной картины от ОРХ и $\Delta\nu$ (б):

1 – $\Delta\nu_1 = 1 \cdot 10^6$ Гц; 2 – $\Delta\nu_2 = 10 \cdot 10^6$ Гц; 3 – $\Delta\nu_3 = 100 \cdot 10^6$ Гц; 4 – $\Delta\nu_4 = 1000 \cdot 10^6$ Гц – а; 1 – $\Delta\nu_1 = 1 \cdot 10^6$ Гц; 2 – $\Delta\nu_2 = 3 \cdot 10^6$ Гц; 3 – $\Delta\nu_3 = 10 \cdot 10^6$ Гц; 4 – $\Delta\nu_4 = 100 \cdot 10^6$ Гц; 5 – $\Delta\nu_5 = 1000 \cdot 10^6$ Гц – б

На первом этапе предложенного метода после регистрации изображения интерференционной картины осуществляется дискретное фурье-преобразование центрированного изображения интерферограммы. Далее следует операция дискретизации импульсной функции (функции оконного фильтра) и перемножение фурье-образов изображения интерферограммы и фильтрующего окна, после чего осуществляется операция обратного фурье-преобразования и выделение вещественной части в сформированной матрице изображения.

Фильтрация в пространственно-частотной области приводит к сглаживанию спекл-структуры в изображении интерференционной картины (см. рис. 5), однако ее контраст заметно понижается. Для повышения контраста проводится усреднение интенсивности отфильтрованной интерференционной картины по сечениям, проходящим через ее энергетический центр тяжести.

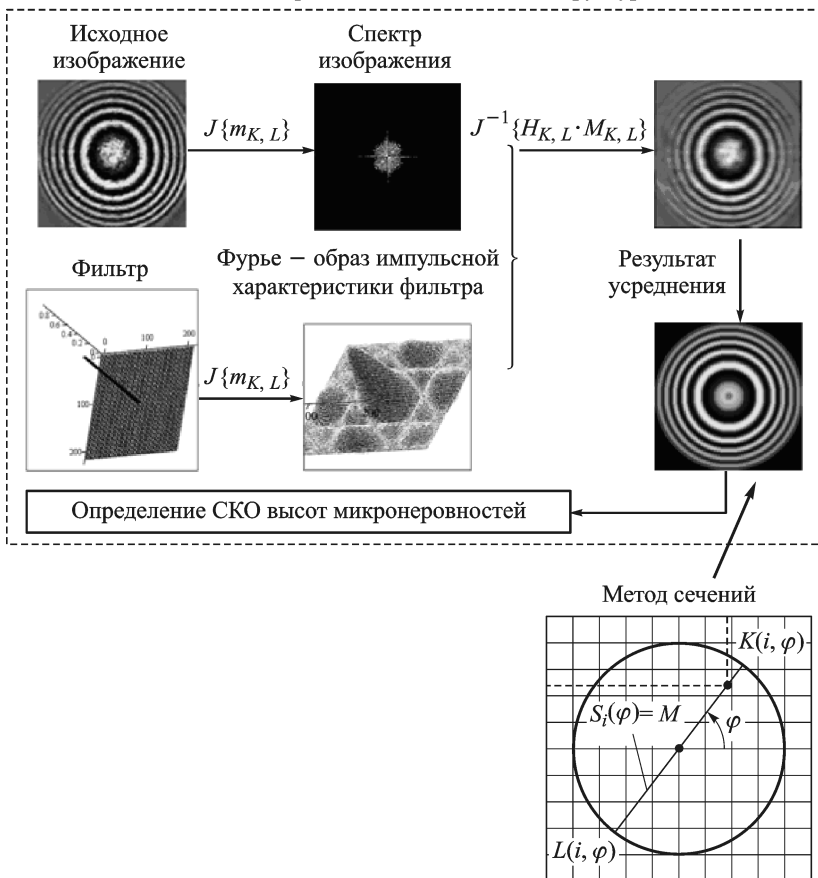


Рис. 5. Алгоритм повышения качества изображения интерферограммы за счет частичного подавления спекл-структуры

Выполнение условия эргодичности позволяет заменить статистическое усреднение интерференционных картин, полученных от шероховатых (шлифованных) поверхностей одного класса, статистическим усреднением по сечениям в интерференционной картине, полученной от одной шероховатой поверхности.

Усреднение средних значений интенсивностей в пределах интерференционных колец каждой интерферограммы проводилось по 50 центральным сечениям, проходящим через их энергетический центр тяжести (см. рис. 5). В результате контраст полученных интерферограмм повышался с 0,3 до 0,5, а контраст спекл-структуры уменьшался до 0,3.

Экспериментальная проверка основных результатов проводилась на разработанном на кафедре “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана опытном образце неравноплечего лазерного ИК интерферометра Тваймана–Грина, испытанном в цеховых условиях.

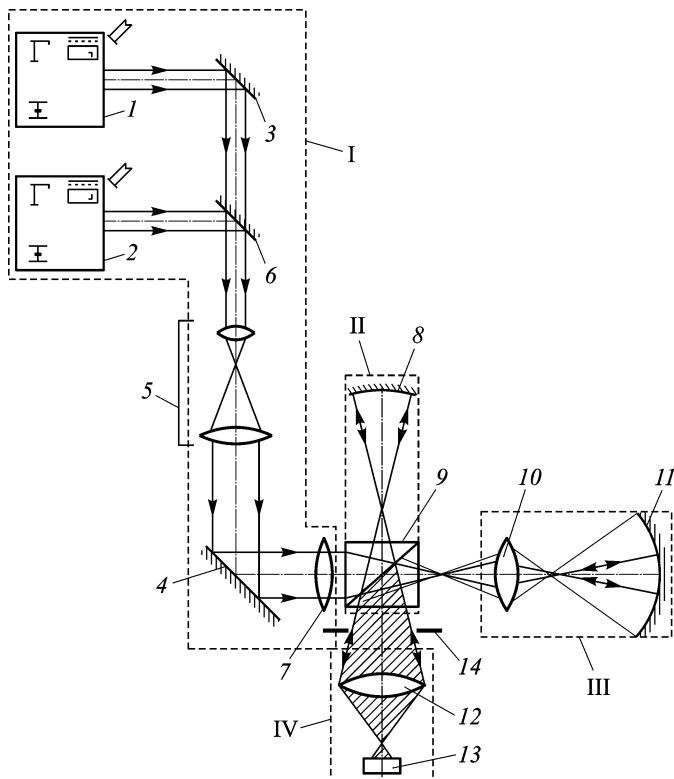


Рис. 6. Функциональная схема неравноплечего ИК интерферометра с горизонтальной измерительной ветвью: I, II, III и IV — осветительная, эталонная, измерительная и регистрирующая ветви; 1 — CO₂-лазер; 2 — He-Ne-лазер реперного канала; 3, 4 — наклонные зеркала; 5 — телескопическая система; 6 — зеркальная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

Традиционная оптическая схема неравноплечего интерферометра Тваймана–Грина была модифицирована введением реперного лазера и спектрального светоделителя (рис. 6). Внешний вид интерферометра представлен на рис. 7.

Предложенная оптическая схема позволяет контролировать как форму, так и качество (СКО высот микронеровностей [1, 2]) сферических зеркал с радиусом кривизны до 20 м и с относительным отверстием до 1:2,5 при использовании только одного эталонного зеркала небольшого диаметра, а также проводить контроль асферических поверхностей при введении компенсатора в рабочую ветвь.

При помощи созданного макетного образца в цеховых условиях были выполнены измерения формы оптических поверхностей крупногабаритных зеркал (диаметром до 2,4 м), обработанных на стадиях грубого, среднегрубого, среднего и тонкого шлифования [1].

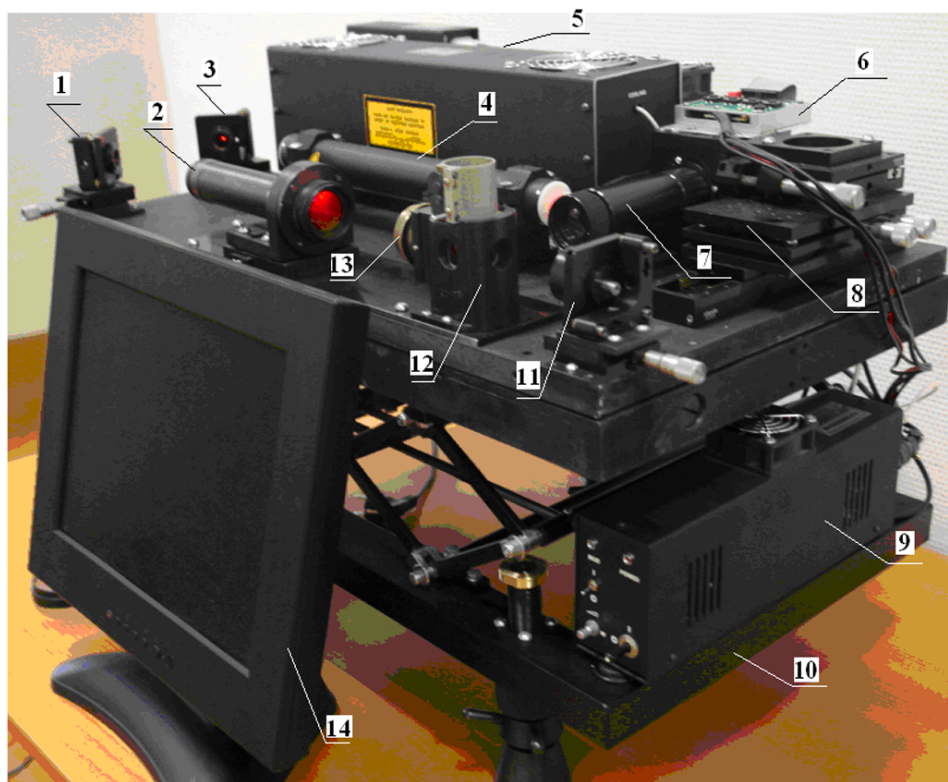


Рис. 7. Внешний вид неравноплечего интерферометра Тваймана–Грина горизонтального контроля крупногабаритных поверхностей оптических деталей (ЛИШП-2):

1, 3 – узлы поворотных зеркал; 2 – телескопическая система; 4 – юстировочный He–Ne-лазер; 5 – CO₂-лазер; 6 – микроболометрическая матрица; 7 – объектив сопряжения; 8 – модуль крепления микроболометрической матрицы; 9 – блок питания CO₂-лазера; 10 – подъемный механизм основания крепления приемопередающих узлов; 11 – эталонное зеркало; 12 – модуль светоделительного кубика; 13 – фокусирующий объектив; 14 – электронно-вычислительная машина

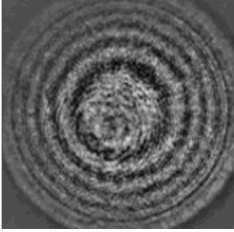
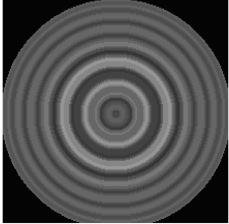
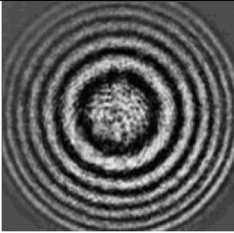
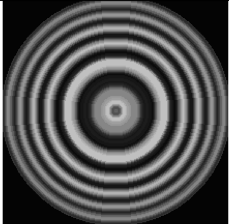
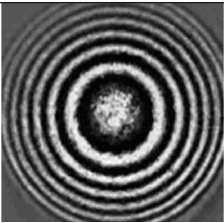
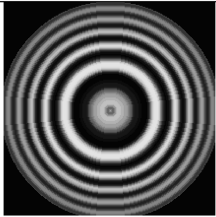
Вид зарегистрированных интерферограмм представлен в левой части таблицы. На интерферограммах отчетливо виден спекл-шум, обусловленный случайным характером распределения микронеровностей оптической поверхности.

В правой части таблицы показан вид тех же интерферограмм после цифровой обработки.

Отметим, что в интерференционных изображениях спекл-структура практически отсутствует.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью разработанного и изготовленного макетного образца лазерного ИК интерферометра, подтвердили возможность и перспективность методов интерференционного контроля оптических поверхностей крупногабаритных зеркал на стадиях шлифования.

Результаты метода сечений для трех характерных стадий шлифования

Стадия грубого шлифования (абразивный шлифующий порошок №4)	
Исходное изображение	Результат усреднения по 50 сечениям
	
Стадия среднегрубого шлифования (абразивный микропорошок М40)	
Исходное изображение	Результат усреднения по 50 сечениям
	
Стадия среднего шлифования (абразивный микропорошок М28)	
Исходное изображение	Результат усреднения по 50 сечениям
	

Предложенный метод подавления спекл-структуры, обеспечивает формирование интерференционной картины с контрастом спекл-структуры не выше 0,3 при контрасте выше 0,5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н е р а в н о п л е ч и й ИК интерферометр Тваймана–Грина для контроля формы и качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей на стадии шлифования / М.А. Абдулкадыров, Н.В. Барышников, Д.Г. Денисов и др. // Оптический журнал. – 2010. – № 10. – С. 40–47.
2. Д е н и с о в Д. Г., К а р а с и к В. Е., О р л о в В. М. Измерение параметров микронеровностей крупногабаритных шлифованных поверхностей оптических деталей при помощи лазерной интерферометрии // Метрология. – 2009. – № 3. – С. 15–24.

3. O s u k K w o n, W y a n t J. C., H a y s l e t t C. R. Rough surface interferometry at 10,6 мкм // Appl. Opt. 1980. – Vol. 19. – No. 11. – P. 1862.
4. G o o d m a n J. W. Speckle phenomena in optics: Theory and applications. Colorado: Roberts and Company, 2006. – 387 P.
5. Р ы т о в С. М. Введение в статистическую радиофизику. Случайные поля. Ч. II. – М.: Наука, 1966. – 404 с.
6. P e d e r s e n H. M. Theory of speckle dependence on surface roughness // J. of Optical Society of America. 1976. – Vol. 66. – P. 1204–1210.
7. Т а м о й к и н В. В., Ф р а й м а н А. А. О статистических свойствах поля, рассеянного шероховатой поверхностью // Изв. вузов. Радиофизика. – 1968. – Т. 21, № 1. – С. 56–65.

Статья поступила в редакцию 5.07.2010

Дмитрий Геннадьевич Денисов родился в 1981 г., окончил в 2006 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных работ в области лазерной интерферометрии и лазерной локации.

D.G. Denisov (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2006. Ph. D. (Eng.) of “Laser and Optic-and-Electronic Systems” departament of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 15 publications in the field of the laser interferometry and laser location.



Валерий Ефимович Карасик родился в 1939 г., окончил в 1964 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 научных работ в области лазерного зондирования, локации и дальнометрии.

V.E. Karasik (b. 1939) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1964. D. Sc. (Eng.), professor of “Laser and Optic-Electronic Systems” departmet of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 120 publications in the field of laser sounding, location, laser ranging.