

УДК 681.787

© Е. Е. Майоров, В. Б. Коцкович, В. П. Пушкина,
А. В. Арефьев, Р. Б. Гулиев, А. В. Дагаев, 2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СВЕТОДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПЛАСТИН СРЕДСТВОМ КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИКИ

В статье представлена экспериментальная установка для измерения геометрических параметров оптических поверхностей деталей. Показана актуальность работы, т.к. получение высокоточной и достоверной информации о геометрических параметрах поверхностей всегда являлось важной задачей метрологии. В работе приведена оптическая схема интерферометра, а также даны технико-эксплуатационные характеристики экспериментальной установки. Определены объекты и метод исследования. Получены интерферограммы с поверхностей лучевых делителей разных производителей. Проанализированы изображения интерференционных полей и выявлены основные параметры волновых фронтов. Оптические поверхности контролировались экспериментальной установкой с точностью не хуже 0.05λ . Исследовались отражательные покрытия светоделителей, и получены зависимости коэффициента отражения по координатам x и y . Сравнительный анализ выявил предпочтительный вариант для современных автоматизированных интерферометров.

Кл. сл.: деформация волнового фронта, интерферограмма, коэффициент отражения, интерферометр Физо, размах, среднее квадратичное отклонение, точность измерений

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важность высокоточных и достоверных измерений в современной науке и технике с каждым годом возрастает [1]. Особое место в получении этих измерений занимают методы оптического контроля. Для решения ряда задач измерения эти методы единственно возможны. Их отличие от контактных методов, прежде всего, в отсутствии материальных контактов с исследуемой поверхностью предметов [2].

Среди оптических методов наиболее перспективными являются методы когерентной оптики, а именно интерференционные методы [3]. На сегодняшний день направление использования интерференционных приборов и систем значительно расширилось благодаря развитию компьютерной техники и созданию новых источников света (лазеров, суперлюминесцентных диодов, диодов белого света и т.д.) [4].

Оптические приборы и системы для контроля качества поверхностей различной оптической формы основаны на регистрации светового пучка, отраженного от исследуемой поверхности [5]. Поверхности оптических деталей представляют собой формы сферы (сферические зеркала, линзы и т.д.) и формы плоскости (поверхности призм, плоские зеркала, полупрозрачные стеклянные пластины, поверхности оптических клиньев и т.д.) [6].

Эти поверхности могут иметь погрешности по кривизне или плоскостности. Допуски на эти погрешности задаются количеством интерференционных полос или их долей.

Для контроля плоскостности оптических поверхностей, а также для измерения концевых мер преимущественно применяют интерферометр Физо [7]. Интерферометр Физо представляет разновидность многолучевых интерферометров, в котором интерференция происходит в воздушном зазоре между двумя отражающими поверхностями [8]. Этот прибор имеет общий ход световых лучей до полупрозрачной эталонной поверхности.

Анализ литературных данных показал, что наиболее универсальным методом контроля плоскостности объектов является бесконтактный метод измерений с применением интерферометра Физо, т.к. он исключает основной недостаток метода пробных стекол — материальный контакт эталонной и исследуемой поверхностей [9].

Поэтому может представлять интерес исследование оптических поверхностей светоделителей (полупрозрачных плоских зеркал), созданных для интерферометров различного назначения. В связи с разработкой большого числа различных оптических деталей для высокоточных оптических приборов и систем важное значение приобретает рассмотрение вопросов контроля качества оптических поверхностей.

Целью работы явилось исследование оптических плоских поверхностей светоделительных пластин средством когерентной оптики.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для высокоточных интерферометрических приборов и комплексов светоделитель (лучевой делитель) является одним из основных конструктивных элементов [10–15]. И от того, какая плоскостность оптической поверхности лучевого делителя, зависят достоверность, информативность и высокоточность измерений. На российском рынке оплотехнической продукции одними из основных поставщиков являются компании АО "ЛОМО" и "Thorlabs" (USA). Эти компании выпускают светоделительные пластины из кварцевого стекла и плавленого кварца различного назначения. В настоящей работе была поставлена задача провести сравнительную оценку плоскостности оптических поверхностей светоделителей компаний "ЛОМО" и "Thorlabs". Для исследований применялась экспериментальная установка, где основным измерительным блоком являлся интерферометр Физо.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования были следующие лучевые делители:

– делитель компании "Thorlabs" из кварцевого стекла диаметром 50.8 мм, толщиной 8 мм, 90/10 (отражение / пропускание), просветляющее покрытие 400–700 нм;

– делитель компании "ЛОМО" диаметром 30 мм, толщиной 5 мм, 90/10 (отражение / пропускание), покрытие с тыльной стороны тонкой пленкой серебра толщиной 500–600 нм.

Объекты исследования были предоставлены ООО "Оптико-электронные приборы" (г. Санкт-Петербург).

Высокая чувствительность к вибрации двухлучевых интерферометров дала толчок к поиску и построению новых схемных решений этих приборов. Именно в интерферометре Физо этот недостаток снижен.

Для контроля плоских поверхностей преимущественно применяют интерферометр Физо. В его схеме объектная ветвь, в которой находится исследуемый объект, совмещена с опорной ветвью, где расположена образцовая (эталонная) поверхность, формирующая опорный волновой фронт. Такая схема работает благодаря проходящему свету через эталонную поверхность.

На рис. 1 представлена оптическая схема интерферометра Физо. В качестве эталонной поверхности используется фронтальная поверхность клиновидной пластины, выполненная с образцовой точностью на уровне $1/20 \lambda$. При измерениях на экспериментальной установке возникала дополнительная интерференция при отражении светового луча от обратной, нерабочей поверхности эталона. Это существенно влияло на точность

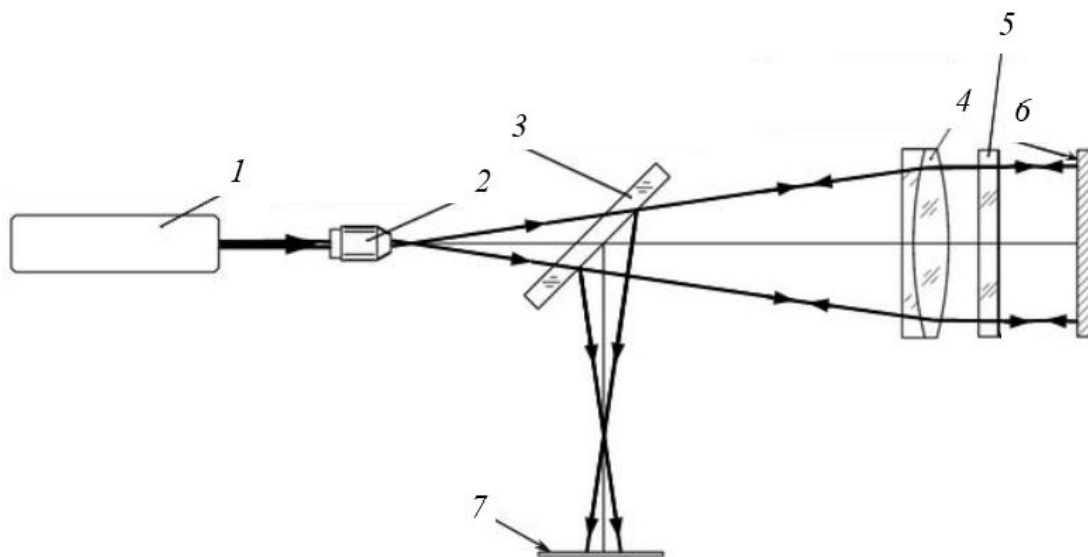


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра Физо.

1 — источник когерентного излучения; 2 — микрообъектив; 3 — светоделитель; 4 — коллимирующий объектив; 5 — клиновидная пластина с эталонной поверхностью; 6 — контролируемая поверхность образца; 7 — плоскость наблюдения

измерений. Для устранения влияния дополнительной интерференции была взята пластина, где нерабочая поверхность ее была выполнена с клиновидностью порядка 1 мм [15–20]. Данное решение позволило исключить побочную интерференцию от обратной поверхности эталона, что привело к максимальной информативности основной интерференционной картины.

Свет от когерентного источника 1 (ЛГ-79-1, He-Ne лазер с $\lambda = 0.63$ мкм, $P = 15$ мВт и $l_c = 1.5$ м) собирается и фокусируется микрообъективом 2. В фокусе микрообъектива установлена точечная диафрагма, которая отсекает пространственные частоты и улучшает однородность светового пучка. Далее световой пучок преобразуется в расходящийся, который после светоделителя 3 преобразуется в коллимирующий объективом 4. Параллельный пучок лучей, вышедший из объектива 4, отражается от верхней плоскости поверхности контролируемого образца 6 и от нижней плоскости поверхности эталона 5. В обратном ходе лучи, пройдя объектив 4 и отразившись от светоделителя, формируют интерференционную картину полос равной ширины в плоскости наблюдателя 7. Ширину и направление полос регулируют перемещениями микрометрического стола.

Технико-эксплуатационные характеристики экспериментальной установки:

- | | |
|---|---|
| – предельная инструментальная погрешность | — $\lambda/20$; |
| – апертура проверяемых поверхностей не более | — 0.25; |
| – числовая апертура объектива | — 0.2; |
| – пределы перемещения интерференционной головки по 3 осям, мм | — ± 10 ; |
| – приемники изображения | — фотокамера "Зенит" и цифровая камера TouPCam; |
| – источник света | — лазер ЛГ-79-1; |
| – длина волны излучения, мкм | — 0.63; |
| – габаритные размеры, мм | — 700×350×520; |
| – масса, кг | — 60. |

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментальных исследований использовалась установка на базе интерферометра Физо, внешний вид которой показан на рис. 2. На экспериментальной установке были получены поочередно интерферограммы поверхностей исследуемых лучевых делителей разных производителей. На рис. 3 приведены результаты съемок. В процессе измерений необходимо было получить информацию о деформации исследуемых волновых

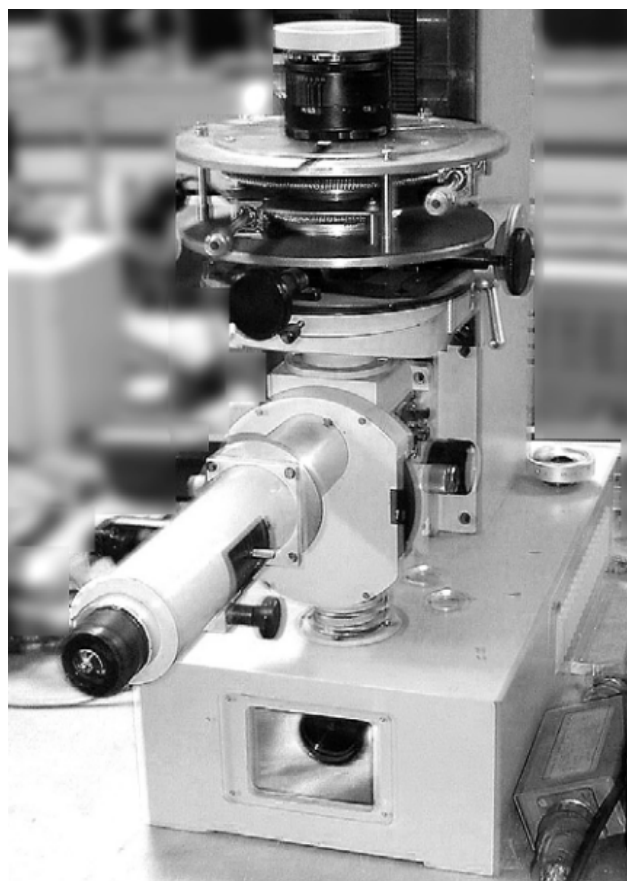


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки

фронтон двух светоделительных пластин [20–25]. Полученные интерферограммы были обработаны специальной компьютерной программой Master Zebra.

Master Zebra предназначена для сбора и обработки информации с записанных интерферограмм на фотопленку и получения данных об отклонении исследуемых волновых фронтов. Изображения интерферограмм были преобразованы в графический формат файлов (tiff). Далее эти форматы вводились в Master Zebra и подлежали фильтрации для устранения шумов. Программа автоматически определяла контуры изображений и линию сканирования. Основным этапом обработки являлась расстановка контурных точек на интерференционных полосах (светлых), чтобы не зависеть от уровня шумов и яркости интерференционных полос. Программой была проведена аппроксимация функции деформации волнового фронта по полиномам Цернике. После чего программа выводила на дисплей основные параметры деформации:

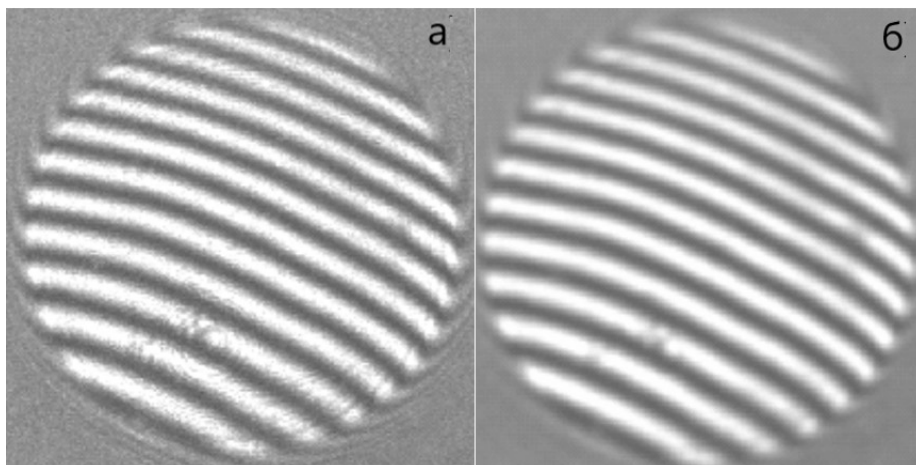


Рис. 3. Интерферограммы оптических поверхностей. а — светоделитель отечественного производства; б — светоделитель компании "Thorlabs"

размах (S), максимум (Max), минимум (Min) и среднее квадратичное отклонение (σ).

Итак, для светоделителя марки "Thorlabs":

$S = 0.155130$ мкм, $Max = 0.097561$ мкм, $Min = 0.051314$ мкм, $\sigma = 0.050138$ мкм.

Для светоделителя отечественной продукции:

$S = 0.111891$ мкм, $Max = 0.068121$ мкм, $Min = 0.039289$ мкм, $\sigma = 0.039121$ мкм.

Плоские поверхности контролировались экспериментальной установкой с точностью не хуже 0.05λ .

Информация, полученная по геометрическим параметрам поверхностей оптических деталей, говорит о том, что применять в качестве базового элемента в интерферометрах следует лучевые делители отечественного производства.

Экспериментальная установка позволяла получить данные об отражательном покрытии исследуемых образцов. Для проведения этих измерений использовалась программа Gold Soft Wear Interferometer. Эта программа позволяла получать данные о зависимости коэффициента отражения от перемещения исследуемого образца по координатам x и y . На рис. 4 показаны зависимости коэффициента отражения по продольным и поперечным смещениям образцов. Анализируя графические зависимости, можно сделать следующий вывод, что у образца отечественного производства значения коэффициента отражения были близки к максимальным, а само распределение носило равномерный характер. Образец импортного производства также имел большие значения коэффициента отражения, но кривая распределения имела незначительные всплески. А это означает, что у первого образца качество поверхности отражения выше, чем у второго. Видимо, это связано с более крупным зерном отражающего слоя.

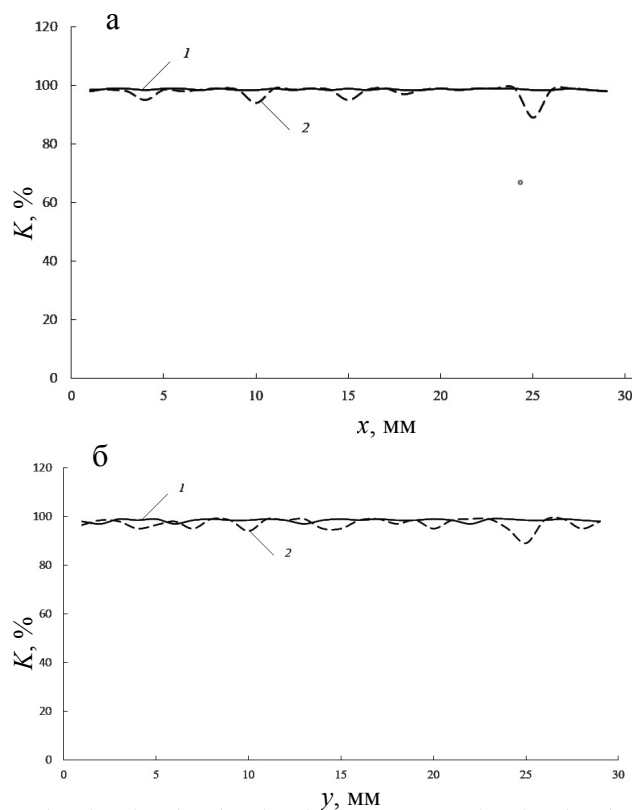


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения K от перемещения исследуемого образца по координатам x (а) и y (б).

1 — светоделитель отечественного производства; 2 — светоделитель компании "Thorlabs"

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты измерений оптических поверхностей деталей значимы при построении схем двухлучевых и многолучевых интерферометров. Проведенный сравнительный анализ двух светоделителей показал, что оба образца могут быть использованы в различных оптических приборах в зависимости от поставленных задач.

Данная работа представляет интерес как для проектировщиков оптических приборов, так и для дальнейших научных исследований оптических деталей различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Франсон М., Сланский С. Когерентность в оптике / пер. с франц. под ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1967. 80 с.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.
4. Малакара Д. Оптический производственный контроль / пер. с англ. под ред. А.Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
6. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
7. Левин Б.М. Оптические методы определения характера профиля поверхностей // Оптико-механическая промышленность. 1938. № 10-11, С. 37-41.
8. Захарьевский А.Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
9. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
10. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 195 с.
11. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Оптимизация динамических параметров оптического щупа триггерного типа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 13-16. URL: https://ntv.ifmo.ru/article/5/optimizaciya_dinamicheskikh_parametrov_opticheskogo_schupa_triggernogo_tipa.htm
12. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих объектов // Приборы. 2012. № 7 (145). С. 23-25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17910855>
13. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Прокопенко В.Т., Чистякова Н.Я. Исследование метрологических характеристик измерительной оптико-механической головки // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 7. С. 61-67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17790991>
14. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Шерстобитова А.С. Исследование оптико-электронной системы расшифровки голографических интерферограмм // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 3. С. 47-51. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23285864>
15. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 2, С. 38-46. URL: <http://iairas.ru/mag/2013/abst2.php#abst5>
16. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Вывод аналитического выражения для разности хода лучей, прошедших интерферометр Жамена // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 3. С. 76-81. URL: <http://iairas.ru/mag/2013/abst3.php#abst10>
17. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Система когерентной обработки спеклограмм для исследования поверхностей зубной ткани // Медицинская техника. 2013. № 6 (282). С. 25-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21034782>
18. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Приборы. 2015. № 11 (185). С. 26-31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25340893>
19. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров А.Г., Черняк Т.А. Оптико-электронный прибор для контроля геометрических параметров диффузно отражающих объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 388-394. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-388-394
20. Майоров Е.Е., Дагаев А.В., Пономарев С.В., Черняк Т.А. Исследование интерферометра сдвига в фазоизмерительных приборах и системах расшифровки голографических интерферограмм // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 2. С. 32-40. URL: <http://iairas.ru/mag/2017/abst2.php#abst4>
21. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Курлов А.В., Хохлова М.В., Кирик Д.И., Капранов Д.Д. Экспериментальное исследование метрологических характеристик автоматизированной интерферометрической системы измерения формы поверхности диффузно отражающих объектов // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 33-37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30525791>
22. Курлов В.В., Коцкович В.Б., Майоров Е.Е., Пушкина В.П., Таюрская И.С. Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 8. С. 179-189. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44038077>
23. Цыганкова Г.А., Майоров Е.Е., Черняк Т.А., Константинова А.А., Машек А.Ч., Писарева Е.А. Исследование разработанного интерферометра поперечного сдвига для настройки интерференционных полос при обработке интерферограмм // Приборы. 2021. № 2. С. 20-25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44906824>

24. Хохлова М.В., Дагаев А.В., Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Громов О.В. Исследование оптико-электронной системы при обработке голографических пластин // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8 (110). С. 103–108. DOI: 10.23670/IRJ.2021.110.8.015
25. Хохлова М.В., Дагаев А.В., Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Громов О.В. Интерференционная система измерения геометрических параметров отражающих поверхностей // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 6 (108). С. 184–189. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.029

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург (Майоров Е.Е., Коцкович В.Б., Пушкина В.П.)

Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕвразЭС, Санкт-Петербург (Арефьев А.В., Гулиев Р.Б.)

Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", г. Ивангород (Дагаев А.В.)

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич,
majorov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию 16.03.2022

INVESTIGATION OF OPTICAL FLAT SURFACES OF BEAM-SPLITTING PLATES BY MEANS OF COHERENT OPTICS

E. E. Maiorov¹, V. B. Kotskovich¹, V. P. Pushkina¹,
A. V. Arefiev², R. B. Guliyev², A. V. Dagaev³

¹*Saint Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP), Saint Petersburg, Russia*

²*University at the EurAsEC inter-parliamentary Assembly, Saint Petersburg, Russia*

³*Ivangorodskii Humanitarian-Technical Institute (branch of) State educational institution for higher professional education "Saint Petersburg University of Aerospace Instrumentation", Ivangorod, Russia*

The article presents an experimental setup for measuring the geometric parameters of optical surfaces of details. The relevance of the work is shown since obtaining high-precision and reliable information about the geometric parameters of surfaces has always been an important task of metrology. The paper highlights the optical layout of the interferometer, as well as the technical and operational characteristics of the experimental setup. The objects and method of research are determined. Interferograms were obtained from the surfaces of beam splitters of various manufacturers. The images of interference fields were analyzed, and the main parameters of wave fronts were revealed. The optical surfaces were controlled by an experimental setup with an accuracy of not worse than 0.05λ . The reflective coatings of beam splitters were studied, and the dependences of the reflection coefficient on the x and y coordinates were obtained. Comparative analysis revealed the preferable option for modern automated interferometers.

Keywords: wavefront deformation, interferogram, reflection coefficient, Fizeau interferometer, span, mean square deviation, measurement accuracy

INTRODUCTION

At present, the importance of high-precision and reliable measurements in modern science and technology is increasing constantly [1]. A special role in obtaining these measurements has been taken by methods of optical control. These methods are the only ones that can be used to solve a variety of measurement problems. Their difference from contact methods is, first of all, the absence of material contact with the investigated surface of objects [2].

Among the optical methods, the most promising are the methods of coherent optics, namely, interference methods [3]. To date, the use of interference devices and systems has expanded significantly due to the development of computer technology and the creation of new light sources (lasers, superluminescent diodes, white light diodes, etc.) [4].

Optical instruments and systems for quality control of surfaces of various optical shapes are based on the registration of a light beam reflected from the surface under study [5]. The surfaces of optical parts are spherical shapes (spherical mirrors, lenses etc.) and plane shapes (surfaces of prisms, flat mirrors, translucent glass plates, surfaces of optical wedges, etc.) [6]. These surfaces may have errors in curvature or flatness. Tolerances for these errors are set by the number of interference fringes or their fractions.

To control the flatness of optical surfaces, as well as to determine end measures, the Fizeau interferometer is mainly used [7]. The Fizeau interferometer is a kind of multibeam interferometer in which interference occurs in the air gap between two reflecting surfaces [8]. This device has an overall path of light rays to a translucent reference surface.

An analysis of the scientific data showed that the most universal method for monitoring the flatness of objects is a non-contact measurement using a Fizeau interferometer, because it eliminates the main drawback of the trial glass method, which is the material contact between the reference and test surfaces [9].

Therefore, it may be of interest to study the optical surfaces of beam splitters (semitransparent flat mirrors) designed for interferometers for various purposes. In connection with the development of a large number of different optical elements for high-precision optical devices and systems, it is important to consider the issues of optical surface quality control.

The aim of the work was to study the optical flat surfaces of beam-splitting plates by means of coherent optics.

FORMULATION OF THE PROBLEM

A beam splitter is one of the main structural elements for high-precision interferometric devices and complexes [10–15]. The reliability, informational con-

tent and accuracy of measurements depend on the flatness of the optical surface of the beam splitter. Some of the main suppliers to the Russian market of optotechnical products are JSC LOMO (Russia) and Thorlabs (USA). These companies produce beam-splitting plates made of quartz glass and fused silica for various applications. In the present work, the task was set to carry out a comparative assessment of the flatness of the optical surfaces of beam splitters produced by LOMO and Thorlabs. For research, an experimental setup was used, in which the Fizeau interferometer was the main measuring unit.

OBJECT AND METHOD OF STUDIES

The following beam dividers were the objects of study:

- a Thorlabs quartz glass splitter 50.8 mm in diameter, 8 mm thick, 90/10 (reflection / transmission), AR coating 400–700 nm;
- a LOMO splitter: 30 mm diameter, 5 mm thick, 90/10 (reflection / transmission), coated on the back with a thin film of silver 500–600 nm thick.

The objects of study were provided by Optico-electronic Devices LLC (St. Petersburg).

The high sensitivity to vibration of two-beam interferometers gave impetus to the search for and the construction of new layout solutions for these devices. In the Fizeau interferometer this shortcoming is reduced.

To control flat surfaces, the Fizeau interferometer is mainly used. In its layout, the measuring branch, in which the test object is located, is combined with the reference branch, where the exemplary (reference) surface is located and which forms the reference wave front. Such a layout works due to the light passing through the reference surface.

Fig. 1 shows the optical layout of a Fizeau interferometer. As a reference surface, the front surface of the wedge-shaped plate is used, which is made to an order of $1/20 \lambda$ with exemplary accuracy. During measurements on the experimental setup, additional interference arose when the light beam was reflected from the back, non-working surface of the standard. This significantly affected the measurement accuracy. To eliminate the influence of additional interference, a plate was taken, where its non-working surface was made in a wedge shape of about 1 mm [15–20]. This solution made it possible to exclude side interference from the back surface of the standard, which allowed for maximum information efficiency of the main interference pattern.

Fig. 1. Optical layout of a Fizeau interferometer. 1 — source of coherent emission; 2 — microlens; 3 — beam splitter; 4 — collimating lens; 5 — wedge-shaped plate with a reference surface; 6 — test surface of the sample; 7 — observation plane

Light from coherent source 1 (ЛГ-79-1, He-Ne laser with $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, $P = 15 \text{ mW}$ and $l_c = 1.5 \text{ m}$) is collected and focused by microobjective 2. A pinhole diaphragm is installed in the focus of the microlens, which cuts off spatial frequencies and improves the uniformity of the light beam. Further, the light beam is converted into a divergent one, which, passing through the beam splitter 3, is converted into a collimating one by the lens 4. The parallel beam of rays emerging from the lens 4 gets reflected from the upper plane of the surface of the test sample 6 and from the lower plane of the surface of the standard 5. In the reverse course, the rays, having passed through the lens 4 and reflected from the beam splitter, form an interference pattern of bands of equal width in the plane of the observer 7. The width and direction of the bands are controlled by moving the micrometer table.

Technical and operational characteristics of the experimental setup:

- ultimate instrumental error — $\lambda/20$;
- aperture of the tested surfaces — not more than 0.25;
- numerical aperture of the objective — 0.2;
- limits of interference head movement along 3 axes, mm — ± 10 ;
- image receivers — camera Zenith and digital camera ToupCam;
- light source — laser ЛГ-79-1;
- emission wavelength, μm , — 0.63;
- overall dimensions, mm — $700 \times 350 \times 520$;
- weight, kg — 60.

EXPERIMENTAL RESULTS

For experimental studies, we used a setup based on a Fizeau interferometer, the appearance of which is shown in Fig. 2. Interferograms of the surfaces of the studied beam splitters from a number of manufacturers were obtained successively on the experimental setup. Fig. 3 shows the results of the surveys. In the course of measurements, it was necessary to obtain information on the deformation of the investigated wave fronts of two beam-splitting plates [20–25]. The obtained interferograms were processed with a special Master Zebra computer program.

Fig. 2. Appearance of the experimental setup

Fig. 3. Interferograms of optical surfaces. a — domestically produced beam splitter; б — Thorlabs beam splitter

Master Zebra is designed to collect and process information from the recorded interferograms on film and obtain data on the deviation of the studied wave fronts. Interferogram images were converted to a graphic format file (tiff). Further, these files were introduced into Master Zebra and subjected to filtering to eliminate noise. The program automatically determined the contours of the images and the scanning line. The main stage of processing was the arrangement of contour points on the interference fringes (light ones), so as not to depend on the noise level and the brightness of the interference fringes. The program performed an approximation of the wavefront deformation function using the Zernike polynomials. After that, the main deformation parameters were presented on the display: span (S), maximum (Max), minimum (Min), and mean square deviation (σ).

So, for the Thorlabs beam splitter:

$S = 0.155130 \text{ } \mu\text{m}$, $Max = 0.097561 \text{ } \mu\text{m}$, $Min = 0.051314 \text{ } \mu\text{m}$, $\sigma = 0.050138 \text{ } \mu\text{m}$.

For a beam splitter of domestic production:

$S = 0.111891 \text{ } \mu\text{m}$, $Max = 0.068121 \text{ } \mu\text{m}$, $Min = 0.039289 \text{ } \mu\text{m}$, $\sigma = 0.039121 \text{ } \mu\text{m}$.

Flat surfaces were controlled by an experimental setup with an accuracy of no worse than 0.05λ .

The geometric parameters of the surfaces of optical elements suggest that beam splitters of domestic production should be used as the basic element in interferometers.

The experimental setup made it possible to obtain data on the reflective coating of the samples under study. For these measurements, the Gold Soft Wear Interferometer program was used. This program allowed to obtain the dependence of the reflection coefficient on the movement of the test sample along the x and y coordinates. Fig. 4 shows the dependences of the reflection coefficient on the longitudinal and transverse displacements of the samples. Analyzing the graphical dependencies, one can conclude that a sample of domestic production had the values of the reflection coefficient closer to the maximum, and the distribution was uniform. The foreign sample also had high reflectance values, but the distribution curve had minor spikes. This means that the first sample has a higher quality of the reflection surface than that of the second one. Apparently, this is due to the coarser grain of the reflective layer.

Fig. 4. Dependence of the reflection coefficient K on the displacement of the test sample along the x (a) and y (б) coordinates.
1 — beam splitter of domestic production;
2 — Thorlabs beam splitter

CONCLUSION

The obtained experimental results of measurements of the optical surfaces are significant in the design of layouts of two-beam and multibeam interferometers. A comparative analysis of two beam splitters has shown that both samples can be used in various optical devices, depending on the tasks.

This work is of interest both for designers of optical devices and for further scientific research of optical elements for various purposes.

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. 1st ed. Oxford: Pergamon Press, 1959. 852 p. (Russ. ed.: Born M., Vol'f Eh. *Osnovy optiki*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p.) (In Russ.).
2. Franson M., Slanskii S. *Kogerentnost' v optike* [Coherence in optics]. K.S. Shifrin, ed. Moscow, Nauka Publ., 1967. 80 p. (In Russ.).
3. Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 926 p. (In Russ.).
4. Malakara D. *Opticheskii proizvodstvennyi kontrol'* [Optical production control]. A.N. Sosnov, ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 340 p. (In Russ.).
5. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p. (In Russ.).
6. Afanas'ev V.A. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 263 p. (In Russ.).
7. Levin B.M. [Optical methods for determining the nature of the profile of surfaces]. *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost'* [Optomechanical industry], 1938, no. 10-11, pp. 37–41. (In Russ.).
8. Zakhar'evskii A.N. *Interferometry* [Interferometers]. Moscow, Oborongiz Publ., 1952. 296 p. (In Russ.).
9. Kolomiitsev Yu.V. *Interferometry* [Interferometers]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 296 p. (In Russ.).
10. Prokopenko V.T., Maiorov E.E. *Interferometriya diffuzno otrazhayushchikh ob'ektov* [Diffuse reflective object interferometry]. Saint-Petersburg, NIU ITMO, 2014. 195 p. (In Russ.).
11. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Dynamic parameters optimization for trigger type optical probe]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2012, no. 2 (78), pp. 13–16. URL: https://ntv.ifmo.ru/ru/article/5/optimizaciya_dinamicheskikh_parametrov_opticheskogo_schupa_triggernogo_tipa.htm (In Russ.).
12. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Calculation of scanning parameters of the interferometric shape control system of diffusely reflecting objects]. *Pribory* [Instruments], 2012, no. 7 (145), pp. 23–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17910855> (In Russ.).

13. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Prokopenko V.T., Chistyakova N.Ya. [Study of metrological characteristics of a measuring optical-mechanical head]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of instrument engineering], 2012, vol. 55, no. 7, pp. 61–67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17790991> (In Russ.).
14. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. [Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms]. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2013, vol. 80, no. 3, pp. 47–51. DOI: 10.1364/JOT.80.000162 (In Russ.).
15. Maiorov E.E., Prokopenko V.T. [Study of the speckle structure influence on the formation of the interference signal and measurement error]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2013, vol. 23, no. 2, pp. 38–46. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2013/abst2.php#abst5> (In Russ.).
16. Maiorov E.E., Prokopenko V.T. [Derivation of an analytical expression for the path difference of the rays passed through Jamin interferometer]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2013, vol. 23, no. 3, pp. 76–81. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2013/abst3.php#abst10> (In Russ.).
17. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Specklograms Coherent Processing System for Examination of Dental Tissue Surfaces]. *Meditinskaya tekhnika* [Biomedical Engineering], 2013, no. 6 (282), pp. 25–27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21034782> (In Russ.).
18. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaidarov G.G., Chernyak T.A. [Development of computer interference control system for non-smooth surfaces]. *Pribory* [Instruments], 2015, no. 11 (185), pp. 26–31. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25340893>
19. Prokopenko V.T., Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaidarov A.G., Chernyak T.A. [Optical-electronic instrument for control over geometrical parameters of diffuse reflecting objects]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2016, vol. 59, no. 5, pp. 88–394. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-388-394 (In Russ.).
20. Maiorov E.E., Dagaev A.V., Ponomarev S.E., Chernyak T.A. [The study of a shearing interferometer in the phase measuring devices and systems of decoding holographic interferograms]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 2, pp. 32–40. DOI: 10.18358/np-27-2-i3240 (In Russ.).
21. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Kurlov A.V., Khokhlova M.V., Kirik D.I., Kapralov D.D. [Experimental study of metrological characteristics of automated interferometric system for measuring surface shape of diffusely reflecting objects]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2017, no. 10, pp. 33–37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30525791> (In Russ.).
22. Kurlov V.V., Koskovich V.B., Maiorov E.E., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. [Experimental study of the developed interference system for measuring the surface of objects of complex shape]. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical sciences], 2020, no. 8, pp. 179–189. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44038077> (In Russ.).
23. Tsygankova G.A., Maiorov E.E., Chernyak T.A., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A. [Study of a developed cross-shear interferometer for tuning interference bands in interferogram processing]. *Pribory* [Instruments], 2021, no. 2, pp. 20–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44906824> (In Russ.).
24. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Maiorov E.E., Arefyev A.V., Guliev R.B., Gromov O.V. [An investigation of the optoelectronic system in the processing of holographic plates]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Research Journal], 2021, no. 8 (110), pp. 103–108. DOI: 10.23670/IRJ.2021.110.8.015 (In Russ.).
25. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Maiorov E.E., Arefyev A.V., Guliev R.B., Gromov V.O. [Interference system for measuring the geometric parameters of reflecting surfaces]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Research Journal], 2021, no. 6 (108), pp. 184–189. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.029 (In Russ.).

Contacts: *Maiorov Evgeniy Evgen'evich*,
maiorov_ee@mail.ru

Article received by the editorial office on 16.03.2022