

АНАЛИЗ ИНТЕРФЕРОМЕТРА С МИКРОЗЕРКАЛОМ НА СВЕТОДЕЛИТЕЛЬНОМ КУБИКЕ

Л.Н. Тимашова

timashova@bmstu.ru

Н.Н. Кулакова

nnkulakova@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Контроль формы поверхности оптической детали интерференционным способом стал неотъемлемой частью процесса их формообразования. Интерферометрия позволяет при точно сфокусированном интерферометре получить интерференционную картину, подобную топографической карте профиля ошибок исследуемой волновой поверхности. Интерферометр должен формировать карту оптической поверхности с высокой точностью — допустимое искажение интерференционной полосы, вызванное ошибкой интерферометра, не должно превышать 0,1 величины искажения, вызванного погрешностью на контролируемой поверхности. Выполнен теоретический анализ зависимости процесса формирования интерференционной картины от погрешностей установки компонентов интерферометра, т. е. дефокусировки, с использованием преобразований Фурье. Анализ проведен для интерферометра, содержащего лазерный осветитель, вогнутое сферическое зеркало с центральным отверстием, соосным осветителю, светоделительный элемент в виде куб-призмы с полупрозрачной гипотенузной гранью. На первой плоской грани куб-призмы выполнено микросферическое вогнутое зеркало, центр которого располагается на оптической оси интерферометра. Приведена методика расчета дефокусировки контролируемого сферического зеркала и соответствующей ей волновой aberrации рабочего волнового фронта. Приведен пример расчета конструктивных параметров интерферометра и допустимой дефокусировки контролируемого сферического зеркала

Ключевые слова

Интерферометр, интерференционная картина, интерференционная полоса, куб-призма, сферическое зеркало, матричный приемник излучения, волновой фронт, дефокусировка, лазер

Поступила 29.09.2020

Принята 23.12.2020

© Автор(ы), 2021

Введение. Интерферометр — это один из самых точных измерительных приборов, использующих принцип интерференции световых волн [1–10]. При изготовлении современных оптических систем требуется контроли-

ровать форму поверхностей (пластин, зеркал и линз) с точностью до единиц нанометра. При этом площадь контролируемой поверхности может составлять несколько десятков квадратных метров. Интерферометрия позволяет при точно сфокусированном интерферометре получить интерференционную картину, подобную топографической карте профиля ошибок исследуемого волнового фронта, отраженного от контролируемой оптической поверхности. Эти ошибки вызваны погрешностями изготовления поверхности. При поперечной расфокусировке интерферометра возникает система полос, форма каждой полосы соответствует профилю ошибок волнового фронта в данном сечении зрачка. Идеальный интерферометр должен быть устойчив к вибрациям, перепадам температур, быть прост в использовании и должен формировать карту оптической поверхности с высокой точностью. Допустимое искажение интерференционной полосы, вызванное ошибкой интерферометра, не должно превышать 0,1 величины искажения, вызванного погрешностью на контролируемой поверхности. Поэтому актуальной задачей является теоретический анализ влияния погрешностей установки компонентов интерферометра на процесс формирования интерференционной картины с использованием преобразований Фурье [11–14].

Среди огромного многообразия новых схем интерферометров для оптического контроля особый интерес представляет интерферометр с микрозеркалом на светоделительном кубике (рис. 1).

Интерферометр содержит последовательно установленные лазерный источник излучения 1, микросферическое зеркало 2, вогнутое сферическое зеркало 3 (осветительное зеркало) с центральным отверстием, светоделительную куб-призму 4 с полупрозрачной гипотенузной гранью. Осветительное зеркало 3 обращено вогнутой отражающей поверхностью к первой плоской грани куб-призмы 4, на которой выполнено микросферическое зеркало 2, причем центр его располагается на оптической оси интерферометра. Со стороны второй грани куб-призмы 4 в эталонной ветви интерферометр содержит эталонное сферическое зеркало 5. Третьей гранью интерферометр направлен в сторону объекта исследования 7 (измерительная ветвь). Со стороны четвертой грани в регистрирующей ветви интерферометр содержит матричный приемник излучения (МПИ) 6.

Схема интерферометра приведена для случая контроля сферического зеркала. Применение микросферического зеркала позволяет существенно уменьшить габаритные размеры прибора, так как исключает необходимость применения афокальной системы для расширения пучка и многолинзового фокусирующего объектива сложной конструкции, аберрации

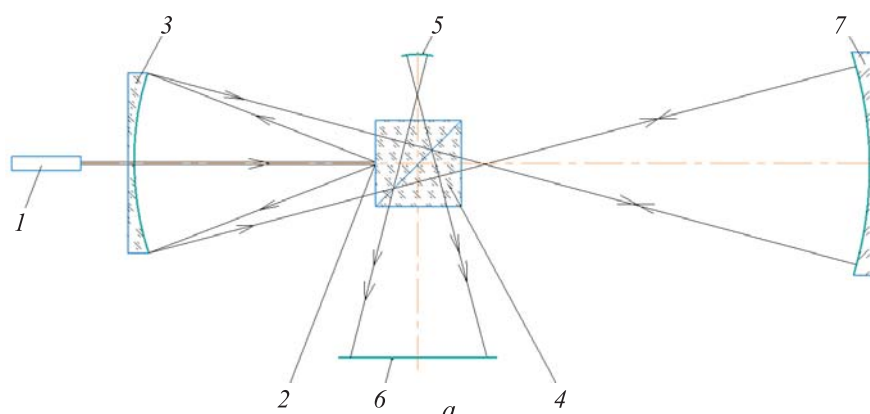
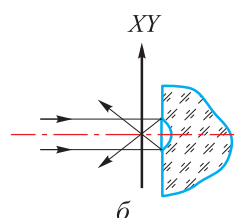


Рис. 1. Интерферометр с микросзеркалом на светоделительном кубике:
a — ход лучей; *б* — кубик с микросзеркалом



которого должны быть исключены или учтены с учетом aberrаций куб-призмы. Такое решение позволяет существенно увеличить апертуру выходных пучков и полностью исключить сферическую и коматическую aberrацию.

Интерферометр работает следующим образом. Монохроматический световой пучок, выходящий из He-Ne-лазера 1, пройдя отверстие в зеркале 3, падает на микросферическое зеркало 2, и после отражения от него образуется расходящийся пучок лучей, который направляется на осветительное зеркало 3. После отражения от зеркала 3 световой пучок падает на куб-призму 4, которая делит его на два пучка. Один освещает эталонное зеркало 5, а второй — контролируемое сферическое зеркало 7. Причем лазерное излучение фокусируется в центрах кривизны эталонного и контролируемого зеркал, образуя выходящий пучок лучей, который практически не имеет сферической aberrации (при относительном отверстии 1 : 1,6 и $\lambda = 0,6328$ мкм остаточная волновая aberrация не превышает значения $W = \lambda/10$).

Исследование волнового фронта, идущего от контролируемой поверхности, заключается в определении его деформации, т. е. отступлении от сферы — теоретическая форма волнового фронта. Однако причинами деформации волнового фронта являются не только погрешности изготовления контролируемой поверхности, но и погрешности совмещения центров кривизны эталонного и контролируемого зеркал с центрами фокуси-

ровки лазерного излучения в эталонной и измерительной ветвях. Эта погрешность интерферометра называется расфокусировкой. Практически невозможно отделить погрешности изготовления поверхности от погрешностей установки. Поэтому для практического применения интерферометра необходимо знать допустимое значение расфокусировки, чтобы получить достоверное заключение о качестве контролируемой поверхности.

Целью настоящей работы является теоретический анализ зависимости процесса формирования интерференционной картины от погрешностей установки компонентов интерферометра, т. е. дефокусировки.

Теоретический анализ. Форма зрачка микрозеркала — прямоугольная, определяется прямоугольной формой МПИ. Распределение амплитуды в плоскости прямоугольного зрачка микролинзы $2\xi_{\text{МЗ}} 2\eta_{\text{МЗ}}$:

$$A_{\text{МЗ}}(\xi, \eta) = A_{\text{Л}}(\xi, \eta) P_{\text{МЗ}}(\xi, \eta) = A_{\text{Л}}(\xi, \eta) \text{rec}\left(\frac{\xi}{2\xi_{\text{МЗ}}}, \frac{\eta}{2\eta_{\text{МЗ}}}\right) \exp[jk\Delta l_{\text{МЗ}}(\xi, \eta)], \quad (1)$$

где $A_{\text{Л}}(\xi, \eta)$ — амплитуда лазерного пучка лучей; $P_{\text{МЗ}}(\xi, \eta)$ — абберационная функция зрачка микрозеркала; $\Delta l_{\text{МЗ}}(\xi, \eta)$ — волновая абберация микрозеркала; $k = 2\pi/\lambda$ (рис. 2).

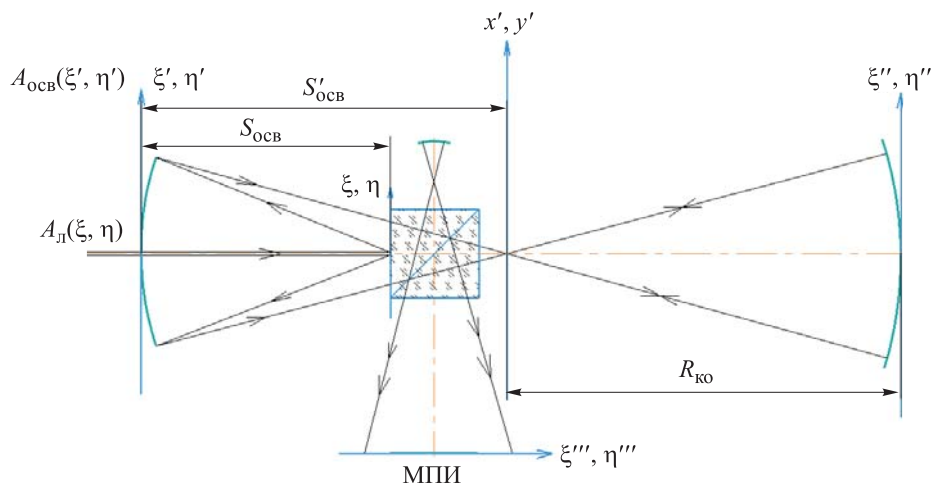


Рис. 2. Схема формирования интерференционной картины

Осветительное зеркало расположено на расстоянии $S_{\text{осв}}$ от задней фокальной плоскости микрозеркала. Распределение амплитуды в плоскости зрачка осветительного зеркала ξ', η' сопряжено с плоскостью зрачка микрозеркала ξ, η с коэффициентом увеличения $\beta_{\text{осв}}$:

$$A_{\text{осв}}(\xi', \eta') = \frac{A_{\text{л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{осв}}} \text{rect}\left(\frac{\xi'}{2\xi'_{\text{осв}}}, \frac{\eta'}{2\eta'_{\text{осв}}}\right) P_{\text{осв}+\text{мз}}(\xi', \eta') =$$

$$= \frac{A_{\text{л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{осв}}} \text{rect}\left(\frac{\xi'}{2\xi'_{\text{осв}}}, \frac{\eta'}{2\eta'_{\text{осв}}}\right) \exp\{jk[\Delta l_{\text{осв}}(\xi', \eta') + \Delta l_{\text{мз}}(\xi', \eta')]\}, \quad (2)$$

где коэффициент $\beta_{\text{осв}} = \frac{S_{\text{осв}}}{f'_{\text{мз}}}$; $2\eta'_{\text{осв}} = 2\eta'_{\text{мз}} \beta_{\text{осв}}$; $2\xi'_{\text{осв}} = 2\xi'_{\text{мз}} \beta_{\text{осв}}$;

$P_{\text{осв}+\text{мз}}(\xi', \eta')$ — абберационная функция зрачка системы из осветительного зеркала и микрозеркала; $\Delta l_{\text{осв}}(\xi', \eta')$ — волновая абберация осветительного зеркала. Поскольку фокусное расстояние осветительного зеркала намного больше фокусного расстояния микрозеркала $f'_{\text{осв}} \gg f'_{\text{мз}}$, то абберационная функция зрачка определяется только абберациями осветительного зеркала, волновая абберация микрозеркала вычисляется по формуле [1]:

$$\Delta l_{\text{мз}}(\xi', \eta') = \frac{f'_{\text{мз}} \sigma''}{32} \approx 0.$$

Поэтому

$$A_{\text{осв}}(\xi', \eta') = \frac{A_{\text{л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{осв}}} \text{rect}\left(\frac{\xi'}{2\xi'_{\text{осв}}}, \frac{\eta'}{2\eta'_{\text{осв}}}\right) \exp\{jk[\Delta l_{\text{осв}}(\xi', \eta')]\}. \quad (3)$$

Осветительное зеркало фокусирует лазерное излучение за светоделительным кубиком на расстоянии $S'_{\text{осв}}$ в плоскости x', y' . Конструктивные параметры осветительного зеркала и кубика, а также их взаимное расположение обеспечивают взаимную компенсацию аббераций $\Delta l_{\text{осв}}(\xi', \eta') = -\Delta l_{\text{куб}}(\xi', \eta')$ и формирование идеального волнового фронта.

Кубик разделяет сфокусированное осветительным зеркалом излучение на два, освещающие эталонное и контролируемое. Центры кривизны эталонного и контролируемого зеркал должны совпадать с плоскостью изображения осветительного зеркала $S_{\text{эт}} = R_{\text{эт}}$ и $S_{\text{ко}} = R_{\text{ко}}$. При точном выполнении этого условия эталонное и контролируемое зеркала не вносят аббераций в отраженное излучение. Зрачки эталонного и контролируемого зеркал ξ'', η'' сопряжены со зрачком осветительного зеркала. Эталонное зеркало повернуто на угол $\theta_{\text{эт}}$ вокруг оси ξ'' . Соответствующий фазовый сдвиг в плоскости зрачка эталонного зеркала $\varphi_{\text{эт}} = \exp(jk \cdot 2\theta_{\text{эт}} \xi'')$. Плоскости x', y' рабочей и эталонной ветвей пересекают оптические оси в центрах кривизны эталонного и контролируемого зеркал. Излучение,

отраженное эталонным зеркалом, фокусируется на расстоянии $x'_{\text{ЭТ}} = R_{\text{ЭТ}} \cdot 2\theta_{\text{ЭТ}}$, излучение, отраженное от контролируемого зеркала, фокусируется на расстоянии $x'_{\text{КО}} = 0$.

Распределение амплитуды в плоскости зрачка ξ'' , η'' эталонного зеркала после прохождения эталонного волнового фронта через кубик можно записать так:

$$A_{\text{ЭТ}}(\xi'', \eta'') = \frac{A_{\text{Л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{ОСВ}}\beta_{\text{ЭТ}}} \text{rect}\left(\frac{\xi''}{2\xi''_{\text{ЭТ}}}, \frac{\eta''}{2\eta''_{\text{ЭТ}}}\right) \exp(jk \cdot 2\theta_{\text{ЭТ}}\xi'') \times \\ \times \exp[jk\Delta l_{\text{ЭТ}}(\xi'', \eta''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')] \exp[jk\Delta l_{\text{КУБ}}(\xi'', \eta''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')], \quad (4)$$

где $\xi'' = \xi' \beta_{\text{ОСВ}}$; $\eta'' = \eta' \beta_{\text{ОСВ}}$; коэффициент $\beta_{\text{ЭТ}} = R_{\text{ЭТ}} / S'_{\text{ОСВ}}$; $\Delta l_{\text{ЭТ}}(\xi'', \eta''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')$ — волновая aberrация повернутого эталонного зеркала; $\Delta l_{\text{КУБ}}(\xi'', \eta''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')$ — волновая aberrация кубика.

Распределение амплитуды в плоскости зрачка ξ'' , η'' контролируемого зеркала:

$$A_{\text{КО}}(\xi'', \eta'') = \frac{A_{\text{Л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{ОСВ}}\beta_{\text{КО}}} \text{rect}\left(\frac{\xi''}{2\xi''_{\text{КО}}}, \frac{\eta''}{2\eta''_{\text{КО}}}\right) \exp[jk\Delta l_{\text{КУБ}}(\xi'', \eta'')], \quad (5)$$

где коэффициент $\beta_{\text{КО}} = R_{\text{КО}} / S'_{\text{ОСВ}}$. Поскольку угол $\theta_{\text{ЭТ}}$ мал, то $\exp[jk\Delta l_{\text{КУБ}}(\xi'', \eta'')] \cong \exp[jk\Delta l_{\text{КУБ}}(\xi'', \eta''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')]$.

Интерференционная картина формируется в плоскости ξ''' , η''' на расстоянии $S_{\text{И.К}}$ от плоскости фокусировки рабочего и эталонного волновых фронтов x' , y' . Распределение амплитуды в интерференционной картине:

$$A_{\text{И.К}}(\xi''', \eta''') = A_{\text{ЭТ}}(\xi''', \eta''') + A_{\text{КО}}(\xi''', \eta'''). \quad (6)$$

Распределение амплитуды в интерференционной картине от эталонного зеркала:

$$A_{\text{ЭТ}}(\xi''', \eta''') = \frac{A_{\text{Л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{ОСВ}} \beta_{\text{ЭТ}} \beta_{\text{И.К.ЭТ}}} \text{rect}\left(\frac{\xi'''}{2\xi'''_{\text{ЭТ}}}, \frac{\eta'''}{2\eta'''_{\text{ЭТ}}}\right) \exp(jk \cdot 2\theta_{\text{ЭТ}}\xi''') \times \\ \times \exp[jk\Delta l_{\text{ЭТ}}(\xi''', \eta'''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')]; \\ A_{\text{ЭТ}}(\xi''', \eta''') = \frac{A_{\text{Л}}(\xi, \eta) S'_{\text{ОСВ}}}{\beta_{\text{ОСВ}} S_{\text{И.К}}} \text{rect}\left(\frac{\xi'''}{2\xi'''_{\text{ЭТ}}}, \frac{\eta'''}{2\eta'''_{\text{ЭТ}}}\right) \exp(jk \cdot 2\theta_{\text{ЭТ}}\xi''') \times$$

$$\times \exp [jk\Delta l_{\text{ЭТ}}(\xi''', \eta'''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')], \quad (7)$$

где $\Delta l_{\text{ЭТ}}(\xi''', \eta'''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')$ — волновая абберация эталонного зеркала, приведенная к плоскости интерференционной картины ξ''', η''' ;

$$\beta_{\text{ЭТ}} = \frac{R_{\text{ЭТ}}}{S'_{\text{ОСВ}}}; \beta_{\text{И.К.ЭТ}} = \frac{S_{\text{И.К}}}{R_{\text{ЭТ}}}; \beta_{\text{ЭТ}} \beta_{\text{И.К.ЭТ}} = \frac{S_{\text{И.К}}}{S'_{\text{ОСВ}}}.$$

Распределение амплитуды в интерференционной картине от контролируемого зеркала:

$$\begin{aligned} A_{\text{КО}}(\xi''', \eta''') &= \frac{A_{\text{Л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{ОСВ}} \beta_{\text{КО}} \beta_{\text{И.К.КО}}} \text{rec} \left(\frac{\xi'''}{2\xi''_{\text{КО}}}, \frac{\eta'''}{2\eta''_{\text{КО}}} \right) = \\ &= \frac{A_{\text{Л}}(\xi, \eta) S'}{\beta_{\text{ОСВ}} S_{\text{И.К}}} \text{rect} \left(\frac{\xi'''}{2\xi''_{\text{КО}}}, \frac{\eta'''}{2\eta''_{\text{КО}}} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{где } \beta_{\text{КО}} = \frac{R_{\text{КО}}}{S'_{\text{ОСВ}}}; \beta_{\text{И.К.КО}} = \frac{S_{\text{И.К}}}{R_{\text{КО}}}; \beta_{\text{КО}} \beta_{\text{И.К.КО}} = \frac{S_{\text{И.К}}}{S'_{\text{ОСВ}}}.$$

Суммарное распределение амплитуды в интерференционной картине:

$$\begin{aligned} A_{\text{И.К}}(\xi''', \eta''') &= A_{\text{ЭТ}}(\xi''', \eta''') + A_{\text{КО}}(\xi''', \eta''') = \\ &= \frac{A_{\text{Л}}(\xi, \eta) S'_{\text{ОСВ}}}{\beta_{\text{ОСВ}} S_{\text{И.К}}} \text{rect} \left(\frac{\xi'''}{2\xi''_{\text{КО}} - \Delta\xi''_{\text{ЭТ}}}, \frac{\eta'''}{2\eta''_{\text{КО}}} \right) \times \\ &\times \{1 + \exp(jk \cdot 2\theta_{\text{ЭТ}} \xi''') \exp [jk\Delta l_{\text{ЭТ}}(\xi''', \eta'''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')]\} = \\ &= \frac{A_{\text{Л}}(\xi, \eta) S'_{\text{ОСВ}}}{\beta_{\text{ОСВ}} S_{\text{И.К}}} \text{rect} \left(\frac{\xi'''}{2\xi''_{\text{КО}} - \Delta\xi''_{\text{ЭТ}}}, \frac{\eta'''}{2\eta''_{\text{КО}}} \right) \times \\ &\times \{1 + \exp(j \cdot 2\pi \nu_{\text{И.К}} \xi''') \exp [jk\Delta l_{\text{ЭТ}}(\xi''', \eta'''; x' - x'_{\text{ЭТ}}, y')]\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\nu_{\text{И.К}} = \frac{\omega}{\lambda} = \frac{2\theta_{\text{ЭТ}}}{\lambda}$ — пространственная частота интерференционной картины, ω — угол между волновыми фронтами, отраженными от эталонного и контролируемого зеркал; $\Delta\xi''_{\text{ЭТ}} = (R_{\text{ЭТ}} + S_{\text{И.К}}) \cdot 2\theta_{\text{ЭТ}}$.

Период интерференционной картины $T_{\text{И.К}} = 1/\nu_{\text{И.К}} = \lambda/(2\theta_{\text{ЭТ}})$. Соответствующее распределение освещенности в интерференционной картине:

$$E(\xi''', \eta''') = \frac{E_{\text{Л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{ОСВ}}^2} \left(\frac{S'_{\text{ОСВ}}}{S_{\text{И.К}}} \right)^2 \text{rect} \left(\frac{\xi'''}{2\xi''_{\text{КО}} - \Delta\xi''_{\text{ЭТ}}}, \frac{\eta'''}{2\eta''_{\text{КО}}} \right) \times$$

$$\begin{aligned}
& \times 2 \left\{ 1 + \cos \left[2\pi v_{\text{и.к}} \xi''' + k\Delta l_{\text{эт}}(\xi''', \eta'''; x' - x'_{\text{эт}}, y') \right] \right\} = \\
& = \frac{E_{\text{л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{осв}}^2} \left(\frac{S'_{\text{осв}}}{S_{\text{и.к}}} \right)^2 \text{rect} \left(\frac{\xi'''}{2\xi''_{\text{ко}} - \Delta\xi''_{\text{эт}}}, \frac{\eta'''}{2\eta''_{\text{ко}}} \right) \times \\
& \times 4 \cos^2 \left[\frac{2\pi v_{\text{и.к}} \xi''' + k\Delta l_{\text{эт}}(\xi''', \eta'''; x' - x'_{\text{эт}}, y')}{2} \right]. \quad (10)
\end{aligned}$$

Распределение освещенности в интерференционной картине не зависит от aberrаций микрозеркала, осветительного зеркала и кубика. Aberrации эталонного зеркала, возникающие при его наклоне, искажают период интерференционной картины. Однако эти aberrации носят систематический характер, и их можно исключить при цифровой обработке интерференционной картины.

При идеальной юстировке контролируемого зеркала оно не вносит aberrаций. Однако реально возможна продольная дефокусировка $\Delta f'_{\text{ко}}$, приводящая к волновой aberrации [1–3, 15]: $\Delta l_{\text{де}}(\xi''', \eta''') = \frac{\Delta f'_{\text{ко}} (\text{tg } \sigma_{\text{ко}})^2}{2}$. Волновая aberrация дефокусировки квадратично зависит от координаты интерференционной картины ξ''' : $\Delta l_{\text{де}}(\xi''') = C_{\text{де}} \xi'''^2$.

Освещенность интерференционной картины при наличии продольной дефокусировки контролируемого зеркала:

$$\begin{aligned}
E_{\text{и.к}}(\xi''', \eta''') &= \frac{E_{\text{л}}(\xi, \eta)}{\beta_{\text{осв}}^2} \left(\frac{S'_{\text{осв}}}{S_{\text{и.к}}} \right)^2 \text{rect} \left(\frac{\xi'''}{2\xi''_{\text{ко}} - \Delta\xi''_{\text{эт}}}, \frac{\eta'''}{2\eta''_{\text{ко}}} \right) \times \\
& \times 4 \cos^2 \left[\frac{2\pi v_{\text{и.к}} \xi''' + k\Delta l_{\text{де}}(\xi''', \eta''')}{2} \right]. \quad (11)
\end{aligned}$$

Проанализируем гармоническую составляющую распределения освещенности при дефокусировке в формуле (11):

$$\begin{aligned}
\cos \left[\frac{2\pi v_{\text{и.к}} \xi''' + k\Delta l_{\text{де}}(\xi''', \eta''')}{2} \right] &= \cos \left[\frac{2\pi \left(v_{\text{и.к}} \xi''' + \frac{C_{\text{де}} \xi'''^2}{\lambda} \right)}{2} \right] = \\
& = \cos \left[\frac{2\pi \left(v_{\text{и.к}} \xi''' + \frac{C_{\text{де}} \xi'''^2}{\lambda} \right) \xi'''}{2} \right] = \cos \left[\frac{2\pi (v_{\text{и.к}} + \Delta v_{\text{де}}) \xi'''}{2} \right], \quad (12)
\end{aligned}$$

где $\Delta v_{де} = \frac{C_{де}\xi'''}{\lambda}$ — искажение пространственной частоты интерференционной картины, линейно зависящее от координаты ξ''' .

Искажение периода интерференционной картины:

$$\Delta T_{де} = \frac{\Delta v_{де}}{v_{и.к}^2} = \frac{(C_{де}\xi''')/\lambda}{v_{и.к}^2} = \frac{(C_{де}\xi''')/\lambda}{((2\theta_{эт})/\lambda)^2} = \frac{\lambda C_{де}\xi'''}{4\theta_{эт}^2}. \quad (13)$$

Примем $\Delta T_{де} = qT_{и.к}$ при $q \ll 1$, где q — искривление формы интерференционной полосы, оцененное в долях ширины интерференционной полосы (периода интерференционной картины), что является ошибкой интерферометра.

Из формулы (13) получим:

$$\Delta T_{де} = \frac{\lambda C_{де}\xi'''}{4\theta_{эт}^2} = qT_{и.к}; \quad C_{де} = \frac{qT_{и.к} \cdot 4\theta_{эт}^2}{\lambda \xi'''}$$

Волновая aberrация дефокусировки контролируемого зеркала, выраженная через заданное допустимое искажение периода интерференционной картины q :

$$\Delta l_{де} = C_{де}\xi'''^2 = \frac{qT_{и.к} \cdot 4\theta_{эт}^2 \xi'''^2}{\lambda \xi'''} = \frac{qT_{и.к} \cdot 4\theta_{эт}^2 \xi'''}{\lambda}. \quad (14)$$

Соответствующая допустимая продольная дефокусировка контролируемого зеркала с учетом формулы (14) имеет вид

$$\Delta f'_{ко} = \frac{2\Delta l_{де}}{(\text{tg } \sigma_{ко})^2} = \frac{qT_{и.к} \cdot 8\theta_{эт}^2 \xi'''}{\lambda (\text{tg } \sigma_{ко})^2}. \quad (15)$$

Эта формула позволяет вычислить допустимую продольную дефокусировку контролируемого зеркала в интерферометре. Для этого необходимо знать угол поворота эталонного зеркала, координату края интерференционной картины (размер МПИ), апертурный угол контролируемой поверхности и допустимое искривление формы интерференционной полосы q .

Методика расчета интерферометра. Перечислим исходные параметры.

1. Апертурный угол контролируемого и эталонного зеркал $\sigma_{ко}$ и $\sigma_{эт}$.
2. Расстояние от осветительного зеркала до плоскости фокусировки лазерного излучения $S_{осв}$.
3. Диаметр микрозеркала $D_{мз}$.
4. Размер МПИ a_m .

5. Размер элемента МПИ $a_{\text{Э}}$.
6. Размер $d_{\text{куб}}$ и показатель преломления $n_{\text{куб}}$ кубика.
7. Искривление формы интерференционной полосы q .

При расчете продольной расфокусировки контролируемого зеркала вычисляются следующие параметры интерферометра.

1. Расстояние от центра кривизны эталонного зеркала до интерференционной картины $S_{\text{и.к}} = \frac{a_{\text{м}}}{2 \text{tg } \sigma_{\text{ко}}}$.
2. Задний апертурный угол осветительного зеркала $\sigma'_{\text{осв}} = \sigma_{\text{ко}}$.
3. Осевое смещение преломленного кубиком луча $L_{\text{куб}} = \frac{n_{\text{куб}} - 1}{n_{\text{куб}}} d_{\text{куб}}$.
4. Расстояние от осветительного зеркала до плоскости фокусировки лазерного излучения за кубиком $S'_{\text{осв}} = S_{\text{осв}} + L_{\text{куб}} + d_{\text{куб}}$.
5. Передний апертурный угол осветительного зеркала $\sigma_{\text{осв}} = \sigma'_{\text{осв}} \frac{S'_{\text{осв}}}{S_{\text{осв}}}$.
6. Фокусное расстояние осветительного зеркала $f'_{\text{осв}} = \frac{S_{\text{осв}} S'_{\text{осв}}}{S'_{\text{осв}} + S_{\text{осв}}}$.
7. Радиус кривизны осветительного зеркала $R_{\text{осв}} = 2f'_{\text{осв}}$.
8. Апертурный угол микрозеркала $\sigma_{\text{мз}} = \sigma_{\text{осв}}$.
9. Фокусное расстояние микрозеркала $f'_{\text{мз}} = \frac{D_{\text{мз}}}{2\sigma_{\text{осв}}}$.
10. Радиус кривизны микрозеркала $R_{\text{мз}} = 2f'_{\text{мз}}$.
11. Пространственная частота интерференционной картины $\nu_{\text{и.к}} = 2(\theta_{\text{ЭТ}} / \lambda)$.
12. Период интерференционной картины $T_{\text{и.к}} = 1 / \nu_{\text{и.к}}$.
13. Число периодов интерференционной картины на размере МПИ $N_{\text{п}} = a_{\text{м}} / T_{\text{и.к}}$.
14. Число элементов МПИ на периоде $N_{\text{э}} = T_{\text{и.к}} / a_{\text{Э}}$.
15. Допустимое искажение периода $\Delta T_{\text{де}} = qT_{\text{и.к}}$.
16. Волновая aberrация дефокусировки контролируемого зеркала $\Delta l_{\text{де}} = \frac{qT_{\text{и.к}} \cdot 80_{\text{ЭТ}}^2 \xi''}{\lambda}$.
17. Допустимая продольная дефокусировка контролируемого зеркала $\Delta f'_{\text{ко}} = \frac{2\Delta l_{\text{де}}}{(\text{tg } \sigma_{\text{ко}})^2}$.

Расчет интерферометра показал, что при контроле сферического зеркала с апертурным углом $\sigma_{\text{ко}} = 15^\circ$ погрешность установки контролируемого зеркала не должна превышать $\Delta f'_{\text{ко}} = 0,02$ мм при следующих параметрах интерферометра: длина волны лазерного излучения $\lambda = 0,6328$ мкм; диаметр микрозеркала $D_{\text{мз}} = 1$ мм; фокусное расстояние микрозеркала $f'_{\text{мз}} \approx 2$ мм; апертурный угол контролируемого и эталонного зеркал $\sigma_{\text{ко}} = \sigma_{\text{эт}} = 15^\circ$; размер МПИ $a_{\text{м}} = 25$ мм; размер элемента МПИ $a_{\text{э}} = 5$ мкм; размеры кубика $d_{\text{куб}} = 20$ мм; угол наклона эталонного зеркала $\theta_{\text{эт}} = 0,5^\circ$; допустимое искажение периода интерференционной картины $q = 0,01$.

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы.

Расчитанный интерферометр обеспечивает высокоточный контроль вогнутого сферического зеркала, так как приборная ошибка не превышает 0,01 интерференционной полосы.

Интерферометр позволяет обнаружить ошибки контролируемой поверхности порядка 0,1 ширины интерференционной полосы, что соответствует $0,05\lambda$.

Конструкция узла крепления контролируемого зеркала должна обеспечивать его перемещение с шагом 0,01 мм.

Приведенная методика может быть использована при проектировании интерферометра с микрозеркалом на светоделительном кубике с различными конструктивными параметрами.

Заключение. На основании проведенного исследования с использованием преобразований Фурье решена задача получения зависимости процесса формирования интерференционной картины от погрешности установки контролируемого сферического зеркала в интерферометре с микрозеркалом на светоделительном кубике. Приведены формулы для вычисления дефокусировки контролируемого сферического зеркала и соответствующей волновой аберрации рабочего волнового фронта. Приведены методика и пример расчета интерферометра, для которого вычислена допустимая дефокусировка контролируемого зеркала $\Delta f'_{\text{ко}} = 0,02$ мм. Эта приборная ошибка практически не влияет на точность измерений. Интерферометр позволяет обнаружить ошибки поверхности до $0,05\lambda$. Полученное значение дефокусировки позволяет сделать вывод об отсутствии трудностей в процессе изготовления конструкции узла крепления контролируемого зеркала в рассмотренном интерферометре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. М., Машиностроение, 2004.
- [2] Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М., Машиностроение, 1978.
- [3] Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М., Машиностроение, 1987.
- [4] Малакара Д. Оптический производственный контроль. М., Машиностроение, 1985.
- [5] Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Ишанин Г.Г. и др. Оптические измерения. М., Логос, 2008.
- [6] Кирилловский В.К. Оптические измерения. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. СПб., ГИТМО (ТУ), 2003.
- [7] Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика. М., Техносфера, 2006.
- [8] Мишин С.В., Кулакова Н.Н., Тирасишин А.В. Адаптация алгоритма поиска координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки для работы с цифровым автоколлиматором. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2016, № 2, с. 117–124.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2016-2-117-124>
- [9] Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н., Сазонов В.Н. Оптико-электронная система для измерения сферической аберрации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2018, № 6, с. 112–122.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-112-122>
- [10] Кулакова Н.Н., Каледин С.Б., Сазонов В.Н. Анализ погрешностей измерения фокусного расстояния ИК-объективов гониометрическим методом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2017, № 4, с. 17–26.
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
- [11] Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем. М., Машиностроение, 1990.
- [12] Якушенков Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов. М., Логос, 1999.
- [13] Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М., Логос, 2011.
- [14] Коротаев В.В. Расчет шумовой погрешности оптико-электронных приборов. СПб., НИУ ИТМО, 2012.
- [15] Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. СПб., Лань, 2008.

Тимашова Лариса Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, корп. 1).

Кулакова Надежда Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, корп. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н. Анализ интерферометра с микрозеркалом на светоделительном кубике. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2021, № 3 (136), с. 129–143. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-3-129-143>

**ANALYSIS OF INTERFEROMETER WITH MICRO-MIRROR
ON BEAM SPLITTING CUBE**

L.N. Timashova

timashova@bmstu.ru

N.N. Kulakova

nnkulakova@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The control of the shape of the optical part surface by the interference method has become an integral part of the process of their shaping. With a precisely focused interferometer interferometry allows obtaining an interference pattern similar to a topographic map of the error profile of the wave surface under investigation. The interferometer must form a map of the optical surface with high accuracy — the permissible distortion of the interference fringe caused by an interferometer error should not exceed 0.1 of the distortion value caused by an error on the examined surface. The dependence of the interference pattern formation on the errors in the arrangement of the interferometer components, i.e., defocusing, was theoretically analyzed using Fourier transforms. The analysis was performed for an interferometer containing a laser illuminator, a concave spherical mirror with a central hole, coaxial to the illuminator, and a beam-splitting element in the form of a cube-prism with a semitransparent hypotenuse face. On the first flat face of the cube-prism, a microspherical concave mirror is made with the center located on the optical axis of the interferometer. A method for calculating the defocusing of a controlled

Keywords

Interferometer, interference pattern, fringe, cube-prism, spherical mirror, matrix radiation detector, wavefront, defocusing, laser

spherical mirror and the corresponding wave aberration of the working wavefront is presented. An example of calculating the design parameters of the interferometer and the permissible defocusing of the controlled spherical mirror is given

Received 29.09.2020

Accepted 23.12.2020

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Krivoviyaz L.M., Puryaev D.T., Znamenskaya M.A. *Praktika opticheskoy izmeritel'noy laboratorii* [Practice of an optical laboratory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004.
- [2] Kreopalova G.V., Puryaev D.T. *Issledovanie i kontrol' opticheskikh system* [Research and control on optical systems]. Moscow Mashinostroenie Publ., 1978.
- [3] Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow Mashinostroenie Publ., 1987.
- [4] Malacara D. *Optical shop testing*. Wiley, 1978.
- [5] Andreev A.N., Gavrilov E.V., Ishanin G.G., et al. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Logos Publ., 2008.
- [6] Kirillovskiy V.K. *Opticheskie izmereniya. Teoriya chuvstvitel'nosti opticheskikh izmeritel'nykh navodok. Rol' opticheskogo izobrazheniya* [Optical measurements. Responsivity theory of optical measurement adjustment. The role of an optical image]. St. Petersburg, GITMO (TU) Publ., 2003.
- [7] Schröder G., Treiber H. *Technische optik*. Würzburg, Vogel Buchverlag, 2002.
- [8] Mishin S.V., Kulakova N.N., Tirasishin A.V. Adaptation of the algorithm for searching the coordinates of the energy centre in the image of an autocollimating point for working with digital autocollimator. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 2, pp. 117–124 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2016-2-117-124>
- [9] Timashova L.N., Kulakova N.N., Sazonov V.N. Opto-electronic system for measurement of spherical aberration. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 6, pp. 112–122 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2018-6-112-122>
- [10] Kulakova N.N., Kaledin S.B., Sazonov V.N. Error analysis of IR lens focal length measured by a goniometric method. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 4, pp. 17–26 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-4-17-26>
- [11] Mosyagin G.M., Nemtinov V.B., Lebedev E.N. *Teoriya optiko-elektronnykh system* [Theory of optic-electronic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990.
- [12] Yakushenkov Yu.G. *Proektirovanie optiko-elektronnykh priborov* [Design of optic-electronic systems]. Moscow, Logos Publ., 1999.
- [13] Yakushenkov Yu.G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov* [Theory and calculation of optic-electronic systems]. Moscow, Logos Publ., 2011.

[14] Korotaev V.V. Raschet shumovoy pogreshnosti optiko-elektronnykh priborov [Noise error calculation for optic-electronic systems]. St. Petersburg, NIU ITMO Publ., 2012.

[15] Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. Teoriya opticheskikh system [Theory of optical systems]. St. Petersburg, Lan Publ., 2008.

Timashova L.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5/1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kulakova N.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5/1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Timashova L.N., Kulakova N.N. Analysis of interferometer with micro-mirror on beam splitting cube. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2021, no. 3 (136), pp. 129–143 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-3-129-143>