

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ВОГНУТЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ И ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С БОЛЬШОЙ АСФЕРИЧНОСТЬЮ И КРУТИЗНОЙ

© 2011 г. В. П. Иванов, доктор техн. наук; В. А. Балоев, канд. техн. наук;
Н. П. Ларионов, канд. техн. наук; А. В. Лукин, доктор техн. наук

Научно-производственное объединение “Государственный институт прикладной оптики”,
Казань

E-mail: nrogipo@tnpko.ru

Рассмотрены особенности и представлены результаты применения интерферометра для контроля формы вогнутых параболических и эллиптических поверхностей, разработанного на основе использования свойств анаберрационных точек этих поверхностей. В нем осуществляется однократное отражение лучей от контролируемой поверхности, поэтому интерферометр пригоден для тестирования асферических поверхностей, обладающих большими отклонениями от заданной формы на начальной стадии их полировки. Такая ситуация встречается при формообразовании асферических поверхностей с большой асферичностью и крутизной.

Ключевые слова: интерферометр, контроль асферических поверхностей.

Коды OCIS: 220.1140

Поступила в редакцию 11.11.2010

В настоящее время для контроля асферических поверхностей второго порядка наиболее часто применяется компенсационный метод на основе использования линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых компенсаторов [1, 2] и синтезированных голограмм [3], а также метод, основанный на свойствах анаберрационных точек таких поверхностей с применением вспомогательных зеркал (плоского или сферического), в котором точечный источник света расположен в одном из фокусов контролируемой поверхности. При этом лучи света дважды отражаются от нее [1, 2].

Однако эти методы не всегда можно применить для контроля вогнутых параболических и эллиптических поверхностей оптических деталей с большими относительными отверстиями и, особенно, если рабочие поверхности таких деталей обладают большой асферичностью. Это обусловлено трудностями расчета, изготовления и аттестации оптических компенсаторов, в том числе и голограммных. Метод на основе использования свойств анаберрационных точек не обеспечивает высокую точность контроля указанного класса асферических поверхностей из-за наличия у них значительных дефектов, свойственных финишной

стадии шлифовки таких поверхностей. Данный недостаток обусловлен автоколлимационным ходом лучей, которые отражаются от контролируемой поверхности дважды. Вследствие этого происходит суммирование искажений волнового фронта, вносимых погрешностями от различных зон контролируемой поверхности, что затрудняет получение истинного значения отклонения поверхности от заданной формы в каждой из ее зон.

В данной статье рассматриваются особенности практического применения интерферометра для контроля вогнутых параболических (ПП) и эллиптических поверхностей (ЭП) на основе использования свойств анаберрационных точек, предложенного в работе [4]. В рабочей ветви интерферометра осуществляется однократное отражение лучей от контролируемой поверхности, вследствие чего в процессе контроля у поверхности с большими погрешностями отсутствует суммирование ошибок от различных ее зон. Поэтому этот интерферометр может применяться для контроля асферических поверхностей, обладающих большими отклонениями от заданной формы на начальной стадии их полировки. Кроме того, прибор пригоден для контроля указанного класса асфе-

рических поверхностей оптических деталей с большими относительными отверстиями. Его оптическая схема незначительно видоизменяется в зависимости от того, какая из поверхностей – эллиптическая или параболическая, контролируется. Это видно из схем, приведенных на рис. 1 и 2, на которых обозначения позиций одинаковых элементов идентичны. В осветительной ветви этих схем установлены лазер 1 и афокальная система 2, формирующая пучок параллельных лучей с небольшим коэффициентом расширения. Светоделитель 3 пропускает часть этого пучка в эталонную ветвь, в которой последовательно установлены плоское зеркало 4 и объективы 5 и 6. Задний фокус объектива 5 совмещен с передним фокусом объектива 6. Поэтому на выходе последнего формируется пучок параллельных лучей, которому соответствует волна с эталонным плоским фронтом. Объектив 5 обладает возможностью смещения вдоль оптической оси. Пучок лучей, отраженный от светоделителя 3, поступает в рабочую ветвь, в которой последовательно установлены плоское зеркало 7, фокусирующий объектив 8, в заднем фокусе которого установлена диафрагма 9, и деталь 10 с контролируемой поверхностью либо ЭП (рис. 1), либо ПП (рис. 2). При этом задний фокус объектива 8 совмещен либо с фокусом F_1 ЭП, либо с фокусом F_{II} ПП. При контроле ЭП (рис. 1) в рабочую ветвь дополнительно уста-

навливается объектив 12 с диафрагмой 11, расположенной в его переднем фокусе. Объектив 12 служит для формирования на выходе рабочей ветви пучка параллельных лучей. Поэтому его передний фокус совмещен с фокусом F_2 ЭП. Светоделитель 13 служит для совмещения эталонного волнового фронта, соответствующего пучку лучей, вышедшему из объектива 6, с рабочим волновым фронтом, соответствующим пучку лучей, вышедшему из рабочей ветви. Этот светоделитель установлен таким образом, что часть пучка параллельных световых лучей, соответствующая отраженной от него части эталонного волнового фронта, направлена в рабочую ветвь к объективу 12. Плоское зеркало 14 установлено перпендикулярно к падающему на него пучку параллельных лучей, соответствующих прошедшей светоделитель 13 части эталонного волнового фронта. Отраженный от зеркала 14 пучок в автоколлимационном ходе делится светоделителем 13 на две части. Одна из них, прошедшая светоделителем 13, проходит объективы 6 и 5, отражается от зеркала 4, проходит светоделитель 3 и афокальную систему 2 и поступает в выходное окно лазера 1. Другая часть, отраженная от светоделителя 13, поступает в регистрирующую ветвь, в которой установлен входной объектив 15 и фотоприемное устройство 16, состоящее, например, из передающей камеры и монитора. Объектив 15 фокусирует этот пучок лучей в точку A_3 .

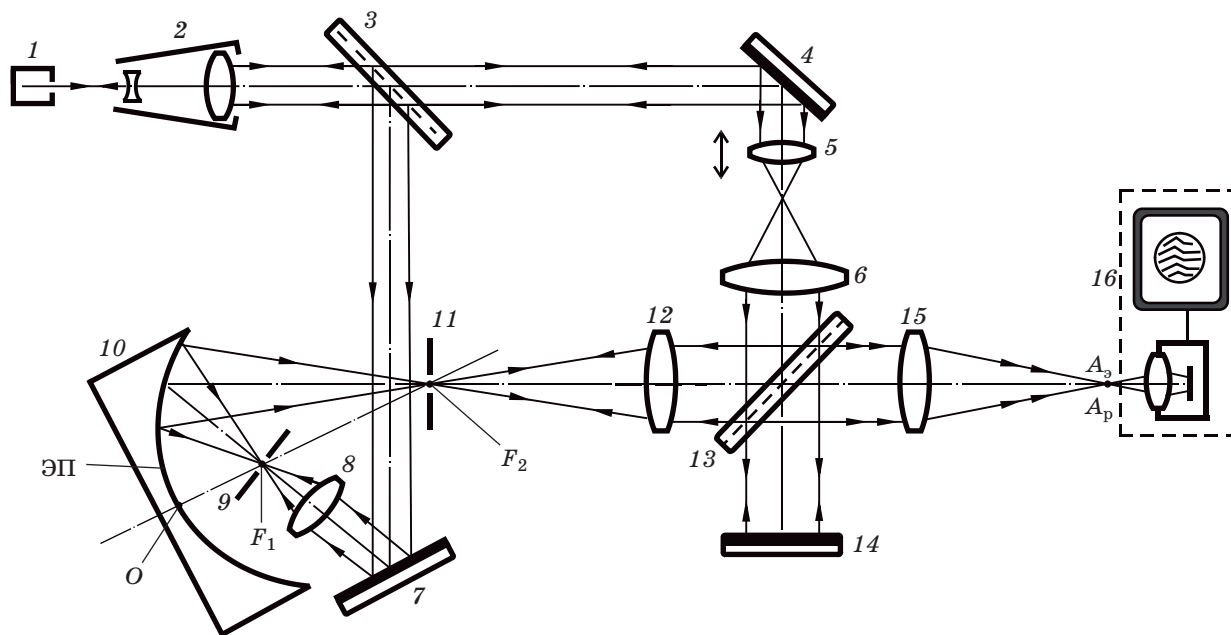


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра для контроля вогнутых эллиптических поверхностей.

При контроле оптических деталей 10 с эллиптическими поверхностями (рис. 1) объектив 12 устанавливается в ходе пучка параллельных световых лучей, распространяющегося от светоделителя 13, а диафрагма 11 устанавливается в его фокусе, при этом их положение в рабочей ветви задается таковым, чтобы центр отверстия диафрагмы 11 был удален от центра отверстия диафрагмы 9 на расстояние, равное расстоянию между фокусами F_1 и F_2 теоретически заданной эллиптической поверхности. Контролируемая деталь 10 с ЭП устанавливается в интерферометр таким образом, чтобы фокус F_1 ЭП, который ближе к ее вершине O , совпадал с отверстием диафрагмы 9, а значит, и с задним фокусом объектива 8, а фокус F_2 – с отверстием в диафрагме 11 и, соответственно, с передним фокусом объектива 12. Пучок лучей, вышедший из фокусирующего объектива 8, после отражения от ЭП проходит диафрагму 11, объектив 12, светоделитель 13 и поступает в регистрирующую ветвь, где объективом 15 фокусируется в точку A_p , и затем поступает в передающую камеру фотоприемного устройства 16. Картина интерференции, образованная в результате суперпозиции волн, соответствующих пучкам лучей, вышедших из эталонной и рабочей ветвей, наблюдается на экране монитора фотоприемного устройства 16 для оценки дефектов ЭП. Юстировка детали 10 с ЭП проводится с использованием двух реперов – диафрагм 9 и 11. В процессе юстировки необходимо путем продольного и поперечных смещений, а также угловых поворотов контролируемой детали 10 сфокусировать отраженный от эллиптической поверхности пучок в плоскости диафрагмы 11 в минимально возможное световое пятно, а затем угловыми поворотами детали 10 направить его в отверстие этой диафрагмы. При проведении этих операций отверстие диафрагмы 11 играет роль репера. Затем провести более точную юстировку детали 10 по интерференционной картине. При правильно выполненной юстировке детали 10 с ЭП пучок параллельных лучей, распространяющийся от светоделителя 13, после прохождения объектива 12 и диафрагмы 11 и отражения от ЭП должен фокусироваться в отверстие диафрагмы 9. Это будет означать, что фокус F_1 ЭП совмещен с центром отверстия диафрагмы 9, а следовательно, и с задним фокусом фокусирующего объектива 8, при этом фокус F_2 ЭП совмещен с фокусом объектива 12 и с центром отверстия диафрагмы 11. Таким образом, центр отверстия

диафрагмы 9 является при юстировке эллиптических поверхностей вторым репером.

При контроле оптических деталей с параболическими поверхностями (рис. 2) пучок лучей, вышедший из фокусирующего объектива 8, после отражения от контролируемой ПП детали 10 направляется на светоделитель 13, проходит его и поступает во входной объектив 15 регистрирующей ветви, фокусируясь им в точку A_p , и затем поступает в передающую камеру фотоприемного устройства 16. По интерференционной картине, наблюдаемой на экране монитора фотоприемного устройства 16, проводят анализ дефектов контролируемой ПП. Для получения достоверных результатов контролируемая деталь должна быть надежно отъюстирована в интерферометре. Для обеспечения этого требования служит диафрагма 9, а также пучок параллельных лучей, распространяющийся от светоделителя 13 к детали 10 и падающий на ее контролируемую ПП. После отражения от параболической поверхности этот пучок становится сходящимся. В процессе юстировки путем продольных и поперечных смещений, а также угловых поворотов детали 10 фокусируют этот сходящийся пучок на диафрагме 9 в минимально возможное световое пятно и затем направляют его угловыми подвижками детали 10 в отверстие диафрагмы 9. Окончательную юстировку ведут по виду интерференционной картины на экране монитора фотоприемного устройства 16. В результате фокус F_{II} ПП будет совмещен с задним фокусом объектива 8.

В данном интерферометре плоскостность эталонного волнового фронта может быть проверена каждый раз перед началом работы, что повышает надежность контроля. Для этого плоское зеркало 14 должно быть сориентировано так, чтобы отраженный от него световой пучок в обратном ходе прошел светоделитель 13, объективы 6 и 5, отразился от зеркала 4, прошел светоделитель 3, афокальную систему 2 и упал на выходное окно лазера 1. Диаметр следа от этого пучка на выходном окне должен быть сравним с сечением пучка, выходящего из лазера 1, что будет означать, что задний фокус объектива 5 совмещен с передним фокусом объектива 6 и эталонный волновой фронт является плоским. Если же при проверке оказалось, что диаметр следа от указанного выше пучка отличается от диаметра сечения светового пучка, выходящего из лазера 1, то необходимо минимизировать их различие путем продоль-

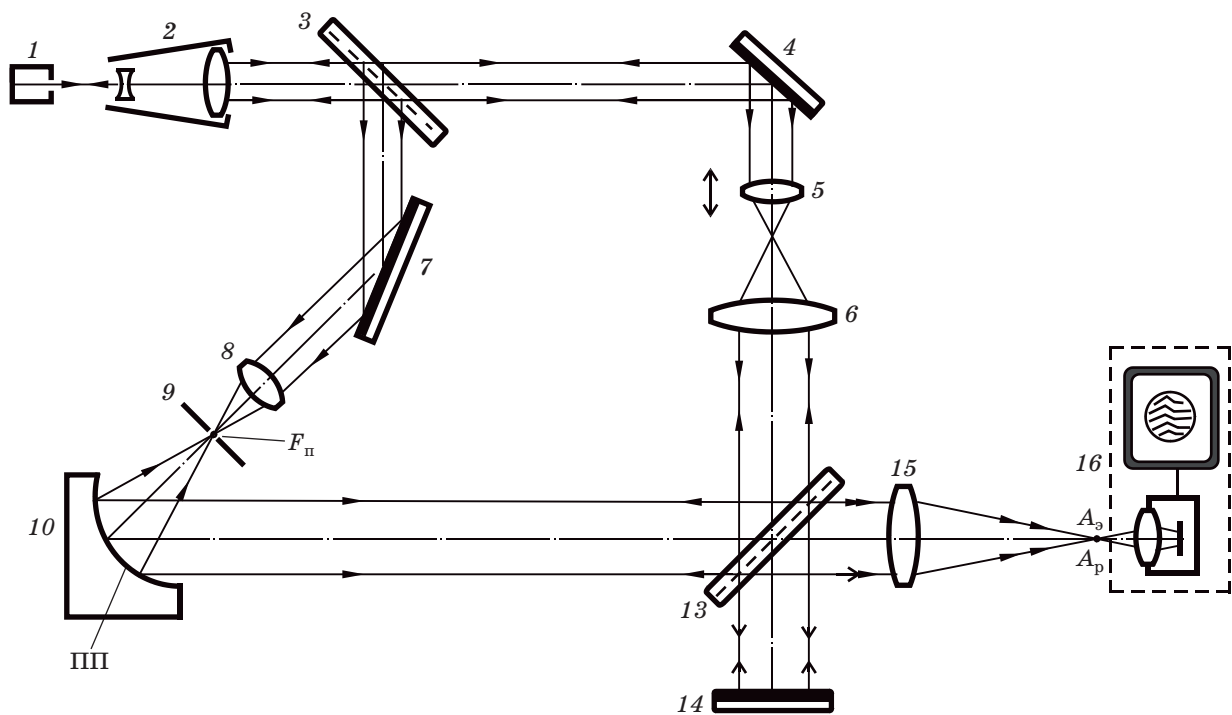


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра для контроля вогнутых параболических поверхностей.

ного перемещения объектива 5 вдоль оптической оси. В результате этого задний фокус объектива 5 будет совмещен с передним фокусом объектива 6 и эталонный волновой фронт станет плоским. После того угловыми поворотами зеркала 14 отраженное им излучение необходимо направить непосредственно в отверстие выходного окна лазера 1. В результате плоское зеркало 14 установится перпендикулярно к падающему на него световому пучку параллельных лучей, а точка фокусировки A_3 пучка, вышедшего из эталонной ветви, займет в регистрирующей ветви определенное фиксированное положение.

При проверке ЭП повышение достоверности результатов контроля обусловлено еще и достаточной точностью задания в пространстве положения их фокусов благодаря введению в интерферометр диафрагмы 11, плоскость которой должна быть совмещена с фокальной плоскостью объектива 12, а центр ее отверстия – с фокусом этого объектива. Выполнение указанных требований осуществляется сначала продольным смещением диафрагмы 11 в заданное положение, что контролируется по виду теневой картины, возникающей при кратковременном касании краем ее отверстия сфокусированного объективом 12 светового пучка,

падающего на этот объектив от светоделителя 13, а затем поперечным смещением диафрагмы 11 до положения, когда сфокусированное пятно займет центр отверстия диафрагмы 11. Последнее можно проконтролировать визуально, например, используя лупу. Таким же образом устанавливается и диафрагма 9 в фокальную плоскость фокусирующего объектива 8. Расстояние между центрами отверстий диафрагм 9 и 11 может быть измерено с необходимой точностью линейными измерителями. Пучок лучей, распространяющийся от светоделителя 13 в рабочую ветвь интерферометра, служит ориентиром для размещения в ней объектива 12 и диафрагмы 11. Это обстоятельство значительно облегчает и ускоряет процесс установки указанных элементов в интерферометр при подготовке его для контроля ЭП.

На основе оптической схемы интерферометра, изображенной на рис. 2, создан контрольно-измерительный стенд, который в настоящее время используется в оптическом производстве Государственного института прикладной оптики (НПО ГИПО) при контроле вогнутых параболических поверхностей деталей с относительными отверстиями $D/f' = 1/0,267$ и $D/f' = 1/0,25$ и асферичностью параболических поверхностей, равной, соответственно, 1,33 мм и 1,98 мм.

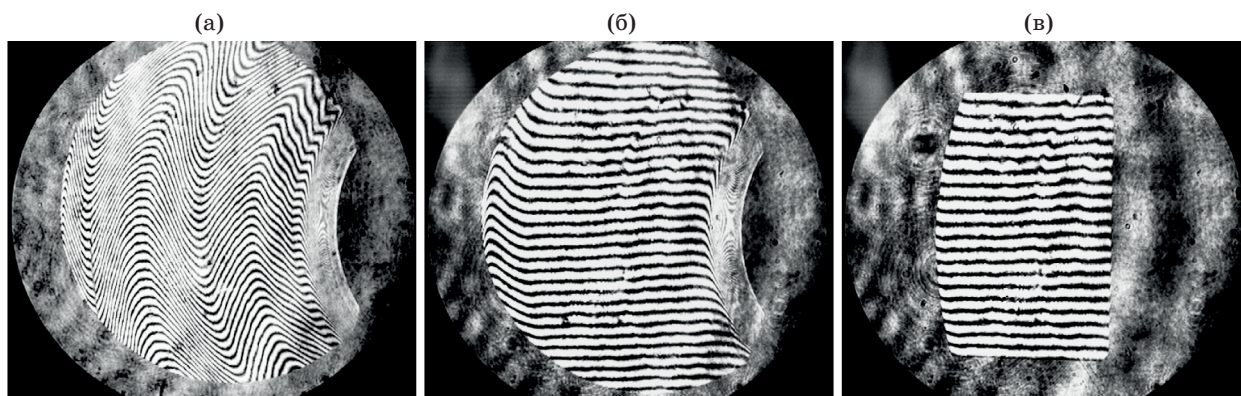


Рис. 3. Интерференционные картины, полученные при контроле вогнутой параболической поверхности на начальной (а) и на финишной (б, в) стадиях полировки.

На рис. 3 представлены интерферограммы параболической поверхности $y^2 = 161,042x$ со световым диаметром 160/80 и крутизной $45,2^\circ$. Интерферограмма на рис. 3а получена на начальной стадии полировки. Видно, что поверхность имеет достаточно большие зональные ошибки ($\Delta N \leq 10$), характерные для процесса формообразования асферических поверхностей. На рис. 3б и 3в приведены интерферограммы на финишной стадии полировки ПП, из которых интерферограмма на рис. 3в относится к участку на ПП, выделенному ее экранированием, который соответствует отражающей поверхности внеосевого параболического зеркала, вырезаемого из сформированной параболической заготовки. Ошибки на этом участке составляют малую долю периода интерференционных полос. Они укладываются в заданный допуск на качество ПП.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные подтверждают, что рассмотренный интерферометр пригоден для контроля вогнутых параболических и эллиптических поверхностей, обладающих большими отступлениями от заданной формы на на-

чальной стадии полировки. Интерферометр используется в оптическом производстве НПО ГИПО с 1999 г. при изготовлении внеосевых светосильных параболических зеркал для оптических систем инфракрасной аппаратуры, в частности для тепловизионного канала серийно выпускаемого противотанкового ракетного комплекса “Корнет”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптический производственный контроль // Под ред. Малакары Д. М.: Машиностроение, 1985. С. 346–362.
2. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. С. 65–88, 105–152, 177–184.
3. Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мирнова Т.А., Ньюшкин А.А., Протасевич Д.В., Рафиков Р.А. Синтезированная голограммная оптика // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 12. С. 23–32.
4. Ларионов Н.П. Интерферометр для контроля асферических поверхностей второго порядка // Патент России № 2396513. 2010.