

Н.В. Барышников, Я.В. Гладышева,
Д.Г. Денисов, И.В. Животовский,
В.Е. Патрикеев, И.Н. Судариков

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ И КАЧЕСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Рассмотрены методы контроля формы и качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей. Приведена современная методика измерения параметров неоднородностей профиля оптических поверхностей различных периодов пространственных частот на основании расчета функции спектральной плотности мощности $PSD(v_x, v_y)$. Рассмотрены требования, предъявляемые к качеству оптических поверхностей высокоточных деталей в соответствии с данной методикой. Проведен анализ существующего интерферометрического оборудования, технические характеристики которого позволяют проводить измерения в выделенных спектральных диапазонах с необходимой погрешностью. Рассмотрена возможность использования интерферометров NanoCam Dynamic Profiler (4D Technology) и Intellium H2000 (ESDI) для контроля крупногабаритных оптических деталей.

**E-mail: baryshnikov@bmstu.ru, yanagladysheva@gmail.com,
ivj@bmstu.ru, denisov_dg@mail.ru**

Ключевые слова: *интерферометр, метрология, оптическая поверхность, крупногабаритная оптика, шероховатость, волновой фронт, спектральная плотность мощности.*

В настоящее время интерферометрические методы контроля оптических поверхностей широко используются на всех технологических стадиях их изготовления: начиная с этапов грубого шлифования и завершая этапами высокоточной доводки [1, 2]. В применяемой аппаратуре реализованы различные схемы интерферометрических измерений, обеспечивающие высокоточный контроль профиля поверхностей широкой номенклатуры оптических деталей с погрешностью, достигающей сотых долей длины волны.

Вместе с тем ужесточение требований к профилю оптических поверхностей современных высокоточных оптических и оптико-электронных систем обуславливает дальнейшее развитие методов интерферометрического контроля. Прежде всего это относится к обоснованию критериев оценки качества оптики крупногабаритных телескопов или активных элементов перспективных лазерных сред.

Сверхкрупные телескопы сегодня рассматриваются как один из главнейших приоритетов астрономии. Создание зеркал для таких телескопов является трудоемкой задачей из-за их размеров и предъявляемых к ним технических требований. Так, диаметр главного зеркала Европейского сверхбольшого телескопа (The European Extremely Large Telescope — E-ELT) в Чили [3] составляет 40 м. Оно состоит из 1000 гексагональных сегментов, каждый из которых шириной 1,4 м и толщиной 50 мм. Среднее квадратическое отклонение (СКО) профиля поверхности каждого сегмента должно быть порядка 0,4...0,5 нм. Для таких поверхностей в значительной степени снижается влияние их светорассеивающих характеристик на возможности регистрации предельно удаленных слабоизлучающих объектов.

Разработка активных элементов для перспективных лазерных сред высокомошных лазеров также требует качества оптической поверхности нанометрового уровня. В Национальном комплексе лазерных термоядерных реакций (NIF) (США) находится самый крупный и мощный лазер, содержащий уникальные активные элементы — слэбы [4]. Эти активные элементы представляют собой пластины из стекла, обогащенного неодимом, размером 460×810×40 мм. Неоднородности профиля поверхности этих пластин могут привести к модуляции лазерного излучения и возможному повреждению оптических элементов.

Для создания оптических поверхностей подобного класса необходимо принципиально пересмотреть методику контроля их формы и качества, обосновать требования и разработать интерферометрическую аппаратуру, обеспечивающую необходимое качество измерений в условиях действующего производства. Любой профиль поверхности можно представить в виде ряда Фурье, периоды которого определяют неоднородности профиля поверхности. Современная методика должна обеспечить измерение параметров неоднородностей в широких пределах. В латеральной плоскости значение периодов гармоник в разложении ряда Фурье профиля поверхности находится в пределах от размеров, соизмеримых с размерами апертуры детали, до сотых долей миллиметров, а точность измерения параметров неоднородностей поверхности достигает сотых долей нанометров. Такой подход обеспечивает комплексное представление о качестве поверхности, которое описывается спектральной плотностью мощности $PSD(v_x, v_y)$ отклонения ее профиля [5]. Использование функции $PSD(v_x, v_y)$ связано с представлением профиля поверхности не в координатной, а в частотной области — в области спектра распределения амплитуд отклонений профиля по различным частотам (v_x, v_y) .

Принцип вычисления двумерной функции $PSD(v_x, v_y)$ построен на двумерном преобразовании Фурье $\tilde{h}(v_x, v_y)$ от функции $h(x, y)$, нм, описывающей отклонение профиля исследуемой поверхности [6]:

$$\tilde{h}(v_x, v_y) = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} h(x, y) e^{-2\pi j(v_x x + v_y y)} dx dy, \text{ нм} \cdot \text{мм}^2, \quad (1)$$

где x, y — координаты на контролируемой оптической поверхности, мм; v_x, v_y — пространственные частоты по осям X, Y , мм^{-1} ; a, b — размеры апертуры контролируемой поверхности по осям X, Y , мм.

Спектральная плотность мощности $PSD(v_x, v_y)$ вводится в соответствии с теоремой Хинчина — Винера как преобразование Фурье от автокорреляционной функции от функции $h(x, y)$:

$$PSD(v_x, v_y) = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} \text{Kр}[h(x, y)] e^{-2\pi j(v_x x + v_y y)} dx dy, \text{ нм}^2 \cdot \text{мм}^2, \quad (2)$$

где $\text{Kр}[h(x, y)] = M[(h(x_1, y_1) - \overline{h(x, y)})(h(x_2, y_2) - \overline{h(x, y)})]$ — автокорреляционная функция, определяемая через математическое ожидание от произведения разностей функций высот $h(x_1, y_1)$ и $h(x_2, y_2)$ и их среднего значения $\overline{h(x, y)}$.

Из уравнений (1) и (2) можно установить связь введенной функции $PSD(v_x, v_y)$ с СКО профиля поверхности R_q , нм. По определению, R_q — это квадратный корень из двойного интеграла квадрата функции высот $h(x, y)$, нормированный на площадь контролируемой поверхности. Используя теорему Парсеваля о том, что интеграл квадрата функции равен интегралу квадрата преобразования Фурье данной функции, запишем

$$\begin{aligned} R_q &= \sqrt{\int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} [h(x, y) - \overline{h(x, y)}]^2 dx dy} = \\ &= \sqrt{\int_{\Delta v_{x\min}}^{\Delta v_{x\max}} \int_{\Delta v_{y\min}}^{\Delta v_{y\max}} PSD(v_x, v_y) dv_x dv_y}. \end{aligned} \quad (3)$$

Частоты $\Delta v_{x\min}, \Delta v_{x\max}, \Delta v_{y\min}, \Delta v_{y\max}$ в уравнении (3) должны удовлетворять теореме Котельникова:

$$\Delta v_{x\max} = \frac{1}{2\Delta x}; \quad \Delta v_{x\min} = \frac{-1}{2\Delta x}; \quad (4)$$

$$\Delta v_{y\max} = \frac{1}{2\Delta y}; \quad \Delta v_{y\min} = \frac{-1}{2\Delta y}. \quad (5)$$

При переходе к частотному анализу профиля поверхности ошибки волнового фронта лазерного излучения, отраженного от оптической поверхности, можно разделить на четыре основных простран-

ственно-частотных диапазона в зависимости от шага и базовой длины поверхности: отклонение формы поверхности определяется в пределах апертуры; волнистость — совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояние между соседними вершинами или впадинами превышает базовую длину для имеющейся шероховатости поверхности; шероховатость высокого порядка — совокупность неровностей поверхности с малыми шагами, выделенными в пределах базовой длины; шероховатость нанометрового уровня — высокочастотный параметр, лежит в пределах от долей нанометра до нескольких нанометров.

В табл. 1 приведены требования, введенные при разработке активных сред лазеров для NIF. Параметры, характеризующие качество оптической поверхности, разделены на диапазоны I...IV по пространственным частотам (от $1 \cdot 10^2$ до $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$) в соответствии с пространственными масштабами [7, 8].

Таблица 1

Параметры, характеризующие качество оптической поверхности в диапазонах I...IV пространственных частот

Диапазон	I		II	III	IV
Пространственный период гармоник в разложении ряда Фурье профиля поверхности, мм	450...33		33...2,5	2,5...0,12	0,12...0,01
Пространственная частота неоднородностей, мм^{-1}	$2,5 \cdot 10^{-3} \dots 3,0 \cdot 10^{-2}$		$3,0 \cdot 10^{-2} \dots 0,4$	0,4...8,3	8,3...100
Контролируемый параметр неоднородности	$\frac{PV}{\lambda}$	$\frac{RMS}{d}$, нм/см	RMS, нм	RMS, нм	RMS, нм
Допустимое значение контролируемого параметра	0,33	7,00	1,80	1,10	0,40

Обозначения: d — диаметр апертуры, λ — длина волны излучения.

На рис. 1 представлено распределение функции $PSD(v_x, v_y)$ для выделенных четырех пространственных частотных диапазонов. Поскольку один прибор не может проводить измерения сразу во всех диапазонах, то данные были получены с помощью нескольких интерферометров при использовании различных насадок [8]. На рис. 1

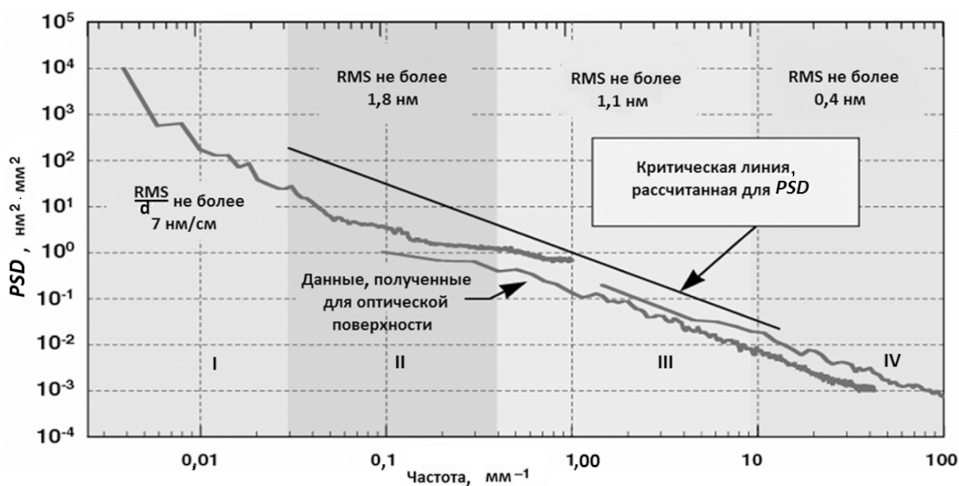


Рис. 1. Функция PSD для четырех пространственных диапазонов измерения

показаны три графика функции $PSD(v_x, v_y)$ и критическая линия, рассчитанная в соответствии с предъявляемыми требованиями к качеству поверхностей (см. табл. 1).

Качество волнового фронта в диапазоне I характеризуется максимальными значениями наибольшей высоты неровностей профиля R_{max} и СКО профиля R_q [9] (или PV и RMS [10] соответственно). Эти параметры определяют форму волнового фронта, отраженного от исследуемой поверхности, и угловую расходимость отраженного излучения.

Диапазоны II...IV обуславливают шероховатость оптической поверхности. Неоднородности поверхности в диапазонах II и III могут привести к дополнительной модуляции лазерного излучения и повреждению ответственных оптических элементов. Размер неоднородностей в пределах IV диапазона определяет светорассеивающие характеристики крупногабаритной оптики.

Как следует из табл. 1, к погрешностям измерений предъявляются очень высокие требования. Поэтому выбор аппаратуры для оптических измерений должен быть тщательно обоснован. Интерферометрическое оборудование производства США, технические характеристики которого позволяют проводить измерения с необходимой погрешностью в выделенных четырех диапазонах пространственных частот: I — классический интерферометр Физо с автоколлимационным расширением пучка, Zygo Verifire (Zygo); I...III — Intellium H2000 (ESDI); I, II — FizCam Dynamic Profiler (4D Technology); III, IV — NanoCam Dynamic Profiler (4D Technology).

При анализе технических характеристик оборудования прежде всего следует отметить, что классический интерферометр Физо и ин-

терферометр Zygo Veryfire не позволяют проводить измерения в вибронеустойчивых условиях оптического производства [11].

Интерферометры Intellium H2000 (ESDI), FizCam Dynamic Profiler и NanoCam Dynamic Profiler (4D Technology) обеспечивают возможность проведения измерений на производстве за счет построения оптической схемы с дополнительными поляризационными компонентами. При использовании интерферометров FizCam Dynamic Profiler [12] и NanoCam Dynamic Profiler (4D Technology) [13] вибронеустойчивость достигается с помощью микрополяризационной маски, нанесенной «попиксельно» на регистрирующую ПЗС-матрицу, что позволяет получить четыре интерференционные картины за одно измерение.

В интерферометре Intellium H2000 (ESDI) конечный результат регистрируется одновременно тремя ПЗС-матрицами, что также дает возможность получить несколько интерференционных картин за одно измерение. Контролируемое прибором качество поверхности определяется диапазонами I...III и подходит для измерения крупногабаритной оптики [14].

Детальный анализ особенностей построения интерферометра FizCam Dynamic Profiler показывает, что вследствие необходимости высокоточной синхронизации смещения крупногабаритного эталонного зеркала с зеркалом, вносящим сдвиг фазы, его невозможно использовать для контроля крупногабаритных оптических деталей. Рассмотрим возможность применения интерферометров NanoCam Dynamic Profiler (4D Technology) и Intellium H2000 (ESDI) в соответствии с требованиями по качеству измерений. Функциональная схема динамической системы измерения шероховатостей интерферометром NanoCam Dynamic Profiler представлена на рис. 2. Система основана на схеме микроинтерферометра Линника и фазового датчика с пикселизированной поляризационной маской [15]. Источник излучения с перестраиваемой поляризацией сигнала на выходе направляет излучение в микроинтерферометр. Поляризационный светоделитель направляет в ветвь с исследуемым объектом s-поляризованное излучение, а в ветвь с опорной поверхностью — p-поляризованное излучение.

Излучение, отразившись от опорного и объектного зеркал, возвращается и, пройдя поляризационный светоделитель, попадает в проекционный объектив регистрирующей ветви. Перед приемником излучения располагается четвертьволновая пластинка, меняющая p-поляризованное излучение на излучение с правой круговой поляризацией, а s-поляризованное излучение — на излучение с левой круговой поляризацией. Затем оба пучка проходят через поляризационную маску, формирующую интерференционную картину на детекторе. Каждая

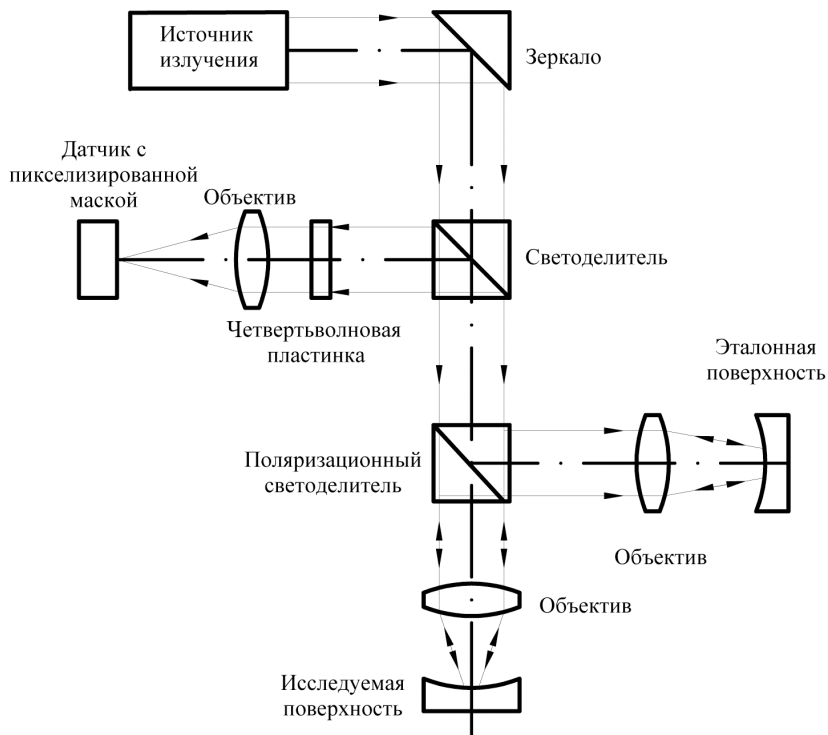


Рис. 2. Функциональная схема динамической системы измерения шероховатостей

ячейка маски состоит из четырех подъячеек с фазовыми сдвигами относительно друг друга на 90° . Для наилучшего разрешения каждой подъячейке соответствует один пиксел ПЗС-матрицы [16, 17].

Принцип регистрации фаз заключается в том, что поляризационный интерферометр генерирует опорный и объектный волновые фронты с ортогональным типом поляризации по отношению друг к другу. Пикселизированная поляризационная маска производит сдвиг обоих волновых фронтов в каждом пикселе, получая таким образом четыре различных интерференционных картины за одно измерение. Интенсивность каждой сдвинутой по фазе интерферограммы на активной части детектора [13]:

$$I_0(x, y) = \frac{1}{2} [I_r + I_s + 2\sqrt{I_r I_s} \cos(\Delta\varphi(x, y))]; \quad (6)$$

$$I_1(x, y) = \frac{1}{2} [I_r + I_s + 2\sqrt{I_r I_s} \cos(\Delta\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2})]; \quad (7)$$

$$I_2(x, y) = \frac{1}{2} [I_r + I_s + 2\sqrt{I_r I_s} \cos(\Delta\varphi(x, y) + \pi)]; \quad (8)$$

$$I_3(x, y) = \frac{1}{2} \left[I_r + I_s + 2\sqrt{I_r I_s} \cos \left(\Delta\varphi(x, y) + \frac{3\pi}{2} \right) \right], \quad (9)$$

где I_r, I_s — интенсивности опорного и объектного волновых фронтов, зарегистрированные на каждом пикселе.

Используя формулы (6)—(9), фазу $\Delta\varphi(x, y)$ можно определить из следующего выражения [18]:

$$\Delta\varphi(x, y) = \arctg \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_2(x, y) - I_0(x, y)}. \quad (10)$$

Из выражения (10) можно вычислить параметр СКО профиля исследуемой поверхности:

$$R_q(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \operatorname{tg}^{-1}(\Delta\varphi(x, y)). \quad (11)$$

Основные технические характеристики динамического интерферометра NanoCam Dynamic Profiler с различными насадками приведены в табл. 2. Их анализ позволяет обосновать возможность использования данного интерферометра для измерений в различных диапазонах (I...IV).

Таблица 2

Технические характеристики динамического профилометра с различными насадками

Увеличение насадки	2,0 ^x	5 ^x	10 ^x	20 ^x
Линейное поле зрения x , мм	4,4	1,8	0,9	0,4
Числовая апертура, рад	0,06	0,15	0,30	0,45
Рабочее расстояние до поверхности, мм	9,5	23,5	17,3	4,5
Оптическое разрешение ($\lambda = 460$ нм), мкм	3,8	1,5	0,8	0,5
Число пикселей камеры	1200×1200			
СКО измерений, нм	0,1			
Частота кадров, Гц	Не более 14			
Минимальное время измерения, мкс	Не менее 100			

На рис. 3 приведены четыре частотных диапазона на оси пространственных частот ν , мм⁻¹, и диапазоны, в которых работают профилометр NanoCam Dynamic Profiler с насадками с различным увеличением и профилометр FizCam Dynamic Profiler. Минимальная пространственная частота, на которой может работать прибор, рассчитывается по формуле

$$\nu_{\min} = \frac{1}{2x}, \quad (12)$$

где x — линейное поле зрения прибора. Максимальная пространственная частота ограничивается частотой Найквиста, равной половине частоты дискретизации:

$$v_{\max} = \frac{1}{2a_x}, \quad (13)$$

где $a_x = \frac{2\omega_x}{1200}$ — размер одного пиксела, если размер матрицы

1200×1200 пикселей. По формулам (12) и (13) были рассчитаны диапазоны профилметра NanoCam Dynamic Profiler и его же с применением интерференционных объективов с увеличением 2^x , 5^x , 10^x и 20^x , а также профилметра FizCam Dynamic Profiler (см. рис. 3).

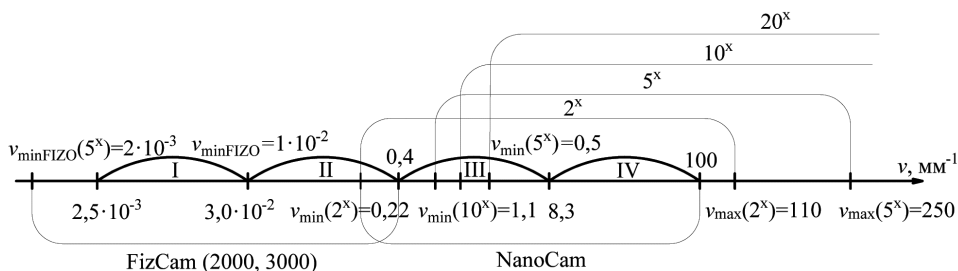


Рис. 3. Частотные диапазоны интерферметров NanoCam Dynamic Profiler и FizCam Dynamic Profiler

Таким образом, как видно на рис. 3, профилметр NanoCam Dynamic Profiler с насадками с увеличением 2^x и 5^x позволяет проводить измерения в III, IV диапазонах, соответствующих требованиям к производству крупногабаритных оптических деталей и перспективных лазерных сред.

Функционально-оптическая схема интерферметра Intellium H2000 представлена на рис. 4. Интерферметр основан на схеме интерферметра Физо, позволяющей проводить измерения в вибрационных условиях оптического производства и при других внешних помехах [14]. Интерферметр Intellium H2000 одновременно регистрирует три интерференционные картины, сдвинутые по фазе относительно друг друга. Интерферограммы записываются тремя независимыми камерами (CCD-камеры). Для регистрации интерферограмм необходимо, чтобы опорный и объектные лучи были ортогонально поляризованы. Для этого в схему интерферметра Физо введены два источника излучения с перпендикулярными состояниями поляризации. На рис. 4 показаны лучи от двух источников, попадающие в коллиматор под небольшим углом.

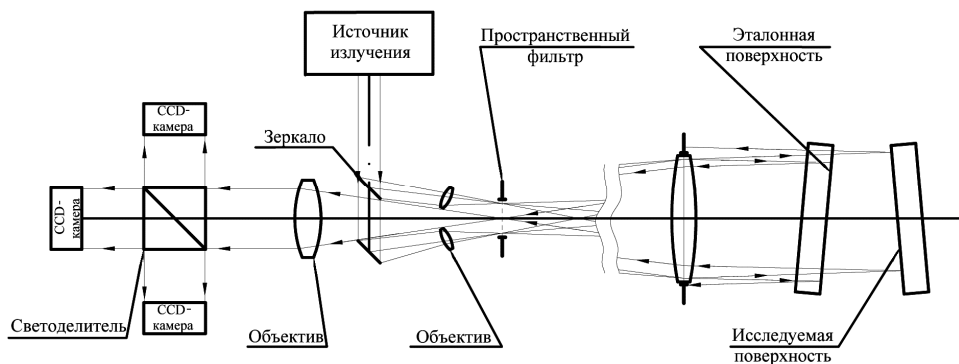


Рис. 4. Функционально-оптическая схема интерферометра Intellium H2000

Пучки излучения отражаются от эталонной и от исследуемой поверхностей, которые наклонены таким образом, чтобы отраженные лучи шли параллельно оптической оси интерферометра. Угол наклона поверхностей должен быть небольшим, это необходимо для уменьшения ошибок при прохождении излучения через оптическую систему. Оставшиеся два пучка отражаются от поверхностей и блокируются пространственным фильтром в фокальной плоскости интерферометра.

Для получения трех интерферограмм одновременно опорный и объектный лучи разделяются на три одинаковых канала в специальном модуле, который заменяет стандартную камеру в интерферометре. В каждом канале фазовая задержка вводится независимо, чтобы фазовый сдвиг между соответствующими интерферограммами был равен 120° . Три интерферограммы регистрируются одновременно и передаются на компьютер. Время снятия данных составляет обычно около 0,25 мс, но может быть уменьшено до 10 мкс, оно ограничивается интенсивностью излучения и характеристиками камеры. Заметим, что разделение пучка на три канала не нарушает принцип наименьшей оптической длины, так как два интерферирующих пучка разделяются одинаково и проходят один и тот же путь до детектора.

Интерферометр Intellium H2000 в отличие от рассмотренных выше интерферометров позволяет проводить измерения в диапазонах I и II для оптических поверхностей с большими апертурами при условии наличия увеличивающей насадки. На рис. 5 представлена возможная схема контроля крупногабаритной оптической плоской поверхности с использованием дополнительного сферического зеркала. Для такой схемы интерференционная картина определяется разностью двух волновых фронтов: фронта, отразившегося от эталонной поверхности клина, и фронта, отразившегося от контролируемой плоской поверхности.

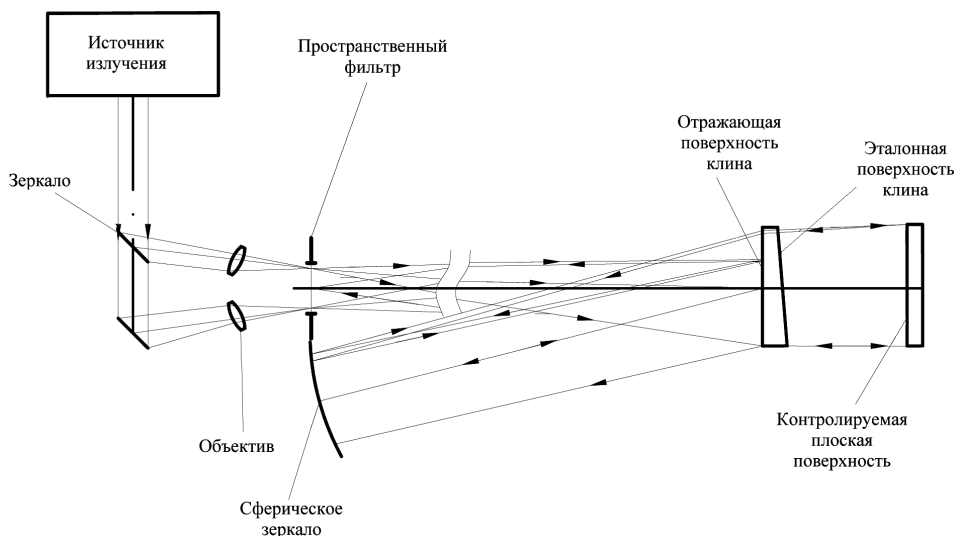


Рис. 5. Функционально-оптическая схема контроля качества крупногабаритных оптических поверхностей на основе интерферометра Intellium H2000

Рассматриваемые волновые фронты можно разложить на составляющие:

$$W_1 = 2W_{\text{пр}} + 2W_{\text{кл.отр}} + 2W_3 + 2W_{\text{кл.пр}} + 2W_{\text{матер}} + W_{\text{эт.отр}}; \quad (14)$$

$$W_2 = 2W_{\text{пр}} + 2W_{\text{кл.отр}} + 2W_3 + 2W_{\text{кл.пр}} + 2W_{\text{матер}} + 2W_{\text{эт.пр}} + W_{\text{контр}}, \quad (15)$$

где $W_{\text{пр}}$ — погрешность измерений прибора; $W_{\text{кл.отр}}$, W_3 , $W_{\text{кл.пр}}$, $W_{\text{матер}}$, $W_{\text{эт.отр}}$, $W_{\text{эт.пр}}$, $W_{\text{контр}}$ — ошибки диагональной поверхности оптического клина на отражение, сферического зеркала, диагональной поверхности клина на проход, материала клина, эталонной поверхности клина на отражение, эталонной поверхности клина на проход, контролируемой плоской поверхности соответственно.

Разность между волновыми фронтами (14) и (15) является ошибкой волнового фронта, за счет которой формируется интерференционная картина:

$$(W_1 - W_2) = W_{\text{эт.отр}} - 2W_{\text{эт.пр}} - W_{\text{контр}}, \quad (16)$$

где $W_{\text{эт.отр}} = 2n\Delta$, $W_{\text{эт.пр}} = (n - 1)\Delta$; Δ — ошибка поверхности, нм; n — показатель преломления материала оптического клина.

Таким образом, для эталонной поверхности оптического клина вносимые ошибки на отражение и проход связаны через показатель преломления материала клина следующим соотношением:

$$W_{\text{эт.отр}} = \frac{n-1}{n} W_{\text{эт.пр}}.$$

Формула (16) вырождается в следующую:

$$W_1 - W_2 = \frac{n-1}{n} W_{\text{эт.отр}} - W_{\text{контр}}. \quad (17)$$

К качеству эталонной поверхности оптического клина должны быть предъявлены высокие требования. Это требование справедливо и для классической схемы интерферометра Физо, оно сохраняется и для рассматриваемой схемы интерферометра Н2000. Но в случае интерферометра Н2000 необходимо учитывать еще один источник погрешности.

После отражения от контролируемой плоской поверхности каждый луч рабочего пучка излучения проходит через оптический клин уже не точно в обратном направлении. Поэтому при компоновке схемы оптического контроля необходимо, чтобы линейное смещение в плоскости клина не превышало эквивалентного размера разрешения элемента матричного фотоприемника интерферометра, масштабированного на плоскость установки клина. Это достигается подбором соотношения между фокусным расстоянием сферического зеркала, расстоянием между оптическим клином и контролируемой поверхностью и углом между осями ортогонально поляризованных рабочих пучков.

Таким образом, контроль пространственных неоднородностей поверхностей крупногабаритных высокоточных оптических деталей основан на анализе пространственного спектра неоднородностей в широком диапазоне значений их периода. Этот диапазон изменяется от единиц нанометров и до значений периода неоднородностей, соизмеримых с размерами апертуры контролируемых поверхностей. Реализация такого контроля в условиях действующего производства связана с использованием метода и аппаратуры динамической интерферометрии при тщательном обосновании возможности применения конкретных схем оптической аппаратуры для обеспечения требуемой погрешности измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdulkadyrov M. A., Belousov S. P., Ignatov A. N. // Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST, Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7390.
2. Неравноплечий ИК-интерферометр Тваймана — Грина для контроля формы и качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей на стадии шлифования / М.А. Абдулкадыров и др. // Оптический журнал. – 2010. – № 1. – 12 с.
3. <http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt.html>
4. <https://lasers.llnl.gov/about/nif/about.php>

5. Youngworth R. N., Gallagher B. B., Stamper B. L. An overview of power spectral density (PSD) calculations // Proc. SPIE. – 2005. – 5869, 58690U.
6. Sidick E. Power Spectral Density Specification and Analysis of Large Optical Surfaces // Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7390. – P. 73900L-1.
7. Lawson J. K., Wolfe C. R., Manes K. R. et al. Specification of optical components using the power spectral density function // Proc. SPIE. – 1995. – P. 38–50, 2536.
8. Campbell J. H. NIF optical materials and fabrication technologies: An overview // Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5341.
9. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
10. ISO 4287/1. Surface texture: profile method – terms, definitions and surface texture parameters.
11. Deck L. L., Soobitsky J. A. Phase-shifting via wavelength tuning in very large aperture interferometers // SPIE. – 1999. – Vol. 3782.
12. Kimbrough B., Millerd J., Wyant J., Hayes J. Low Coherence Vibration Insensitive Fizeau Interferometer // Proc. of SPIE. – 2006. – Vol. 6292.
13. Kimbrough B., Brock N., Millerd J. Dynamic surface roughness profiler // Proc. of SPIE. – 2011. – Vol. 8126. 81260H-1.
14. Intellium™ H2000 Overview // http://esdimetrology.com/p/fizeau/intellium_h2000.html
15. Brock J. E., Hayes N. J., North-Morris J. B. et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5531. – P. 304–315.
16. Brock N. J., Kimbrough B. T., Millerd J. E. A pixelated polarizer-based camera for instantaneous interferometric measurements // Proc. of SPIE. – 2011. – Vol. 8160.
17. Kothiyal P., Delisle R. Shearing interferometer for phase shifting interferometry with polarization phase shifter // Applied Optics/ – 1985. – Vol. 24. – No. 24. – P. 4439–4442.
18. Farrell C. T., Player M. A. Phase step measurement and variable step algorithms in phase-shifting interferometry // Meas. Sci. Technol. – 1992. – No. 3. – P. 953–958.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012