ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА
И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 535.4: 681.7.02-04:681.787 PACS: 07.60.Ly

Измерение параметров шероховатостей шлифованных и полированных оптических поверхностей с помощью высокоточных методов лазерной интерферометрии

Д. Г. Денисов

Рассматриваются методы и аппаратура контроля параметров шероховатостей профилей оптических поверхностей, имеющих различный уровень среднего квадратичного отклонения (СКО) – σ на различных стадиях технологической обработки. Разработан и научно обоснован метод лазерной инфракрасной (ИК) интерферометрии, основанный на приближениях метода Кирхгофа при рассеянии плоской электромагнитной волны λ фазовым экраном при выполнении условия $\sigma >> \lambda$. Получено аналитическое соотношение, связывающие значение контраста видеоизображения интерференционной картины, зарегистрированной разработанным неравноплечным интерферометром Тваймана–Грина с рабочей длиной волны излучения 10,6 мкм, с величиной СКО. Реализован и экспериментально подтверждён метод динамической интерферометрии контроля локальных отклонений нанометрового уровня поверхностей оптических деталей в случае, когда $\sigma >> \lambda$, в условиях производственных вибраций от заданного профиля на основе алгоритма расчёта целевой функции – спектральной плотности одномерной корреляционной функции (СПКФ1 от англ. PSD1D (Power Spectral Density One Dimension)). Представлены теоретические и экспериментальные исследования, посвящённые определению СКО локальных отклонений поверхностей оптических деталей диаметром до 100 мм, причем с учётом неисключённой систематической и случайной составляющих погрешностей определения целевой функции.

Ключевые слова: неравноплечный интерферометр Тваймана–Грина, шлифованная оптическая поверхность, метод Кирхгофа, среднее квадратичное отклонение высот микронеровностей, контраст интерференционной картины, динамическая интерферометрия, спектральная плотность корреляционной функции.

Введение

На сегодняшний день в современном оптическом производстве идёт интенсивное развитие научных направлений, посвящённых созданию крупногабаритных оптических изделий на базе перспективных конструкционных материалов и сред для астрономической и лазерной оптики [1, 2]. Изготовление таких изделий связано с серьёзными технологическими трудностями, так как при значительных размерах световой аппретуры необходимо обеспечить погрешность формы, не превышающую нескольких сотых, а порой и тысячных долей длины волны контроля. Решение этой задачи достигается в процессе оперативного высокоточного контроля изготавливаемой поверхности на всех стадиях технологической обработки, начиная со стадии грубого шлифования [1–3], когда профиль поверхности оптической детали является шероховатым [3, 7, 8], и заканчивая этапами прецизионного формообразования полированием [1–3], когда поверхность можно считать зеркальной в соотношении с длиной волны электромагнитного излучения видимого спектрального диапазона [3, 7, 8].

Для создания и успешного развития в России данного технологического направления необходимо иметь не только современную отечественную технологию производства крупногабаритных оптических изделий нового поколения, но и перспективные методики диагностики их статистических показателей качества [3–6,11–14, 18] на базе комплекса высокоточной оптико-электронной аппаратуры [3–6, 11–14, 18].

Целью данной работы являлось рассмотрение методов и аппаратуры контроля параметров шероховатостей профилей оптических поверхностей,

Денисов Дмитрий Геннадьевич, доцент, к.т.н.
МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.
E-mail: denisov_dg@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 июля 2017 г.

© Денисов Д. Г., 2017

имеющих различный уровень СКО (среднее квадратичное отклонение σ) на различных стадиях технологической обработки, в интересах разработки и научного обоснования методов лазерной динамической и инфракрасной (ИК) интерферометрии, основанного на приближениях Кирхгофа при рассеянии плоской электромагнитной волны λ фазовым экраном при выполнении условия $\sigma >> \lambda$.

Постановка научно-технических задач

Существующие на сегодняшний день технологии и связанные с ними в едином автоматизированном комплексе [1–3] методы технологического (промежуточного) контроля приводят к тому, что при наличии местных ошибок полированную поверхность приходится целиком заново перешлифовывать, а затем снова подвергать полированию и интерференционному контролю. Понятно, что такой итерационный технологический режим требует большого времени обработки, существенных трудозатрат и является экономически невыгодным. Следует отметить также, что в этом случае нельзя применять интерферометры, работающие в видимой области спектра, из-за сильного рассеяния излучения на шероховатых поверхностях, которое вызывает разрушение пространственной когерентности и, как следствие, предопределяет низкое качество видеоизображения интерференционной картины, затрудняющее её последующую цифровую обработку. Однако отсутствие научно обоснованных требований к качеству интерференционной картины, контрасту спекл-структуры [3] и влиянию характерного отношения σ/λ на светорассеивающие характеристики, обусловленных принятым алгоритмом обработки и расшифровки интерферограмм, затрудняет выработку исходных данных на проектирование лазерных ИК-интерферометров.

В свою очередь, специфика разработки методов и аппаратуры высокоточного аттестационного (конечного) контроля оптических изделий на стадиях финишного формообразования полированием [1, 2, 4–6, 12], когда величина σ может составлять единицы нанометров и менее [11, 12], определяется существующими вибрациями в условиях реального производства, частотный диапазон которых может достигать нескольких сотен Гц, а амплитудный уровень значительно превосходить измеряемую величину – σ.

В этой связи в данной работе предлагается решение двух научно-технических задач, ориентированных на разработку, исследование и точностной анализ двух оригинальных методов определения параметров шероховатостей профилей контролируемых деталей на стадиях грубого шлифования [1–3] и глубокой оптической полировки [1–3]. Первый из них основан на измерении контраста видеоизображения интерференционных картин и его связи с характерным отношением σ/λ [3, 7, 8]. Второй метод основан на частотном анализе [11–14, 18] профиля контролируемой детали в заданном диапазоне масштабов неоднородностей в соответствии с требованиями, предъявляемыми к активным лазерным средам сверхмощных технологических комплексов [11, 12, 18].

Рассмотрим более подробно идеологию и практическую реализацию, а также схемотехнические решения, лежащие в основе каждого из представленных методов.

Интерференционный метод и аппаратура для контроля параметров микрошероховатостей поверхностей оптических деталей на стадиях шлифования

Для диагностики параметров шероховатости шлифованных оптических поверхностей разработан метод лазерной ИК-интерферометрии [3], успешно апробированный в производственных условиях как для контроля формы оптической шлифованной поверхности [1–3], так и для определения величины СКО [3–6] высот микронеровностей [3] контролируемой шлифованной поверхности. Определение зависимости между параметрами шероховатой поверхности и параметрами отражённого электромагнитного поля, формируемого в результате дифракции волн на неровностях шероховатой поверхности в процессе интерферометрического контроля [3–6, 11, 12, 18], является основной задачей теории рассеяния излучения шероховатой поверхностью [3, 7, 8]. При этом главным критерием степени шероховатости рассеивающей поверхности является соотношение σ/λ между длиной волны λ падающего излучения и СКО высот микронеровностей σ [3, 7, 8]. Очевидно, что одна и та же поверхность может быть сильно шероховатой для коротких длин волн и практически зеркальной – для длинных волн. Данная ситуация иллюстрируется с помощью рис. 1, *а*, *б*. Из него можно заключить, что соотношение σ/λ будет определять как сам характер рассеяния [3, 7, 8], так и соответствующую рассеивающую поверхность [3, 7, 8], которая, согласно критерию Рэлея [3, 7, 8], является зеркальной, если разность фаз, определяемая соотношением (1) между двумя любыми оптическими лучами (падающими на вершину (луч «2» см. рис. 1) и основание (луч «1» см. рис. 1) меньше $\pi/2$, и, наоборот, полностью

шероховатой, если эта разность фаз превышает У/2. указанное соотношение можно записать в следующем виде:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r\,, \qquad (1)$$

где $\Delta r = 2h(\mathrm{x})\sin\gamma n$ – оптическая разность путей двух лучей; $h(x)$ – высота микронеровности, мкм; n – показатель преломления окружающей среды; γ – угол падения электромагнитной волны.

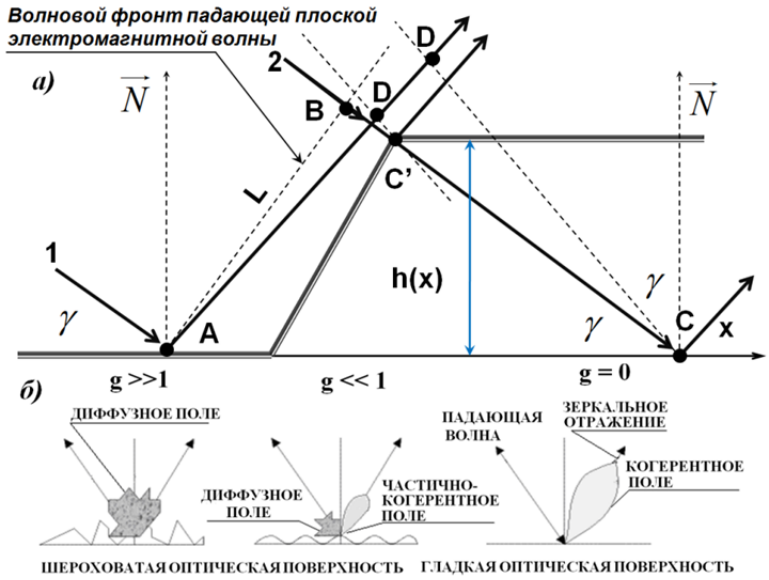

Рис. 1. К критерию выбора длины волны источника излучения осветительной ветви аппаратуры контроля: а) к определению критерия Рэлея для модели равновысотной шероховатой поверхности; б) классификация светорассеивающих оптических поверхностей в зависимости от характерного отношения σ/λ ~ h/λ: параметр g >> 1 – сильно шероховатая поверхность; g << 1 – слабошероховатая поверхность; g = 0 – зеркальная поверхность.

В частности, для модели профиля оптической поверхности с одинаковыми высотными параметрами $h(x,y)$ критерий Рэлея принимает вид:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{h_\text{шер}} > \dfrac{\pi}{2} \\ \Delta\varphi_{h_\text{шер}} = \dfrac{4h(x,y)\pi}{\lambda} \end{cases} \rightarrow \frac{h(x,y)}{\lambda} > \frac{1}{8} \text{ – критерий шероховатости,} \qquad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{h_\text{гладк}} < \dfrac{\pi}{2} \\ \Delta\varphi_{h_\text{гладк}} = \dfrac{4h(x,y)\pi}{\lambda} \end{cases} \rightarrow \frac{h(x,y)}{\lambda} < \frac{1}{8} \text{ – критерий гладкости.} \qquad (3)$$

В зависимости от величины отношения параметра микронеровности к длине волны лазерного излучения часто используется g-параметр [3] (см. рис. 1, *б*), на основе которого даётся классификация поверхностей по уровню светорассеяния, определяющему их качество [3]. Этот параметр определяется следующим выражением:

$$g = \sqrt{2\pi\frac{\sigma}{\lambda}\left(\cos\Theta_1 + \cos\Theta_2\right)}, \qquad (4)$$

где Θ_1 и Θ_2 – углы падения и отражения (дифракции) соответственно.

Таким образом, на базе критерия качества профиля оптической поверхности (4), определяющего степень его гладкости (3), можно показать, что для шлифованных оптических поверхностей с микронеровностями порядка единиц микрон (что соответствует стадиям грубого и среднего шлифования [1–3]) в качестве источника излучения в интерферометре могут использоваться ИК-лазеры с длиной волны излучения 5–10 мкм, обладающие достаточной длиной когерентности. Анализ существующих типов лазеров указанного спектрального диапазона показывает, что наиболее применимым для интерферометра, контролирующего оптические поверхности с величиной микронеровностей порядка единиц микрон, является либо непрерывный СО-лазер с одной из линий генераций, близкой к 5 мкм, либо волноводный CO_2-лазер с λ = 10,6 мкм. В частности, последний установлен в оптический тракт осветительного канала

неравноплечного интерферометра Тваймана-Грина [3] (см. рис. 2), причем совместно с реперным He–Ne-лазером на длине волны λ = 0,6328 мкм, позволяющим проводить первичные юстировочные работы оптико-механических узлов оптической схемы, содержащей 4 рабочих ветви: осветительную, эталонную, измерительную и 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 (4)) по контрасту регистрируемого изображения. В качестве фотоприёмного устройства используется микроболометрическая матрица на основе аморфного кремния, которая обладает высокой чувствительностью на длине волны 10,6 мкм (<0,08 °С), большим числом элементов (не менее 320×240) для обеспечения хорошей детализации регистрируемой интерференционной картины, отсутствием дорогих и сложных систем охлаждения, небольшими габаритами и низким энергопотреблением.

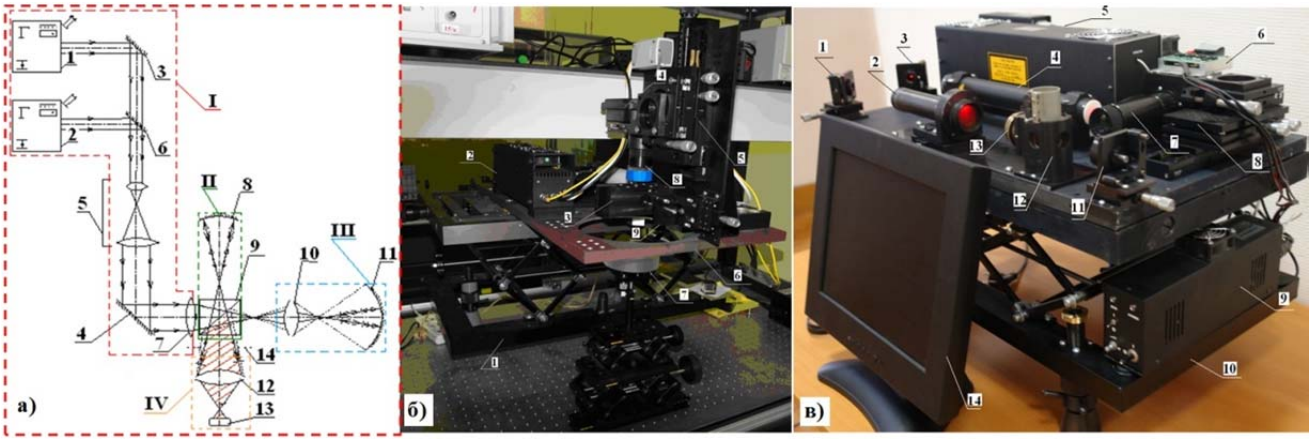

Рис. 2. а) Модифицированная функциональная схема неравноплечего интерферометра Тваймана-Грина: I – осветительная ветвь: 1 – CO_2-лазер, 2 – He–Ne-лазер реперного канала, 3, 4 – наклонные зеркала, 5 – телескопическая система, 6 – зеркальная система ввода излучения, 7 – фокусирующий объектив; II – эталонная 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); б) Фотография внешнего вида разработанного неравноплечного ИК-интерферометра Тваймана–Грина вертикального контроля; в) Фотография внешнего вида разработанного неравноплечного ИК-интерферометра Тваймана–Грина горизонтального контроля.

Источник излучения (на длине волны λ = = 10,6 мкм) в измерительной ветви формирует лазерный пучок с соответствующей кривизной поверхности волнового фронта [4–6]. Далее сферический волновой фронт трансформируется компенсатором 10 таким образом, что вся совокупность лучей, выходящих из него, полностью совпадает с нормалями 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, отражённая от эталонного зеркала, с комплексной амплитудой $U_o(x,y)$. Электромагнитное поле, рассеянное шлифованной оптической 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 [3, 7, 8].

Результат интерференции двух сферических волн, а именно, $U_o(x,y)$ от эталонного зеркала и $U_s(x,y)$ от контролируемой шлифованной поверхности, можно записать в виде

$$U_\Sigma = U_S + U_0 = \frac{u_S}{r}(r)e^{-i(\varphi(x,y)+\varphi_h(x,y))} + \\ + \frac{u_0}{r}(r)e^{-i\varphi_0(x,y)}, \quad (5)$$

где u_S – амплитуда сферической волны, отражённой от контролируемой шлифованной оптической поверхности; u_0 – амплитуда сферической волны, отражённой от эталонной (идеальной) оптической поверхности; r – радиус кривизны сферической волны отражённой от контролируемой шлифованной (шероховатой) оптической поверхности; r_0 – радиус кривизны сферической волны отражённой от эталонной (идеальной) оптической поверхно-

сти; $\varphi_h(x,y)$ – случайный фазовый набег при отражении электромагнитной волны от шлифованной поверхности, обусловленный статистически случайным микропрофилем оптической поверхности с параметром микронеровности h.

Выражение для среднего значения интенсивности результирующего поля (5) запишется в виде

$$\langle I(x,y)\rangle = \left\langle |U_\Sigma|^2 \right\rangle = \left\langle \frac{u_S^2}{r^2}(x,y) \right\rangle + \left\langle \frac{u_0^2}{r_0^2}(x,y) \right\rangle + \\ + \frac{2}{r_0 r}\langle u_S(x,y)\rangle\langle u_0(x,y)\rangle \cos\left[\varphi'(x,y) - \varphi_0(x,y)\right], \quad (6)$$

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

Для аналитического решения (6) необходимо определить поле, рассеянное ансамблем шероховатых оптических поверхностей – $\langle u_S(x,y)\rangle$, что, в свою очередь, требует нахождения статистических характеристик [3, 7, 8]: плотности распределения высот микронеровностей на шероховатой поверхности, радиуса корреляции шероховатой поверхности – $\rho_к$, СКО высот микронеровностей шероховатой поверхности – σ. Кроме того, следует для каждого типа шероховатости определить средний радиус кривизны микронеровностей [3, 7, 8], определяемый выражением:

$$R_{кр.} = \frac{l_{кор.}^{\ 2}}{h(x,y)} = \frac{l_{кор.}^{\ 2}}{R_a} \quad (7)$$

где $l_{кор.} = 2\rho_к$ – длина корреляции микропрофиля оптической шероховатой поверхности; R_a – среднее арифметическое отклонение микропрофиля оптической шероховатой поверхности (высотный параметр) [3].

С помощью профилометра – профилографа Surfcorder 1700α – были измерены профили ряда оптических шероховатых поверхностей, соответствующие стадиям грубого, средне-грубого и среднего шлифований, обработанные абразивными микропорошками различной фракции [1–3] № 4, М40 и М28 соответственно.

На рис. 3 показаны семейства кривых распределений плотностей вероятностей высот микронеровностей и графики корреляционных функций, позволяющие определить радиусы корреляции для соответствующих оптических шероховатых поверхностей.

Результаты измерений статистически усредненных величин для соответствующих шлифованных (ещё шероховатых) поверхностей приведены в табл. 1.

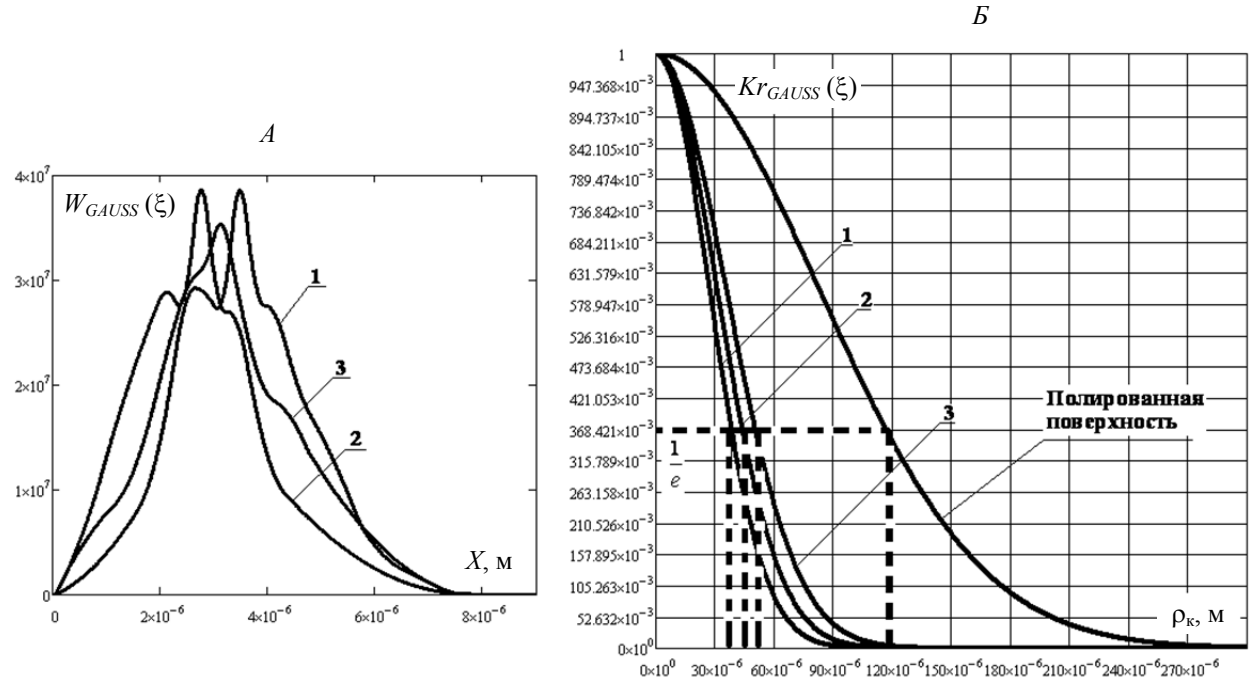

Рис. 3. Графики: А) – распределения высот микронеровностей контролируемых шероховатых поверхностей: 1 – обработанная абразивным микропорошком М40, 2 – обработанная абразивным микропорошком М28, 3 – обработанная абразивным шлиф. порошком № 4; Б) – корреляционных функций с соответствующими индексами.

Таблица 1

Статистические параметры шероховатых поверхностей

№	Группа шлиф. порошков (микропорошков)	Средний размер зерна, мкм	R_a, мкм	$\sigma_{(h=Ra)}$, мкм	$\rho_к$, мкм	$R_{кр.}$, мкм
Стадия грубого шлифования						
2	№ 4	47	1,664	1,49	57	7810
Стадия средне-грубого шлифования						
3	М40	32	1,106	0,9	60	13019,9
Стадия среднего шлифования						
4	М28	18	1,077	0,8	67	16672

Проведённый анализ показал, что плотности распределения вероятностей высот микронеровностей, на оптических шлифованных (шероховатых) поверхностях контролируемых деталей близки к нормальному закону распределения (см. рис. 3, *А*) для всех образцов шлифованных поверхностей. Микронеровности контролируемых поверхностей обладают значительными протяжённостями и большими, по сравнению с длиной волны λ падающего излучения, радиусами кривизны (т. е. плавностью). Полученные экспериментальные данные позволяют оценить возможность применения для нахождения поля, рассеянного шероховатыми поверхностями, метода Кирхгофа [3, 7, 8]. Для этого должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} l_{кор}^2 = (2\rho_к)^2 >> \sigma_{(h=Ra)}^2 - \text{условие пологости} \\ l_{кор} = (2\rho_к) >> \lambda - \text{условие протяжённости} \\ \text{(крупномасштабности) поверхности} \\ \dfrac{2\pi}{\lambda} R_{кр.} \cos\Theta_{ПАД.} >> 1 - \text{условие плавности.} \end{cases} \quad (8)$$

Как следует из данных табл. 1, все указанные условия (8) выполняются для исследуемых поверхностей, поэтому для последующего анализа используется модельное представление Кирхгофа. В рамках принятой модели шлифованные поверхности представляются в виде набора плоских площадок (т. н. фасеточной структуры) [3, 7, 8], 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 отражённого электромагнитных полей [3, 7, 8].

В соответствии с [3], среднее (по ансамблю поверхностей) значение отражённого от шероховатой поверхности поля при его нормальном падении, с учётом нормального закона распределения плотности вероятности высот микронеровностей, будет определяться выражением:

$$\left\langle U_S(r) \right\rangle = U_0(r) \exp\left(-8\pi^2 \left(\frac{\sigma}{\lambda} \right)^2 \right). \quad (9)$$

Подставляя (9) в (6), получаем выражение для среднего значения интенсивности (6), которое в параксиальном приближении запишется в виде [3]:

$$\left\langle I(x,y) \right\rangle = \left\langle \left| U_\Sigma \right|^2 \right\rangle = 2\left[1 + \exp\left(-8\pi^2 \left(\frac{\sigma}{\lambda} \right)^2 \right) \cos\left(2\left[\frac{\pi(r - r_0)}{\lambda} + \frac{\pi(x^2 + y^2)}{2\lambda} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \right] \right) \right] \quad (10)$$

где $x^2 + y^2$ – величины радиусов интерференционных колец в результирующем интерференционном поле.

Чёткость интерференционных колец в определённой точке плоскости анализа с координатами *x*, *y* определяется видностью или контрастом, который, в соответствии с (10), выражается соотношением [3]:

$$C = \frac{\left\langle I(x,y)_{\max} \right\rangle - \left\langle I(x,y)_{\min} \right\rangle}{\left\langle I(x,y)_{\max} \right\rangle + \left\langle I(x,y)_{\min} \right\rangle} = \exp\left(-8\pi^2 \left(\frac{\sigma}{\lambda} \right)^2 \right). \quad (11)$$

На рис. 4, *а* приведена кривая зависимости видности интерференционной картины от соотношения σ/λ. Видно, что с увеличением параметра микронеровности шероховатой поверхности при фиксированной длине волны генерации лазерного излучения контраст интерференционной картины в целом ухудшается. Для фиксированных высот микронеровностей контролируемой оптической поверхности целесообразно увеличивать длину волны генерации, поскольку в этом случае соотношение σ/λ уменьшается, а контраст интерференционной картины увеличивается.

Предложенный метод определения СКО

На основе полученной аналитической зависимости (11) контраста видеоизображений интерференционных картин от характерного соотношения σ/λ в работе предложен метод определения СКО параметров профилей шероховатости контролируемых оптических поверхностей [3]. Для реализации предложенного метода в работе представлена методика измерения величины σ, состоящая из следующих этапов: 1) регистрация видеоизображений интерферограмм; 2) усреднение по ансамблю сечений в интерферограммах с целью определения среднего значения интенсивности (10) (см. рис. 4, *б*); 3) предварительная нормировка средних линий интенсивностей в интерферограммах, полученных от шлифованных поверхностей относительно средней линии интенсивности в интерферограмме, зарегистрированной от полированной поверхности; 4) определение контраста по усреднённым значениям реализаций интерференционных изображений на основе амплитуд средних значений интенсивностей (см. рис. 4, *б*); 5) определение величины СКО в соответствии с нижеследующим выражением:

$$\sigma = (\lambda/\pi)\sqrt{\left(-\frac{1}{8}\right)\times\left(\ln\left(\frac{\langle I(x,y)_{\max}\rangle - \langle I(x,y)_{\min}\rangle}{\langle I(x,y)_{\max}\rangle + \langle I(x,y)_{\min}\rangle}\right)\right)}. \quad (12)$$

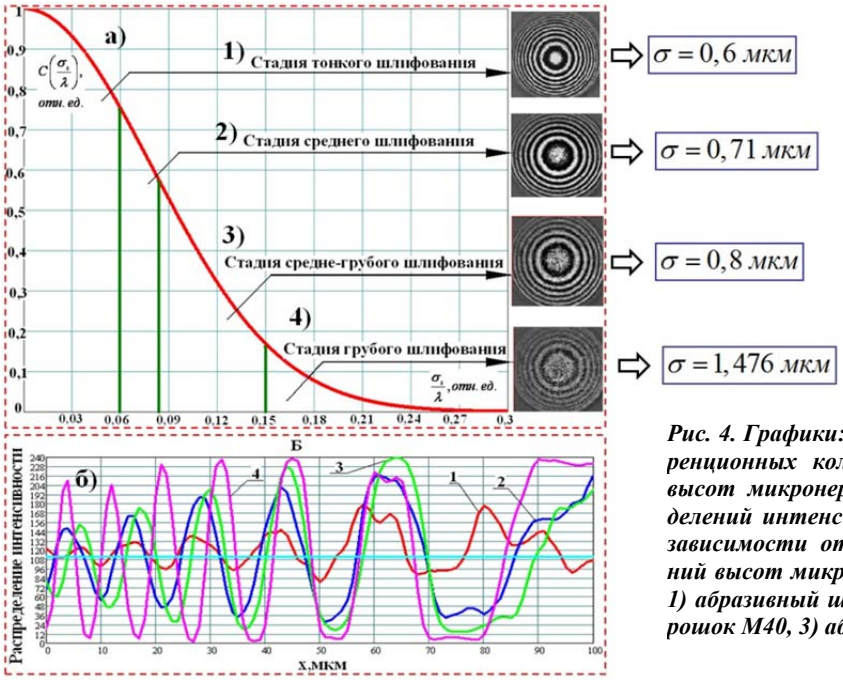

Рис. 4. Графики: а) контраста видеоизображения интерференционных колец (для нормального распределения СКО высот микронеровностей); б) экспериментальных распределений интенсивностей в интерференционной картине в зависимости от влияния среднеквадратических отклонений высот микронеровностей шлифованных поверхностей: 1) абразивный шлиф. порошок № 4, 2) абразивный микропорошок М40, 3) абразивный микропорошок М28, 4) полирит.

В результате проведённых интерферометрических измерений формы шлифованных оптических поверхностей, обработанных абразивными порошками различной фракции (№ 4, М40, М28), были получены интерференционные изображения (см. рис. 4, *а*) по контрасту, из которых, в соответствии с (12), были определены величины СКО высот микронеровностей контролируемых поверхностей, т. е. σ. Из-за случайного характера распределения микронеровностей контролируемых поверхностей, использовалось усреднение по 50 интерференционным изображениям, в результате чего были найдены распределения средних значений интенсивностей и величин контраста в интерференционных картинах при контроле шлифованных оптических поверхностей, обработанных абразивными порошками № 4, М40, М28 (см. рис. 4, *а*, *б*).

Полученные значения величин СКО высот микронеровностей были сравнены с результатами измерений, проведёнными на профилометре – профилографе Surfcorder 1700α – для соответствующих шлифованных оптических поверхностей (см. табл. 1). Результаты сравнения представлены в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что значения среднеквадратических величин параметров микронеровностей, измеренных на профилометре–профилографе, хорошо согласуются с СКО параметров микронеровностей, найденных в резуль-

тате интерферометрического контроля шлифованных оптических поверхностей. Полученные результаты также хорошо соотносятся с результатами, полученными в работах [16, 17].

Таблица 2

Оценка погрешностей интерферометрических измерений СКО высот микронеровностей

Группа шлиф. порошков (микропорошков)	Средний размер зерна, мкм	Среднеквадратическое отклонение высот микрорельефа σ, мкм (изм. профилометром)	Среднеквадратическое отклонение высот микрорельефа σ, мкм (изм. интерферометром)	Контраст интерференционной Картины
Стадия среднего шлифования				
М28	18	0,8	0,71	0,8
Стадия средне-грубого шлифования				
М40	32	0,9	0,8	0,634
Стадия грубого шлифования				
№ 4	47	1,49	1,476	0,216

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что предложенный и научно обоснованный метод и соответствующая аппаратура позволяют контролировать с высокой точностью не только форму оптической поверхности, но и определять СКО высот микронеровностей от базовой плоскости с абсолютной погрешностью (относительно профилометрических измерений) порядка 5 % (см. табл. 2). Стоит отметить также, что особенностью предложенного метода является возможность автоматизации процесса формообразования как плоских, так и вогнутых оптических поверхностей на основе представленной на рис. 4, *а* функциональной зависимости C(σ/λ). Именно в этом заключается его основное преимущество по сравнению с широко используемым в цеховых условиях контактным методом измерения профиля контролируемой поверхности с помощью профилометра–профилографа. Результаты измерения последнего, как правило, анализируются и сопоставляются с разработанной технологической картой производства изделия [1–3], что позволяет сменять технологические переходы и соответствующие им кинематические характеристики станочной аппаратуры [1, 2].

Метод определения параметров микрошероховатостей поверхностей оптических деталей как критерий проведения методики светоэнергетического расчёта ИК-интерферометра

Полученное аналитическое выражение (12) для одного из основных выходных параметров ИК-интерферометра послужило основой для разработки критерия выбора предельно минимальной мощности источника лазерного излучения, достаточной для регистрации и последующей обработки анализируемых интерферограмм. С этой целью было проведено сравнение шага квантования $\Delta(\sigma/\lambda)$ [3, 9, 10] среднего значения распределения интенсивности (10), соответствующего определенному уровню контраста (12) видеоизображения интерферограммы, с величиной СКО шума $\sigma_{ш}$ [3, 9, 10] в видеоизображении, определяемого следующим выражением [9, 10]:

$$\sigma_{ш} = \frac{S_{\lambda}\sqrt{A_{ПИ}\cdot\Delta\nu}}{D^{*}}, \qquad (13)$$

где S_{λ} – максимальная чувствительность приёмника излучения; $A_{ПИ}$ – площадь чувствительного элемента приёмника излучения, мкм; $\Delta\nu = \nu_{к}\times N_{эл}$ – полоса пропускания электронного тракта; $\nu_{к}$ – частота кадров; $N_{эл}$ – количество элементов; D^{*} – удельная обнаружительная способность, т. е. величина, обратная пороговой мощности и нормированная на единичную площадь $A_{ПИ}$ и единичную полосу пропускания $\Delta\nu$, которую можно представить в виде формулы из работ [9, 10]:

$$D^{*} = \frac{\sqrt{A_{ПИ}\times\Delta\nu}}{\Delta T_{n}\alpha_{x}\alpha_{y}A_{зр}\varepsilon(T)\int_{0}^{\infty}\left.\frac{\partial L_{\lambda}^{0}(\lambda,T)}{\partial T}\right|_{T}\tau_{a}(\lambda)\tau_{0}(\lambda)S_{отн}(\lambda)d\lambda}, \qquad (14)$$

где ΔT_{n} – эквивалентная шуму разность температур, определяемая как наименьшая разность температур между протяжённым тепловым объектом и фоном, при которой отношение сигнал/шум – $\mu_{П} = \Delta U/\sigma_{ш}$ равно 1; ΔU – информативный сигнал, определяемый мощностью порогового потока; $\alpha_{x} = \alpha_{y} = A_{ПИ}/f'$ – угловые размеры чувствительного элемента фотоприёмника; f' – фокусное

расстояние приёмного объектива; $A_{зр}$ – площадь входного зрачка объектива; $\varepsilon(T)$ – коэффициент серости, равный 0,8 для ИК-диапазона в соответствии с [9]; $\tau_a(\lambda)$ – коэффициент пропускания атмосферы; $\tau_0(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптической системы; $S_{отн}(\lambda)=1$ – относительная спектральная чувствительность; $L_\lambda^0(\lambda,T)=$ $=c_1/\left(\pi\lambda^5(\exp(c_2/\lambda\times T)-1)\right)$ – контрастная яркость; c_1 = 37415 – константа; c_2 = 14388 – константа; $\pi=3{,}14$ – константа; λ = 10,6 мкм – длина волны электромагнитного излучения; T = 300 К – температура.

Полученное значения удельной обнаружительной способности D^* позволяет рассчитать значение порогового потока излучения $\Phi_{ПОР}$ [9,10]

$$\Phi_{ПОР}=\frac{\sqrt{A_{ПИ}\times\Delta\nu}}{D^*}, \qquad (15)$$

величина которого впоследствии сравнивается со значением эффективного потока излучения $\Phi_{эф}$ [9,10], приходящего в плоскость фоточувствительных элементов приёмника излучения и определяемого исходной мощностью лазера и светопропусканием оптического тракта системы.

С целью численной оценки светоэнергетического расчёта ИК-интерферометра в работе были рассмотрены следующие проектные характеристики элементов и узлов прибора, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Проектные и конструктивные характеристики ИК-интерферометра как исходные данные для проведения светоэнергетического расчёта

	Проектный параметр или характеристика	Номинальное (паспортное) значение параметра или характеристики
	Технические характеристики лазера LCD-10A	
1	Длина волны лазерного излучения	10,6 мкм
2	Регулируемая мощность лазерного излучения	1–5 Вт
3	Диаметр пучка лазерного излучения на выходном зеркале	2 мм
4	Ширина линии излучения (за время наблюдения 0,1–1 с)	1 МГц
	Микроболометрическая неохлаждаемая камера IR112	
5	Формат матрицы	320×240
6	Спектральный диапазон	(8–14) мкм
7	Размер элемента	30 мкм
8	Чувствительность элемента	<0,08 °С
9	Частота кадров	30 Гц
	Элементы и узлы оптического тракта приёмного канала системы	
10	Фокусное расстояние проекционного объектива	60 мм
11	Площадь входного зрачка объектива	900 мм
12	Коэффициент пропускания (интергральный для оптических элементов из материалов ZnSe и Ge)	0,8
13	Относительная спектральная чувствительность	1
14	Коэффициент пропускания атмосферы	0,8

На основе представленных данных в табл. 3, а также полученной функциональной зависимости (11), в работе проведён численный анализ методики определения минимальной мощности источника лазерного излучения, включающей следующий следующие этапы:

1) определение удельной обнаружительной способности D^* в соответствии с (14):

$$D^*=2{,}23\times10^6\ \frac{\text{м Гц}^{1/2}}{\text{Вт}};$$

2) расчет величины порогового потока $\Phi_{ПОР}(D^*)$ в соответствии с (15)

$$\Phi_{ПОР}(D^*)=0{,}027\times10^{-6}\ \text{Вт};$$

3) определение СКО шума в видеоизображении интерференционной картины в соответствии с (13):

$$\sigma_ш=2{,}7\times10^{-3}\ \text{Вт};$$

4) определение шага квантования $\Delta(\sigma/\lambda)$ среднего значения интенсивности $\langle I(x)\rangle$ (см. рис. 5, *а*, *б*), соответствующей определённому значению контраста видеоизображения интерференционной картины (см. рис. 4, *а*).

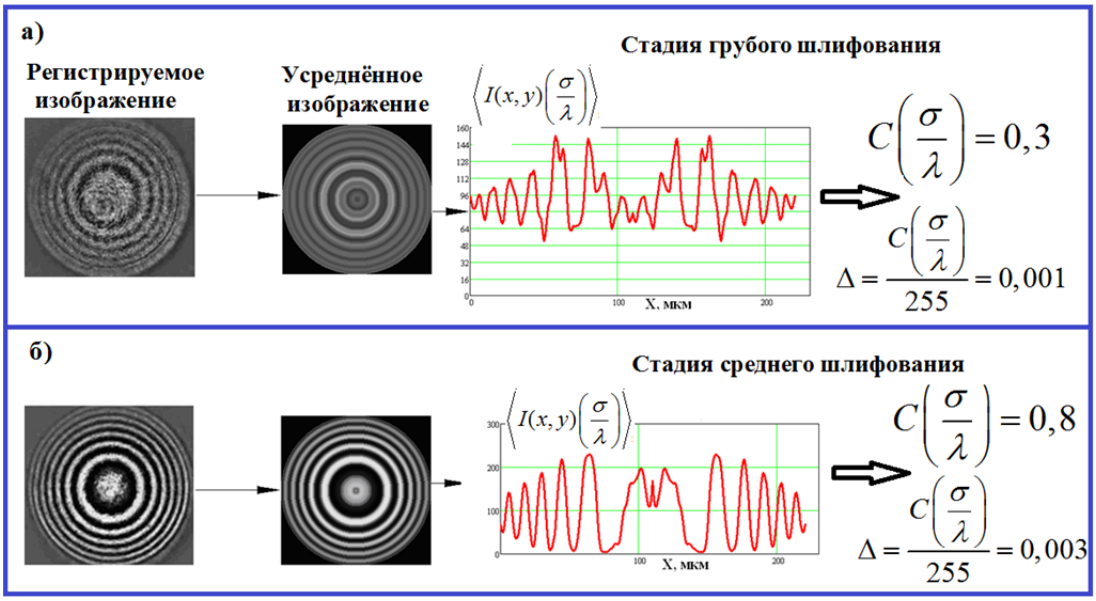

Рис. 5. К определению шага квантования распределения средней интенсивности в видео-изображениях интерференционных картин, регистрируемых: а) на стадиях грубого шлифования (σ/λ = 0,119) и б) среднего шлифования (σ/λ = 0,047).

В соответствии с графиком функции выходного параметра ИК-интерферометра (см. рис. 4, *а*), на основе результатов обработки данных (см. рис. 5) шаг квантования для 8-битного аналого-цифрового преобразователя, имеющего 255 уровней цветовых градаций, составил величину 0,003 для стадии среднего шлифования ($\sigma/\lambda = 0,119$) при контрасте 0,8 (см. рис. 5, *а*) и 0,001 на стадии грубого шлифования ($\sigma/\lambda = 0,047$) при контрасте 0,3 (см. рис. 5, *б*) соответственно. Полученные значения $\Delta(\sigma/\lambda)$ далее сопоставляются с величиной $\sigma_ш$ на последующем этапе.

Далее необходимо провести анализ соотношения между величиной

$$\Delta\left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)=\frac{1}{255}\left(\frac{\left\langle I(x,y)_{\max}\left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)\right\rangle-\left\langle I(x,y_{\min}\left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)\right\rangle}{\left\langle I(x,y)_{\max}\left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)\right\rangle+\left\langle I(x,y)_{\min}\left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)\right\rangle}\right), \quad (16)$$

и $\sigma_ш(\Phi_{ПОР})$, определяемой в соответствии с (13) при требуемом соотношении

$$\Phi_{эф} > \Phi_{ПОР}. \quad (17)$$

На основании данных, представленных на рис. 4, *а* и 5, можно видеть, что на стадии среднего шлифования выполняется условие $\Delta > \sigma_ш$, а на стадии грубого шлифования $\Delta < \sigma_ш$. Полученные результаты свидетельствуют о том, разработанный метод и соответствующая оптико-электронная аппаратура позволяют проводить промежуточный технологический контроль параметров шероховатости, начиная со стадии среднего шлифования, когда $\Delta > \sigma_ш$, без применения методов пространственно-частотной фильтрации спекл-шума [3], наличие которого в значительной степени проявляется на стадии грубого шлифования. При этом минимальная мощность источника лазерного излучения составляет порядка 5 Вт, что соответствует эффективному потоку излучения $\Phi_{эф}$ = 3,8 Вт и удовлетворяет условию (17).

Интерференционный метод и аппаратура для контроля параметров шероховатости нанометрового уровня поверхностей оптических деталей на стадиях прецизионного полирования

Для реализации высокоточного метода контроля параметров шероховатости нанометрового уровня в настоящей работе рассмотрен лабораторный измерительный стенд на базе динамического интерферометра с диаметром выходного зрачка 100 мм. Предложенный метод основан на частотном анализе [11–15, 18] профиля контролируемой детали в заданном диапазоне масштабов локальных неоднородностей, совокупность которых описывает структуру её исследуемой поверхности. В общем случае функцию, описывающую структуру локальных отклонений профиля оптической детали, можно представить в виде набора гармоник соответствующих пространственных частот, определяющих такие его технологические пара-

метры, как непрямолинейность и волнистость [3, 11, 12, 18] . Эти локальные отклонения обусловлены свойствами обрабатывающих инструментов с погрешностью метода обработки оптических изделий [1, 2]. Помимо указанных параметров формы профиля, высокочастотные гармоники характеризуют степень шероховатости, которая образуется при съёме материала в процессе формообразования детали полирующими суспензиями [1–3].

Для описания неоднородностей искажений волновых фронтов при контроле оптических элементов можно использовать международный классификатор качества изготовления активных лазерных сред технологического комплекса NIF (National Ignition Facility, США), представленный в виде набора характеристик для четырёх пространственно-частотных диапазонов [11, 12, 15, 18] (см. табл. 4).

Таблица 4

Технологические требования к оптическим деталям при пространственно-частотном анализе неоднородностей поверхности

Характеристика	Пространственно-частотный диапазон			
	I	II	III	IV
Пространственная частота неоднородностей искажений волнового фронта, мм$^{-1}$	0–0,03	0,03–0,10	0,4–1,0	10–100
Пространственный масштаб неоднородностей искажений волнового фронта, мм	до 33	33–2,5	2,5–0,1	0,1–0,01
Статистические показатели искажений волнового фронта:				
PV, нм	208	–	–	–
RMS_{grad}, нм/см	7	–	–	–
RMS, нм	–	1,8	1,1	–
Rq, нм	–	–	–	0,4

Диапазоны I-III характеризуют искажения параметров волнового фронта лазерного пучка, обусловленные ошибками формы исследуемых оптических деталей, а четвёртый диапазон характеризует шероховатость профилей [3] их поверхностей. Указанные в таблице величины искажений волнового фронта оцениваются в диапазоне I статистическими показателями PV (peak to valley – максимальное расстояние между высотой наибольшего выступа и глубиной наибольшей впадины искажений) [3–6,11–15, 18], RMS_{grad} (root mean square gradient – СКО градиента искажений) [11, 12, 15, 18], а в диапазонах II и III параметром RMS [3–6, 11–15, 18], характеризующим отклонения формы волнового фронта [4–6] в высокочастотной области [11, 12, 15, 18]. Для оценки шероховатости в IV диапазоне используют параметр Rq [3, 11–15, 18], который определяет СКО точек профиля поверхности оптической детали в пределах заданной области исследования (базовой площади). Аналитическое описание параметры Rq имеет то же вид, что и величина RMS, но определяется на малой базовой площади [3, 15, 18].

Стоит отметить, что при переходе от указанных статистических показателей искажений волнового фронта [4–6] к параметрам профиля [3, 11–15, 18] исследуемой детали вводится нормирующий множитель 0,5, впоследствии учитываемый в алгоритме расчёта.

Важно отметить, что приведённые в табл. 4 показатели качества являются оптимизационными параметрами целевой функции аттестационного контроля профиля оптической детали, в качестве которой предлагается использовать спектральную плотность одномерной корреляционной функции профиля поверхности СПКФ1 или $\overline{S1D}(\nu)$, нм^2 мм (где ν – пространственная частота, 1/мм). В качестве критериев оптимизации данной функции используются допустимые (максимальные) значения погрешностей определения приведённых в табл. 4 показателей качества.

Традиционный метод аттестационного контроля [11, 12, 15, 18] основан на сравнении построенной функции $\overline{S1D}(\nu)$ с функцией $S1D_{ISO}(\nu)$, нм^2 мм, определяемой согласно стандарту ISO 10110 [15]:

$$S1D_{ISO}(\nu) = \frac{A}{\nu^B}, \quad \frac{1}{1000 \times D} < \nu < \frac{1}{1000 \times C}$$

где $S1D_{ISO}(\nu)$ – СПКФ1, построенная в соответствии со стандартом ISO10110; A – константа (1 для стекла [11, 12, 15], 15 для кристаллических сред [11, 12, 15, 18]); $1 < B < 3$ – константа; C – предел разрешения прибора (мкм); D – длина, на которой производится измерение (мкм); ν – пространственная частота, мкм$^{-1}$.

При превышении функции $\overline{S1D}(\nu)$ в указанном пространственно-частотном диапазоне функции $S1D_{ISO}(\nu)$ можно судить о наличии недопу-

стимых локальных отклонений поверхности от заданного профиля и говорить о непригодности оптической детали для её последующего функционирования, что отражено на рис. 6, *а*, *б*. Детально данная методика приведена в [11, 12, 15, 18].

Следует отметить, что возможные пространственные неоднородности в промежуточных сечениях исходной функции $S2D(\nu_x, \nu_y)$, нм^2 мм^2, обусловленные наличием локальных отклонений поверхности (рис. 6, *а*), могут внести существенный вклад в структуру погрешности определения результирующего значения какого-либо статистического показателя качества исследуемой формы волнового фронта. Поэтому данный метод аттестационного контроля не позволяет судить об истинном качестве оптической детали в широком диапазоне пространственных частот локальных отклонений.

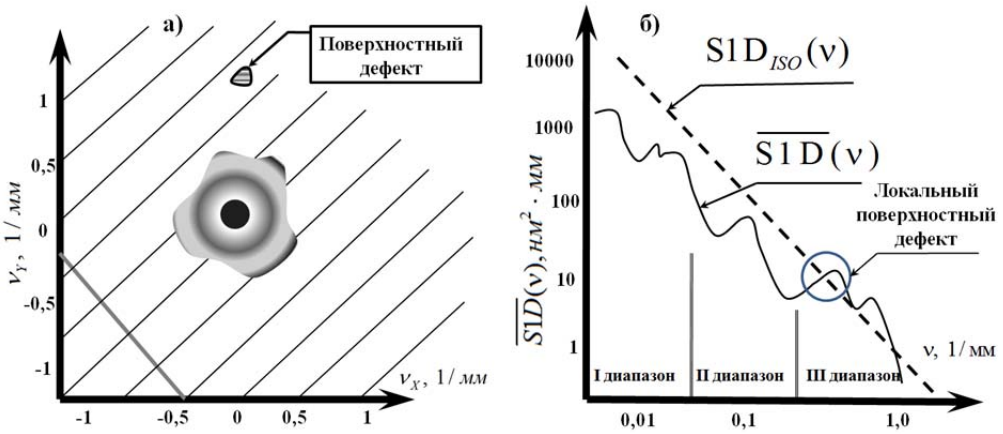

Рис. 6. Иллюстрация методики аттестационного контроля локальных отклонений поверхности оптического элемента технологического комплекса NIF: а – вид исходной функции $S2D(\nu_x, \nu_y)$ и её сечение под углом 60°; б – соответствующая сечению усреднённая функция $\overline{S1D}(\nu)$ и построенная согласно стандарту [15] функция $S1D_{ISO}(\nu)$.

В данной работе предлагается альтернативный метод, основанный на использовании алгоритма расчёта $\overline{S1D}(\nu)$ в результате статистического усреднения отдельно взятых направлений вдоль радиуса–вектора в информативной матрице исходной функции $S2D(\nu_x, \nu_y)$. Для получения функции $S2D(\nu_x, \nu_y)$ можно использовать два подхода. Первый базируется на теории статистических измерений и позволяет определить искомую функцию как интеграл от автокорреляционной функции распределения высот исследуемой карты профиля $h(x, y)$ [3, 12–15, 18]:

$$S2D(\nu_x,\nu_y)=\frac{1}{ab}\times\int_{-b/2}^{b/2}\int_{-a/2}^{a/2}Kr\left[h(x,y)\right]\times\exp\left\{-2\pi i(\nu_x x+\nu_y y)\right\}dxdy,$$

$$Kr\left[h(x,y)\right]=M[(h(x_1,y_1)-\overline{h(x,y)})\times(h(x_2,y_2)-\overline{h(x,y)})],$$

где a, b – размеры световой апертуры детали, характеризующие область исследования вдоль осей x, y соответственно; $Kr\left[h(x,y)\right]$ – автокорреляционная функция или математическое ожидание произведения разностей функций высотных параметров профиля $h(x_1,y_1)$, $h(x_2,y_2)$ и их среднего значения $\overline{h(x,y)}$.

Реализация второго метода расчёта функции $S2D(\nu_x,\nu_y)$ предполагает использование теоремы Винера–Хинчина [12, 18]. При этом можно найти искомую двумерную функцию стационарного, в широком смысле, случайного процесса как квадрат модуля преобразования Фурье-функции высотных параметров карты профиля оптической поверхности $h(x, y)$, приведённой к единичной площади $a\times b$ (области исследований):

$$S2D\left(\nu_x,\nu_y\right)=\left|\Im\left\{h(x,y)\right\}\right|^2\Big/(ab),$$

$$\Im\left\{h(x,y)\right\}= \tag{18}$$

$$=\int_{-a/2}^{a/2}\int_{-b/2}^{b/2}h(x,y)\exp(-2\pi i(\nu_x x+\nu_y y))\,dxdy$$

где $\Im\left\{h(x,y)\right\}$ – преобразование Фурье функции $h(x,y)$.

Для дальнейших исследований будем использовать второй метод, поскольку его применение обеспечивает более высокую точность вычислений. Приведённый алгоритм позволяет проанализировать пространственные частоты и количественно рассчитать СКО соответствующих им неоднородностей поверхности (см. табл. 4) на основе теоремы Парсеваля [12, 18]:

$$RMS_{S1D}(\nu) = \left(2\pi \int_{\nu_{min}}^{\nu_{max}} \overline{S1D}(\nu) d\nu \right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (19)$$

где ν_{max}, ν_{min} – значения максимальной и минимальной пространственных частот исследуемой области (частотный диапазон исследования) на поверхности детали (см. табл. 4).

Стоит отметить, что значения границ диапазонов ($\nu_{max} - \nu_{min}$) указанной частотной шкалы в (19) определяются, с одной стороны, линейной величиной элемента пикселя матрицы, а с другой стороны, размером световой апертурой контролируемой оптической детали. Указанные в табл. 4 требования к искажению волнового фронта лазерного пучка приводятся для световой апертуры 603 мм (диаметральный размер, соответствующий линейному размеру изделия 1000 мм). Для исследования качества поверхностей оптических деталей других диаметров необходимо ввести коэффициент масштабирования шкалы частот $K = 603/D$ [12, 18]. Так, для плоской оптической детали D = 100 мм пространственно-частотные диапазоны I, II и III будут составлять соответственно $\Delta\nu_I$ = 0,01–0,18 мм$^{-1}$; $\Delta\nu_{II}$ = 0,18–2,4 мм$^{-1}$; $\Delta\nu_{III}$ = 2,4–6 мм$^{-1}$.

Частотные шкалы диагностики целевой функции $\overline{S1D}(\nu)$ при расчёте СКО точек профиля поверхности оптической детали в пределах заданной области исследования диаметром 100 мм и 603 мм представлены на рис. 7. Согласно представленной шкале для проведения экспериментальных исследований качества оптической поверхности с диаметром световой апертуры 100 мм используется лабораторный измерительный стенд на базе динамического интерферометра с выходной апертурой 100 мм (рис. 8).

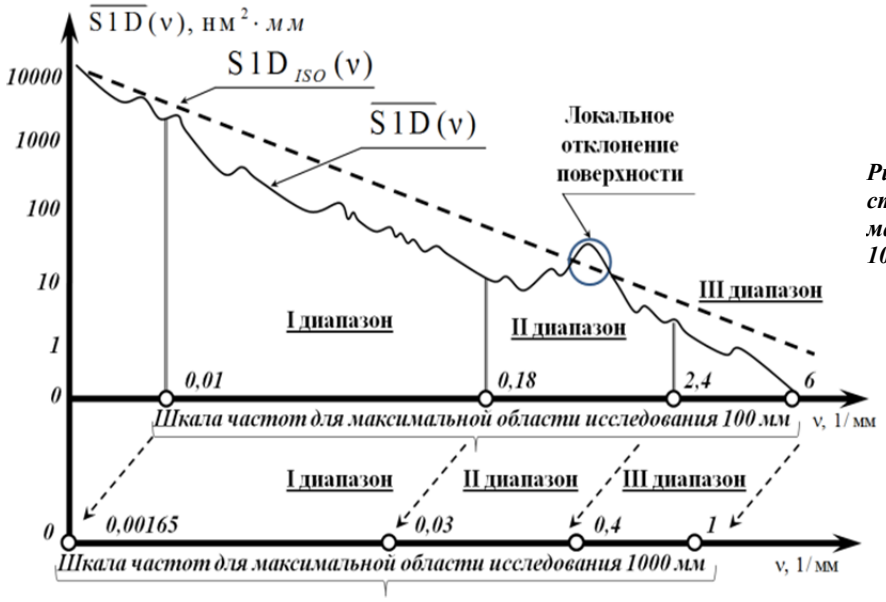

Рис. 7. Иллюстрация связи пространственных частот в трёх диапазонах для максимальных световых апертур 100 мм и 1000 мм соответственно.

Анализируя представленную (см. рис. 7) связь пространственных частот, в работе предлагается провести исследование погрешности СКО профиля поверхности оптической детали в пределах световой апертуры диаметром 100 мм на основе исходных данных (см. табл. 4 и рис. 7) с целью последующей реализации полноапертурного контроля крупногабаритных оптических изделий при проведении дальнейших исследований.

Принцип работы и состав аппаратуры лабораторного измерительного стенда контроля параметров шероховатости поверхностей оптических деталей нанометрового уровня

С целью отработки алгоритма полноапертурного аттестационного контроля неоднородностей искажений волновых фронтов при аттестации крупногабаритных оптических деталей в I и II диа-

пазонах соответствующих пространственных частот (см. табл. 4) в результате расчёта одномерной целевой функции – $\overline{S1D}(\nu)$, были разработана методика и измерительный стенд на базе динамического интерферометра IntelliumH2000 (ESDI, USA). Данный интерферометр построен по оптической схеме Физо [4–6, 12, 18] и имеет выходную апертуру диаметром 100 мм. Функциональная схема стенда представлена на рис. 8.

Измерительный стенд состоит из динамического интерферометра и оптико-механического узла крепления плоского эталонного (контролируемого) зеркала в оправе. Отличительной особенностью используемого в измерительной схеме динамического интерферометра является то, что сдвиг фаз регистрируемых интерферограмм реализуется с помощью трёх поляризаторов, плоскости поляризации которых ориентированы друг относительно друга под углом 120 градусов. Эта особенность позволяет за один кадр получать три реализации при минимальном времени экспозиции 100 мкс при помощи широкоформатных матричных приёмников излучения, что обеспечивает нечувствительность метода контроля к турбулентным потокам воздушных масс и влиянию низкочастотных вибраций, существующих в производственных условия. В состав аппаратуры динамического интерферометра входят осветительный, измерительный и приёмный оптические каналы. Осветительный канал прибора включает источник излучения (He–Ne-лазер, λ = 0,6328 мкм), афокальную оптическую систему 2, плоское поворотное зеркало 3, поляризационные элементы 4, 5 микрообъектив 6 и полупрозрачную пластину 7. Источник излучения осветительной ветви, формирует линейно поляризованное излучение, которое на выходе трансформируется в две ортогонально поляризованные составляющие ($\overline{s}$ и $\overline{p}$-типов поляризации [12, 18]). Обе составляющих распространяются по своим направлениям с различными фазовыми скоростями. В осветительной ветви интерферометра они образуют два пространственно разнесённых источника излучения, расположенные под небольшим углом, составляющим величину порядка трёх мрад относительно оптической оси прибора.

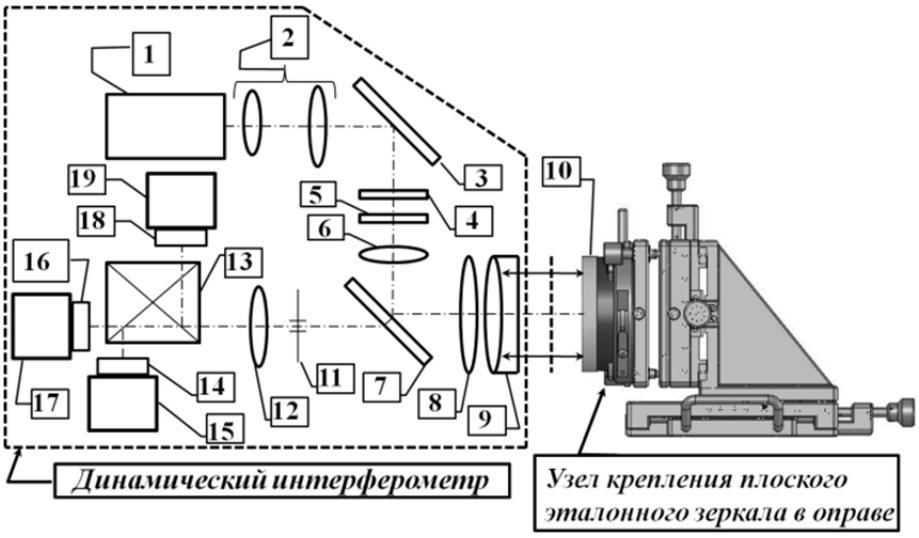

Рис. 8. Функциональная схема лабораторного измерительного стенда на базе динамического интерферометра IntelliumH2000: 1 – источник излучения; 2 – афокальная оптическая система; 3 – плоское зеркало; 4, 14, 16, 18 – поляризаторы; 5, 11 – поляризационный и пространственный фильтры; 6 – микрообъектив; 7 – полупрозрачная пластина; 8 – объектив-коллиматор; 9 – объектив (с плоской эталонной поверхностью); 10 – плоское контролируемое зеркало; 12 – объектив сопряжения; 13 – светоделительный куб; 15, 17, 19 – матрицы фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС-матрицы).

В измерительный канал прибора, состоящий из объектива–коллиматора 8, объектива с плоской эталонной поверхностью 9 и плоского контролируемого зеркала 10, одновременно попадают $\overline{s}$ и $\overline{p}$ ортогонально поляризованные составляющие, каждая из которых в дальнейшем образует две плоские волны, отражённые от эталонной и контролируемой поверхностей соответственно. В результате в приёмный канал прибора, включающий пространственный фильтр 11, приёмную оптическую систему 12, светоделительный куб 13, три матрицы фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС-матрицы) 15, 17, 19, поступает две пары ортогонально поляризованных состав-

ляющих исходной плоской линейно поляризованной волны: ($\overline{s}_э$; $\overline{p}_д$) и ($\overline{p}_э$; $\overline{s}_д$) (индексы «э», «д» относятся к эталону и контролируемой поверхности плоского оптического элемента – оптической детали). Эти составляющие попарно интерферируют в плоскости поляризаторов 14, 16, 18, установленных перед тремя ФПЗС-матрицами приёмного канала. При наклоне контролируемой поверхности плоского оптического элемента на угол, соответствующий ориентации двух исходных источников ($\overline{s}$ - и $\overline{p}$ -типов поляризации) осветительной ветви интерферометра относительно его оптической оси, можно последовательно регистрировать результат суперпозиции составляющих двух пар: ($\overline{s}_э$; $\overline{p}_д$) или ($\overline{p}_э$; $\overline{s}_д$) соответственно. С целью исключения паразитной засветки и минимизации пространственных шумов в приёмный канал динамического интерферометра встроен фильтр пространственных частот в виде точечной диафрагмы (поз. 11 на рис. 8). Для проведения первичных юстировочных работ измерительного и осветительного каналов в составе интерферометра предусмотрен блок наведения, позволяющий ориентировать автоколлимационные блики от эталонной и контролируемой поверхностей. Таким образом, в приборе реализуется поляризационная калибровка [12, 18], позволяющая учитывать инструментальную погрешность измерительного стенда.

Для отработки экспериментальных данных, полученных на основе функциональной схемы измерительного стенда, представленной на рис. 8, в лабораторных и цеховых условиях в работе рассмотрен алгоритм расчёта статистических показателей, характеризующих искажения волнового фронта лазерного пучка [11, 12, 4–6, 18] (см. табл. 4), возникающие при контроле плоских оптических элементов [11, 12, 3].

Разработанный метод определения локальных отклонений исследуемых профилей оптических деталей основан на алгоритме расчёта целевой функции – СПКФ1 ($\overline{S1D}(\nu)$), причем с учётом следующих неисключённых систематических погрешностей: дискретизации, математического аппарата быстрого преобразования Фурье (БПФ), преобразования двумерного стационарного сигнала в одномерный, краевых эффектов БПФ, эффекта спектральной «утечки» частоты [12, 18]. Анализируемый, с точки зрения погрешностей, метод основан на реализации следующих этапов: 1) регистрация исходной топографической карты профиля контролируемой оптической поверхности $h(x, y)$; 2) расчёт в информативной матрице исходной функции $S2D(\nu_x, \nu_y)$ (см. рис. 6, *а*), приведённой к единичной области (площади) исследования в соответствии с (18); 3) расчёт матрицы суммарных пространственных частот; 4) расчёт целевой функции $\overline{S1D}(\nu)$; 5) расчёт оптимизационных параметров целевой функции в заданных пространственно-частотных диапазонах I и II в соответствии с табл. 4.

На первом этапе карта профиля оптической поверхности $h(x, y)$ контролируемой детали формируется приёмной апертурой диаметром A в плоскости матричного приёмника излучения с количеством чувствительных элементов $M{\times}N$ по горизонтали и вертикали соответственно, после чего реализуется операция дискретного БПФ карты профиля оптической поверхности:

$$\tilde{h}_{mn} = \sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1} h_{mn} \exp\left(\frac{-2\pi i n}{N}\right)\exp\left(\frac{-2\pi i m}{M}\right),$$

где M, N, m, n – максимальное количество значимых точек по горизонтальной и вертикальной осям соответственно и их координаты; $\tilde{h}_{mn}$ – дискретное представление карты профиля оптической поверхности.

Полученный спектр $\tilde{h}_{mn}$ регистрируемой карты профиля формируется с учётом линейных размеров исследуемой области детали, так что нормированный спектр имеет вид:

$$h^{н}_{mn} = \tilde{h}_{mn}(A/M)\times(A/N),$$

где A/M, A/N – шаги дискретизации с учётом линейного увеличения приёмного объектива по горизонтальной и вертикальной осям, соответственно.

На втором этапе вычисляется функция $S2D(\nu_x, \nu_y)$ как квадрат модуля двумерного спектра карты профиля, приведённого к единичной области (площади) исследования в соответствии с (18):

$$S2D_{mn} = S^{-1}\left|h^{н}_{mn}\right|^2,$$

где $S = (dx \times dy)\times C$ – площадь контролируемой (исследуемой) детали; $dx = 1/u_{\max}$, $dy = 1/v_{\max}$ – шаги дискретизации, ограничивающие максимальные пространственные частоты $u_{\max} = M/(2A)$, $v_{\max} = N/(2A)$ вдоль горизонтальной и вертикальной осей матрицы $h^{н}_{mn}$; C – число элементов матрицы, содержащей информацию о профиле волнового фронта, отражённого от поверхности плоского оптического элемента (информативная матрица).

При этом матрица суммарных пространственных частот определяется выражением:

$$\nu_{\rho mn} = \sqrt{(u_m)^2 + (v_n)^2}\ , \qquad (20)$$

где $u_m = (m - M + 1/2)/A$, $v_n = (n - N + 1/2)/A$ – векторы частотных сеток по горизонтальной и вертикальной осям, соответственно.

В полученной матрице частот последовательно рассматривается каждая суммарная пространственная частота (20) от меньшей к большей до частоты Найквиста [11–14], соответствующей радиусу максимальной окружности (карты профиля оптической поверхности h_{mn} диаметром $D = 2\sqrt{S/\pi}$), вписанной в матрицу фотоприёмного устройства. В итоге определяются значения векторов суммарных пространственных частот по различным направлениям $\nu_{\rho mn}$ и соответствующие им среднеквадратические значения векторов $\overline{S1D}(\nu)$, которые представляют искомую целевую функцию, приведённую к одномерному виду.

На заключительном этапе в соответствии с (19) находят СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений изотропной поверхности [3, 7, 8] в заданном частотном диапазоне исследования $\nu_{\rho\min} - \nu_{\rho\max}$, проводя сравнительную оценку с данными, представленными в табл. 4:

$$RMS_{S1D}(\nu_{\rm p}) = [2\pi \int_{\bar{\nu}_{\rm p\min}=0}^{\bar{\nu}_{\rm p\max}} \overline{S1D}(\nu_{\rm p}) d\nu_{\rm p}]^{1/2}. \qquad (21)$$

Анализ результатов аттестационного контроля СКО искажений волнового фронта в лабораторных и производственных условиях в пространственно-частотных диапазонах I, II

С целью апробации представленного алгоритма, было разработано авторское программное обеспечение «Collapser» [12, 18] (см. рис. 9), позволяющее проводить аттестационный контроль качества оптических деталей на базе измерений, полученных в лабораторных и производственных условиях. Разработанное программное обеспечение было протестировано на модельных топографических картах, созданных в среде MatLab с заданным СКО неоднородностей искажений волновых фронтов, а также на результатах экспериментальных измерений, полученных в лабораторных и производственных условиях на АО «Лыткаринский завод оптического стекла» на базе измерительного стенда (см. рис. 8). По результатам обработки построенных графических зависимостей одномерных целевых функций $\overline{S1D}(\nu_\rho)$ для пространственных частот остаточных неоднородностей (см. рис. 9) можно определить величину их СКО в диапазонах I, II для деталей в диаметре 100 мм в соответствии с (21).

В табл. 5 приведены сравнительные значения СКО модельных топографических карт *RMSm*, рассчитанные в среде MatLab и полученные в результате расчёта по разработанному алгоритму *RMS*m.* Расхождение между расчётными значениями, представленное в виде относительной погрешности $\Delta_m = \sqrt{(RMS_{\rm m})^2 - (RMS*_m)^2} \big/ RMS_m$, не превышает 2 %, как это следует из табл. 5.

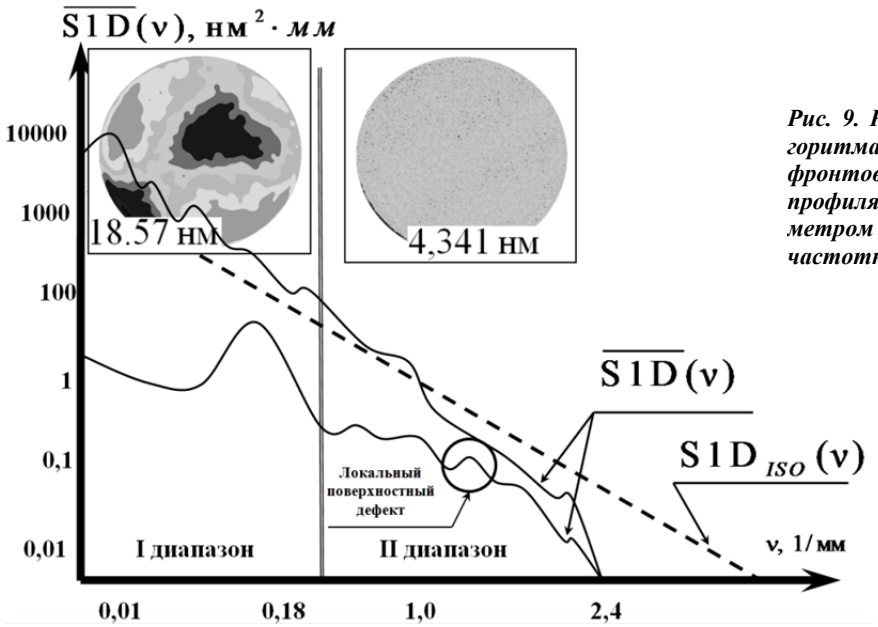

Рис. 9. Результаты расчёта разработанного алгоритма определения СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений профиля плоской эталонной поверхности диаметром 100 мм в двух пространственно-частотных диапазонах.

Таблица 5

Результаты расчёта СКО неоднородностей для модельных топографических карт профилей оптической поверхности в пространственно-частотном диапазоне I-II

Модель	RMS_m, нм	RMS^*_m, нм	Δ_m, %
1	15,454	15,452	1,6087
2	15,476	15,479	1,9690
3	14,346	14,349	2,04

Полученные и приведённые в табл. 5 результаты позволяют судить о корректности рассмотренных в работе научных положений по разработке алгоритма обработки экспериментальных результатов, полученных при контроле искажений волновых фронтов для плоских оптических элементов (см. рис. 9).

В табл. 6 представлены значения СКО экспериментальных данных, полученных с помощью лабораторного измерительного стенда (рис. 8), а также с помощью разработанного алгоритма – соответственно *RMSe*, *RMS*e*, причем приведены также относительные погрешности $\Delta_e = \sqrt{(RMS_e)^2 - (RMS*_e)^2} \Big/ RMS_e$.

Таблица 6

Результаты расчёта СКО искажений волновых фронтов неоднородностей экспериментальных топографических карт контролируемых плоских оптических элементов диаметром 100 мм в соответствующих пространственно-частотных диапазонах I-II

Реализация	RMS_e, нм	RMS^*_e, нм	Δ_e, %
I диапазон (0,01–0,18), мм$^{-1}$	18,53	18,57	6,5
II диапазон (0,18–2,4), мм$^{-1}$	4,345	4,341	7,9

Из табл. 6 можно видеть, что максимальная относительная погрешность определения величины СКО неоднородностей искажений волновых фронтов при контроле оптических деталей со световой апертурой 100 мм составила величину не более 8 %.

С использованием табл. 5 и 6 можно оценить как численное значение СКО пространственных неоднородностей волновых фронтов (21) в результате оптимизации целевой функции $\overline{S1D}(\nu_{\rho\,mn})$, так и определённый тип локального отклонения поверхности от заданного профиля с соответствующей пространственной частотой $\nu_{\rho\,mn}$ в пределах заданной области (апертуры) исследования оптической детали по виду характерного пика на расчётной кривой $\overline{S1D}(\nu_{\rho\,mn})$ (см. рис. 9).

Приведённые в табл. 6 данные были получены при помощи измерительного стенда контроля плоских оптических элементов диаметром 100 мм, фотография которого представлена на рис. 10.

Рис. 10. Фотография лабораторного измерительного стенда на базе динамического интерферометра «IntelliumH2000» для апробации разработанного алгоритма определения СКО искажений волновых фронтов при контроле локальных отклонений профиля плоской эталонной поверхности диаметром 100 мм.

Заключение

В результате проведённых научных исследований, посвящённых разработке современных методов и схемотехнических решений по созданию измерительных интерференционных стендов можно сделать следующие выводы:

– предложенная система интерферометрического контроля оптических поверхностей на стадиях шлифования, позволяет контролировать с высокой точностью не только форму оптической поверхности, но и определять значения СКО высот микронеровностей от базовой плоскости (см. табл. 2) с абсолютной погрешностью, не превышающей 5 % относительно профилометрических данных;

– разработанный неравноплечий интерферометр Тваймана–Грина позволяет оценить микрошероховатость как малогабаритных, так и крупногабаритных вогнутых (сферических и асферических) оптических поверхностей, что невозможно реализовать контактными методами, в частности профилометрами - профилографами;

– полученная аналитическая связь контраста видеоизображений регистрируемых интерференционных картин на стадиях шлифования с характерным отношением σ/λ даёт возможность автоматизировать технологически процесс формообразования оптических деталей, делая его более экономически выгодным и эффективным;

– предложен критерий проведения светоэнергетического расчёта ИК-интерферометра на основе методики контроля параметров микрошероховатостей шлифованных оптических поверх-

ностей, позволяющий определять минимальную мощность лазерного источника излучения с целью получения качественного видео-изображения интерферограмм для их последующей обработки;

– разработанный метод динамической интерферометрии контроля неоднородностей искажений волновых фронтов для плоских оптических элементов, позволил в лабораторных и производственных условиях с высокой точностью определять наличие и размер неоднородностей в частотных диапазонах I, II (см. табл. 4), для которых максимальная относительная погрешность определения величины СКО составила величину не более 8 %.

– достигнутая при оптимизации целевой функции величина максимальной неисключённой систематической погрешности разработанного алгоритма составила величину порядка 2 %, что вполне удовлетворяет указанным в табл. 4 точностным требованиям.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам научно-производственного комплекса «Астрономическая и космическая оптика» АО «Лыткаринский завод оптического стекла» за помощь в проведении экспериментов и компетентных консультациях.

Отдельные разделы работы выполнены в рамках финансирования осуществляемого согласно назначению стипендии Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2013–2015 годы. Приказ № 136 Министерства Образования и Науки Российской Федерации от 28 февраля 2013 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдулкадыров М. А., Добриков Н. С., Патрикеев А. П., Патрикеев В. Е., Семенов А. П.* // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 12. С. 6.

2. *Абдулкадыров М. А., Семенов А.* // Фотоника. 2015. № 3. С. 62.

3. *Денисов Д. Г.* Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. Москва, 2010.

4. *Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Сахаров А. А.*. В сборнике: Лазеры в науке, технике, медицине. XXV Международная конференция. Сборник научных трудов. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. С. 64–69.

5. *Барышников Н. В., Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Кудряшов А. В., Никитин А. Н., Сахаров А. А.* В сборнике: Лазеры в науке, технике, медицине. 2015. С. 86–90.

6. *Барышников Н. В., Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Сахаров А. А.* В сборнике: V Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. 2016. С. 416–417.

7. *Басс Ф. Г., Фукс И. И.* Рассеяние волн на статистической неровной поверхности. – М.: Наука, 1972.

8. *Рытов С. М.* Введение в статистическую радиофизику. – М.: Наука, Часть II, Случайные поля. 1966.

9. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978.

10. *Филачев А. М., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Шабаров В. В.* // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 3. С. 272.

11. *Campbell J. H., Borden M. R.* // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5341. DOI: 10.1117/12.538462.

12. *Denisov D. G., Baryshnikov N. V., Gladysheva Ya. V., Karasik V. E., Morozov A. B., Patrikeev V. E.* // Measurement Techniques. 2017. Vol. 60. Issue 2. P. 121.

13. *Erkin Sidick* // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7390. DOI: 10.1117/12.823844.

14. *Simon G., Alcocka, Geoff D. Ludbrooka, Tommy Owenb, Richard Dockreec* // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7801. P. 102. DOI: 10.1117/12.861539.

15. ISO 10110–1996. Optics drawing standarts for the national ignition facility.

16. *Osuk Kwon, Wyant J. C., Hayslett C. R.* // Applied Optics. Vol. 19. No. 11. 1980.

17. *Jaydeep K. Sinha, Hareesh V. Tippur*. // Opt. Eng. 1997. Vol. 36. No. 8. P. 2233

18. *Барышников Н. В., Денисов Д. Г., Карасик В. Е., Морозов А. Б., Патрикеев В. Е.* В сборнике: Лазеры в науке, технике, медицине / Сборник научных трудов. 2016. С. 209–217.

PACS: 07.60.Ly

Measuring the parameters of roughness of ground and polished optical surfaces using high-precision methods of laser interferometry

D. G. Denisov

Bauman Moscow Technical University
5 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia
E-mail: denisov_dg@mail.ru

Received July 18, 2017

Methods and equipment for controlling roughness parameters of optical surface profiles with different levels of the root-mean-square (RMS) – σ at different stages of technological processing are considered. A method of laser infrared (IR) interferometry was developed and scientifically justified, based on the Kirchhoff method approximation for the scattering of a plane electromagnetic wave λ by a phase screen when the condition is met $\sigma >> \lambda$. An analytical relationship is obtained that relates the contrast value of the video image of an interference pattern recorded by a developed unequal Thiemann-Green interferometer with a working wavelength of 10.6 μm with an RMS value. The method of dynamic interferometry of control of local deviations of the nanometer level of the surfaces of optical parts is realized and experimentally confirmed, in the case when $\sigma >> \lambda$ under conditions of production vibrations from a given profile on the basis of the algorithm for calculating the objective function – the one-dimension power spectral density (PSD1D). Theoretical and experimental studies devoted to the determination of RMS of local deviations of the surfaces of optical parts with a diameter of up to 100 mm are presented, taking into account the non-excluded systematic and random components of the error in determining the objective function.

Keywords: non-equable Twiman-Green interferometer, ground optical surface, Kirchhoff method, root mean square deviation of microroughness heights, contrast of the interference pattern, dynamic interferometry, spectral density of the correlation function.

REFERENCES

1. M. A. Abdulkadyrov, N. S. Dobrikov, A. P. Patrikeev, V. E. Patrikeev, and A. P. Semenov, Optical Journal, **81** (12), 6 (2014).

2. M. A. Abdulkadyrov and A. Semenov, Photonics. No. 3, 62 (2015).

3. D. G. Denisov, Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Moscow State Technical University. N. E. Bauman. Moscow, 2010.

4. D. G. Denisov, V. E. Karasik, and A. A. Sakharov, in *Proc. Conf. Lasers in science, technology, medicine. XXV International conference* (MSTU N.E. Bauman) 2014. P. 64-69.

5. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, V. E. Karasik, A. V. Kudryashov, A. N. Nikitin, and A. A. Sakharov, in *Proc. Conf. Lasers in science, engineering, medicine.* (2015). P. 86–90.

6. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, V. E. Karasik, and A. A. Sakharov, in Proc.: V International Conference on Photonics and Information Optics (2016). P. 416-417.

7. F. G. Bass and I. I. Fuchs, *Scattering of waves on a statistical uneven surface* (Moscow, Nauka, 1972) [in Russian].

8. S. M. Rytov, *Introduction to statistical radiophysics.* (Moscow, Nauka, 1966) [in Russian].

9. J. Lloyd, *Thermal imaging systems* (Moscow, Mir, 1978) [in Russian].

10. A. M. Filachev, A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and V. V. Shabarov, Usp. Prikl. Fiz. **4** (3), 272 (2016).

11. J. H. Campbell and M. R. Borden, Proc. of SPIE. **5341** (2004). DOI: 10.1117/12.538462.

12. D. G. Denisov, N. V. Baryshnikov, Ya. V. Gladysheva, V. E. Karasik, A. B. Morozov, and V. E. Patrikeev, Measurement Techniques. **60** (2), 121 (2017).

13. Sidick Erkin, Proc. of SPIE. **7390**, (2009). DOI: 10.1117/12.823844.

14. G. Simon, Alcocka, Geoff D. Ludbrooka, Tommy Owenb, and Richard Dockreec, Proc. of SPIE. **7801,** 102 (2010). DOI: 10.1117/12.861539.

15. *ISO 10110–1996. Optics drawing standarts for the national ignition facility.*

16. Osuk Kwon, J. C. Wyant, and C. R. Hayslett, APPLIED OPTICS **19** (11), (1980).

17. Jaydeep K. Sinha, and Hareesh V. Tippur, Opt. Eng. **36** (8) 2233 (1997).

18. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, V. E. Karasik, A. B. Morozov, and V. E. Patrikeev, in Proc. Conf: Lasers in science, technology, medicine (2016). P. 209-217.