

УДК 681.787

Исследование параметров выпуклых гиперболических поверхностей и точности их контроля на лазерном интерферометре Физо

Бурмак Л.И., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

Научный руководитель: Кулакова Н.Н., к.т.н., доцент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

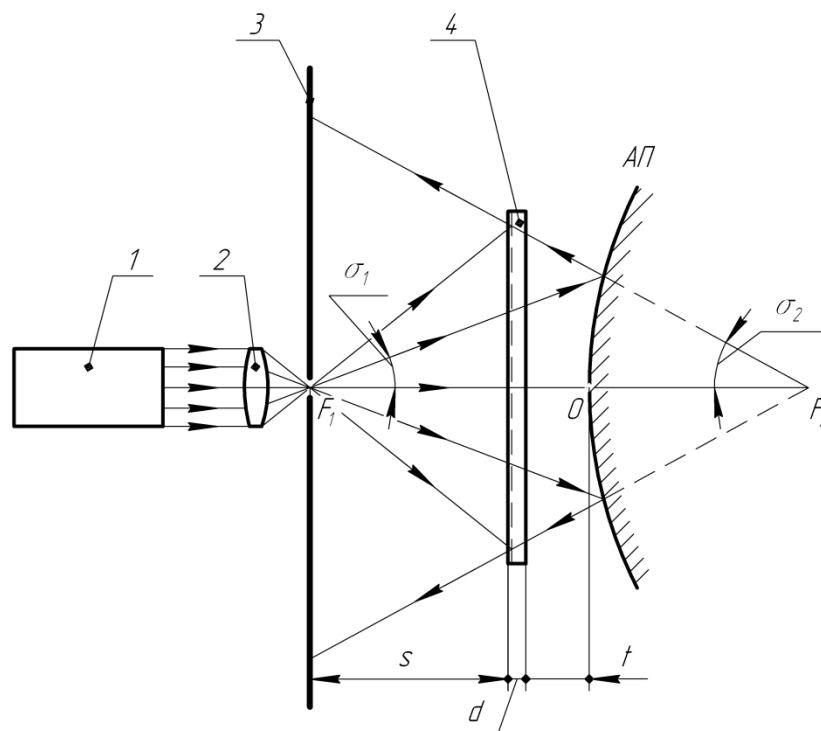
bauman@bmstu.ru

Оптические элементы с выпуклыми гиперболическими поверхностями второго порядка находят широкое применение в медицинских оптических приборах, объективах специального назначения, астрономической оптике и других системах. Качество этих асферических поверхностей (АП) почти всегда определяет качество прибора в целом. Под качеством поверхности понимают соответствие изготовленной поверхности ее теоретической форме. Для высокоточных оптических поверхностей допустимое отклонение действительной формы поверхности от ее теоретического вида исчисляется долями длины волны света. Известны следующие методы контроля таких поверхностей: метод пробных стекол, компенсационный метод, метод анаберрационных точек.

Метод пробных стекол не получил широкого распространения; его недостатками являются контактность и сложность изготовления асферического пробного стекла. В отличие от метода пробных стекол, компенсационный метод весьма распространен. Однако в ряде задач его применение не целесообразно. Это обусловлено индивидуальностью применения компенсатора и тем обстоятельством, что размеры последнего соизмеримы, либо превосходят размеры контролируемой поверхности.

В данной работе рассматривается схема интерферометра для контроля качества отражающих выпуклых гиперболических поверхностей методом анаберрационных точек. Метод использует свойство геометрических фокусов отражающих АП 2-ого порядка, являющихся парой оптически-сопряженных анаберрационных точек. Идея метода заключается в применении расположенной между фокусами гиперболической поверхности плоскопараллельной пластины для создания рабочего и эталонного волновых фронтов. Схема интерферометра впервые была предложена в работе [1]. Однако в этой

работе не было проведено исследование диапазона контролируемых поверхностей в соответствии с заданным требованием к их точности. Целью настоящей работы является оценка возможностей интерферометра, а именно: исследование диапазона радиусов и эксцентриситетов контролируемых поверхностей и соответствующей этим диапазонам точности контроля.



Принципиальная схема интерферометра для контроля выпуклых гиперболических зеркал: 1 – лазер, 2 – микрообъектив, 3 – экран, 4 – полупрозрачная плоскопараллельная пластина

Принципиальная схема интерферометра представлена на рисунке. В основу действия интерферометра положены свойства когерентности и монохроматичности лазерного излучения. Для пояснения принципа работы интерферометра предположим, что плоскопараллельная пластина 4 — бесконечно тонкое полупрозрачное зеркало, установленное перпендикулярно линии, соединяющей геометрические фокусы F_1 и F_2 гиперболического зеркала. Пусть расстояние от геометрических фокусов до пластины 4 одинаковы, а фокус микрообъектива 2 совмещен с точкой F_1 . Числовая апертура микрообъектива 2 выбирается по апертурному углу σ_1 в геометрическом фокусе F_1 . Лучи, отраженные от пластины 4, создают эталонный сферический волновой фронт. Лучи, прошедшие через пластину 4, отражаются от контролируемой АП и вторично проходят через пластину 4, создавая рабочий волновой фронт. Последний будет сферическим, если контролируемая поверхность и пластина 4 имеют идеальную форму. Центры кривизны обоих волновых фронтов — эталонного и рабочего — совмещены, поэтому на экране 3

должно наблюдаться равномерно освещенное интерференционное поле. Небольшие наклоны пластины 4 или смещение ее в продольном направлении приведут к образованию соответственно интерференционных полос или колец, по виду которых можно сделать заключение о качестве контролируемой поверхности.

Найдем расстояния s и t , определяющие положение плоскопараллельной пластины 4 относительно контролируемой АП и фокуса микрообъектива для случая, когда полупрозрачное покрытие нанесено на первой поверхности пластины. В реальной схеме интерферометра пластина 4 не является бесконечно тонкой, поэтому приведем оптическую среду пластины к воздуху, разделив ее толщину d на показатель преломления n материала, из которого она изготовлена. Толщина редуцированной пластины равна $\frac{d}{n}$. Расстояние между геометрическими фокусами F_1 и F_2 гиперболической поверхности и расстояние от выпуклой гиперболической поверхности до фокуса F_1 определяются, соответственно, по формулам [2]:

$$F_1 F_2 = \frac{2r_0 \varepsilon}{\varepsilon^2 - 1}, \quad (1)$$

$$OF_1 = \frac{r_0}{\varepsilon - 1}, \quad (2)$$

где r_0 - радиус кривизны при вершине контролируемой АП (т. O на рисунке); ε — эксцентриситет контролируемой АП.

Расстояния от геометрических фокусов до отражающей грани пластины 4 одинаковы. Тогда, с учетом формулы (1), расстояние s вычисляется по формуле:

$$s = \frac{F_1 F_2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2r_0 \varepsilon}{\varepsilon^2 - 1} = \frac{r_0 \varepsilon}{\varepsilon^2 - 1}. \quad (3)$$

Используя формулы (2), (3) найдем расстояние от пластины до гиперболического зеркала:

$$t = OF_1 - s - \frac{d}{n} = \frac{r_0}{\varepsilon - 1} - \frac{r_0 \varepsilon}{\varepsilon^2 - 1} - \frac{d}{n} = \frac{r_0}{\varepsilon^2 - 1} - \frac{d}{n}. \quad (4)$$

Формулы (3), (4) позволяют определить положение пластины 4 в безабберационной системе.

Для исследования параметров контролируемых гиперболических поверхностей и соответствующей им точности контроля был проведен абберационный расчет рабочей ветви интерферометра с помощью программы автоматизированного расчета оптических систем «Zemax». Область интереса представляют зеркала диаметром от 10 до 60 мм. Для расчета были выбраны следующие исходные данные: длина волны источника излучения

$\lambda=632.8$ нм, толщина плоскопараллельной пластины $d=3$ мм и ее показатель преломления стекла $n=1.5146$ для $\lambda=632.8$ нм. Синус апертурного угла σ_1 в геометрическом фокусе F_1 контролируемой поверхности $\sin \sigma_1 = 0.1$. В качестве коррекционных параметров при оптимизации были заданы толщины воздушных промежутков s и t . При оптимизации выдерживалось равенство расстояний от источника до первой поверхности плоскопараллельной пластины и от первой поверхности плоскопараллельной пластины до плоскости изображения. Результаты абберационного расчета рабочей ветви интерферометра приведены в таблице, где r_0 - радиус кривизны при вершине контролируемой АП; s и t - толщины воздушных промежутков, вычисленные по формулам (3), (4); $s_{\text{опт}}$ и $t_{\text{опт}}$ - толщины воздушных промежутков после оптимизации; l - значение волновой абберации; $\Phi_{\text{АП}}/2$ - половина светового диаметра контролируемой АП; $\Phi_{\text{П}}/2$ - половина светового диаметра плоскопараллельной пластины 4.

Приведенная в таблице волновая абберация рабочей ветви l рассчитана для случая, когда контролируемая поверхность идеальна. Поэтому она представляет собой приборную ошибку интерферометра. Для обнаружения ошибки на контролируемой поверхности необходимо, чтобы величина деформации волнового фронта, вызванная этой ошибкой, превышала собственную ошибку интерферометра. Будем пренебрегать приборной ошибкой, если абберация волнового фронта превосходит ее в $5 \div 10$ раз. Так как контролируемая АП является отражающей, то ошибка ее формы переносится на рабочий волновой фронт в удвоенном масштабе. Следовательно, интерферометр позволяет обнаружить ошибку $\delta_{\text{АП}}$ на контролируемой поверхности, вычисляемую по формуле:

$$\delta_{\text{АП}} = (5 \div 10) \frac{l}{2}, \quad (5)$$

Параметры рабочей ветви			
Параметры после оптимизации			
$\Phi_{\text{АП}}/2$, мм	$\Phi_{\text{П}}/2$, мм		
Эксцентриситет $\varepsilon=1.5$			
13.5	51.5		
19.4	69.0		
23.5	81.3		
27.5	93.8		
29.5	100.1		
33.6	112.7		
Эксцентриситет $\varepsilon=2$			
11.3	23.6		
16.4	33.8		
21.4	44.1		
26.5	54.3		
31.5	64.6		
Эксцентриситет $\varepsilon=3$			
10.7	16.1		
13.3	19.9		
15.8	23.7		
20.8	31.3		
25.9	38.9		
30.9	46.5		
Эксцентриситет $\varepsilon=5$			
8.1	10.0		
13.1	16.3		
20.7	25.8		
25.7	32.1		

Исходные параметры					
r_0 , мм	s , мм	t , мм	$S_{\text{опт}}$, мм	$t_{\text{опт}}$, мм	l , длин волн
50	60.00	38.02	76.41	53.42	1.064
80	96.00	62.02	111.84	76.80	0.522
100	120.00	78.02	135.67	92.61	0.033
120	144.00	94.02	159.55	108.48	0.294
130	156.00	102.02	171.51	116.43	0.842
150	180.00	118.02	195.43	132.35	0.667
100	66.67	31.35	72.92	36.43	0.441
150	100.00	48.02	106.28	53.10	0.174
200	133.33	64.69	139.63	69.76	0.408
250	166.67	81.35	172.97	86.43	0.091
300	200.00	98.02	206.32	103.10	0.286
200	75.00	23.02	78.78	25.32	0.133
250	93.75	29.27	97.55	31.58	0.061
300	112.50	35.52	116.33	37.84	0.084
400	150.00	48.02	153.85	50.35	0.074
500	187.50	60.52	191.38	62.86	0.106
600	225.00	73.02	228.90	75.37	0.107
300	62.50	10.52	66.05	11.92	0.067
500	104.17	18.85	107.85	20.29	0.015
800	166.67	31.35	170.44	32.82	0.054
1000	208.33	39.69	212.14	41.16	0.038

где l - приборная ошибка.

С учетом формулы (5) на основании результатов расчета из таблицы можно сделать следующие выводы:

- 1.) интерферометр не пригоден для контроля большинства поверхностей с малым эксцентриситетом ($\varepsilon < 3$);
- 2.) АП с эксцентриситетом $\varepsilon = 3$ могут быть проконтролированы на данном интерферометре с точностью не хуже 0.5λ , если их радиусы кривизны при вершине находятся в диапазоне $r_0 = 200 \div 600$ мм;

3.) АП с эксцентриситетом $\varepsilon = 5$ могут быть проконтролированы с точностью не хуже 0.17λ , если их радиусы кривизны при вершине находятся в диапазоне $r_0 = 300 \div 1000$ мм.

Как показали исследования, точность контроля возрастает с увеличением значения эксцентриситета.

Список литературы

1. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 261 с.
2. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения : учебник для вузов / под ред. Д.Т. Пуряев. М. : Машиностроение, 1987. 263 с.
3. Максutow Д. Д. Астрономическая оптика. Л.: Наука, 1979. 395 с.
4. Интерференционные методы производственного контроля оптических поверхностей зеркал телескопов. Режим доступа: <http://lzos.ru/content/view/216/> (дата обращения 28.10.2014).
5. Malacara D. Optical Shop Testing. 3rd Edition. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc. 2007. 888 p.