

УДК 681.787

© Е. Е. Майоров, Ю. М. Бородянский, Р. Б. Гулиев,
А. В. Дагаев, В. В. Курлов, И. С. Таюрская, 2023

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЛОСКОВЫПУКЛЫХ ЛИНЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ С ДИФРАГИРОВАННЫМ ОПОРНЫМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ

В работе реализовано схемное решение на экспериментальной интерферометрической установке, действие которой основано на формировании опорного волнового фронта с применением точечной диафрагмы. Оптические приборы и комплексы, построенные по такой схеме, дают возможность проводить измерения на поверхностях оптических деталей и элементов, предназначенных для высокоточной оптики (интерферометров различного назначения, интерференционных микроскопов и т.д.), поэтому работа перспективна и актуальна. В работе приведена оптическая схема интерферометра, а также даны технико-эксплуатационные характеристики экспериментальной установки. Определены объекты и метод исследования. Получены интерферограммы с поверхностей плосковыпуклых линз: из бесцветного оптического стекла марки К8, кварцевого стекла марки КИ (плавленый кварц SiO_2) и селенида цинка (ZnSe). Проанализированы изображения интерференционных полей и выявлены основные параметры волновых фронтов. Оптические поверхности контролировались экспериментальной установкой с точностью не хуже 0.01λ . Исследовалась отражательная способность оптических поверхностей предоставленных образцов и получены зависимости коэффициента отражения по координатам x и y .

Кл. сл.: точность, чувствительность, оптический контроль, интерференционные методы, плосковыпуклые линзы, виброустойчивость, микрообъектив

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время огромное внимание уделяется методам и средствам оптических измерений в процессе разработки оптических и оптико-электронных приборов и комплексов [1, 2]. Эти методы и средства играют важнейшую роль в осуществлении контроля оптических деталей. Их высокая точность и чувствительность обеспечивают достоверность измерений исследуемых объектов [3, 4]. Пороговая чувствительность и точность методов оптических измерений находится в диапазоне от 1 мкм до 0.01 мкм [5, 6]. Используя оптические приборы и системы совместно с современными компьютерными технологиями возможно увеличить эти параметры в десятки раз. Анализ научно-технической литературы показал, что оптический контроль доказал свою достоверность, информативность, наглядность и надежность [7, 8]. Поэтому оптические методы и средства нашли свое применение в естественнонаучных и научно-технических направлениях. С каждым днем их роль возрастает в технической, медицинской, биологической и химической практиках [9, 10].

Среди методов оптического контроля преимущественно выделяются методы когерентной оптики, а именно интерференционные методы [11, 12]. Интерференционные методы позволяют решать задачи различной сложности: исследовать плоские, сферические и клиновидные поверхности оптических элементов; получать информацию о деформации объектов со сложным рельефом поверхности [13, 14]. Важность интерференционных методов обусловлена их возможностями. Эти методы дают возможность получать информацию о статистических и динамических процессах, данные о волновых фронтах в разные промежутки времени, информацию о поверхности объекта в качественном и количественном аспектах, изображения в трехмерной графике [15, 16].

Интерференционные методы контроля оптической поверхности и работа соответствующих приборов основаны на анализе светового излучения, отраженного от исследуемой поверхности [17, 18]. Оптические поверхности изделий представляют собой формы сфер, плоскостей, наклонных плоскостей. Изучение научно-технической литературы представило следующую картину: при измерениях оптических поверхностей возможно применять теневой метод Фуко, метод Гартмана, а также

интерферометрический метод с использованием интерферометра Физо [19, 20].

В последние годы появились научные работы, направленные на получение количественных оценок ошибок системы по данным испытаний теневым методом, а в методе Гартмана научились обеспечивать наглядность и по гартманограммам в абберационно-корригированной оптической системе извлекать величину aberrаций. Касаемо интерференционного метода, то до сих пор контроль оптической поверхности осуществляется интерферометром Физо, т.к. в нем снижена чувствительность к вибрациям, которая имела у двухлучевого интерферометра Тваймана [2, 21]. И еще важная деталь: выпускаемые оптико-электронные комплексы, имеющие в составе интерферометр Физо, оснащены компьютерами, видеовыходом и дорогостоящим программным обеспечением. Однако их точностные возможности ограничены необходимостью применения в их конструкции образцовых деталей, точность которых неизбежно ограничена и находится на уровне $\lambda/20$ [2, 22].

Схемные решения классических интерферометров основаны на формировании опорного волнового фронта с применением образцовых оптических поверхностей (интерферометры Тваймана и Физо), которые до сих пор широко используются для контроля оптических поверхностей. На сегодняшний день наблюдается рост тенденции контроля элементов оптических систем наивысшего класса точности. К таким оптическим элементам изделий можно отнести оптические элементы современных исследовательских микроскопов, технологической аппаратуры микроэлектроники и оптико-электронных устройств записи информации [23, 24]. Требования к точности расчета и выполнения этих систем находятся на уровне $1/20$ – $1/30 \lambda$, где λ — длина волны оптического излучения. Таким образом, для контроля при их изготовлении и применении необходимы приборы, обеспечивающие точность на уровне $1/100$ – $1/200 \lambda$, т.е. на порядок точнее классических [2, 25].

Поэтому может представлять интерес исследование оптических поверхностей плосковыпуклых линз, применяемых в объективах современных интерференционных микроскопов, интерференционной установкой с дифрагированным опорным волновым фронтом.

Цель работы состояла в исследовании оптических поверхностей плосковыпуклых линз экспериментальной интерференционной установкой с дифрагированным опорным волновым фронтом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В современных интерференционных микроскопах микрообъективы являются одними из основ-

ных элементов. Плосковыпуклые линзы используются в этих микрообъективах, и от того, какое качество поверхности линзы, зависит точность измерений. В последние 10–12 лет микрообъективы создавались на базе импортных оптических элементов (двояковыпуклых, двояковогнутых, плосковыпуклых линз, плоскопараллельных пластин и т.д.). Поэтому необходимо было провести измерения оптических поверхностей плосковыпуклых линз отечественного производства в рамках импортозамещения, предоставленных ООО "Завод Оптических Изделий". Измерения проводились на экспериментальной оптико-измерительной установке, построенной на базе лазерного дифракционного интерферометра.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовались три вида плосковыпуклых линз: из бесцветного оптического стекла марки К8, кварцевого стекла марки КИ (плавленый кварц SiO_2) и селенида цинка (ZnSe). Все образцы имели одинаковые геометрические размеры: диаметр 10 мм, толщина по оси 3 мм, толщина кромки 2 мм.

Для контроля оптических поверхностей изделий различных форм используют автоматизированные комплексы и приборы, построенные на базе интерферометра Тваймана или Физо [2, 20, 25]. Последняя технология проста в использовании и имеет малую виброустойчивость. Данные приборы и комплексы имеют один значимый недостаток — неустранимые остаточные ошибки опорного волнового фронта эталона, которые возникают при его изготовлении. Автоматизированные интерферометрические комплексы, построенные по классической схеме, работа которых основана на анализе светового излучения, отраженного от контролируемой поверхности, и по сей день применяются на различных оптических производствах. В повседневной практике в результате длительной эксплуатации этих комплексов возникали проблемы с измерениями. Например, при контроле одного и того же образца в одно время были одни параметры, а в другое время — отличные от предыдущих параметров. Видимо, это связано с ненадлежащим хранением эталона, да и сами комплексы 1973 г. выпуска.

В настоящее время созданы и активно разрабатываются современные автоматизированные интерферометрические комплексы на базе лазерного интерферометра с дифрагированным опорным (эталонным) волновым фронтом [2, 25]. Преимущества такой схемной реализации над классической в том, что дает экспериментатору удобство и комфорт при эксплуатации такого комплекса, простоту в управлении. В таком схемном решении

физический эталонный образец заменен на дифрагированный эталонный волновой фронт, а значит, что точность измерений вырастает в разы. Снимается вопрос об остаточных ошибках опорного волнового фронта эталона и его ограничении точности при изготовлении.

Поэтому для контроля оптических поверхностей элементов высокоточных оптических приборов и комплексов целесообразно применять лазерную интерференционную экспериментальную установку с дифрагированным эталонным волновым фронтом.

В Приложении показан внешний вид установки. Излучение от лазера имеет высокую когерентность и способно фокусироваться в диаметры от 1 мкм до 10 мкм. В экспериментальной установке в качестве эталона использовался сферический волновой фронт, образованный дифракцией сходящихся лучей на отверстии с диаметром, равным 5 мкм. Точечная диафрагма выполнена из полированной металлической пластинки с диаметром отверстия 5 мкм. Отверстие служило источником дифракционной волны. Сложение этой волны (опорной) с волной, отраженной от измеряемой поверхности (объектной), есть результат интерференции.

На рис. 1 представлена оптическая схема лазерной интерференционной установки с дифрагированным эталонным волновым фронтом.

Свет от когерентного источника 1 (ЛГ-79-1 — He-Ne лазер с $\lambda = 0.63$ мкм, $P = 15$ мВт), пройдя отрицательный компонент 2, фокусируется объективом 3 в точечное отверстие 5 наклонной высокополированной металлической пластинки 4. Отверстие совмещено с центром сферической поверхности исследуемого объекта 13. В ветви наблюдения имеются объектив 9 и окуляр 11 для наблюдения освещенной точечной диафрагмы и автоколлимационного изображения точки в центре контролируемой поверхности. Для наблюдения интерференции в зрачке дополнительно вводится линза Бертрана 10. Для регистрации интерферограммы за окуляром устанавливается камера 12.

Технико-эксплуатационные характеристики экспериментальной установки:

- предельная инструментальная погрешность — $\lambda/100$;
- апертура проверяемых поверхностей не более — 0.25;
- числовая апертура объектива — 0.2;
- пределы перемещения интерференционной головки по 3 осям, мм — ± 10 ;
- приемник изображения — фотокамера "Canon";
- источник света — лазер ЛГ-79-1;
- длина волны излучения, мкм — 0.63;
- габаритные размеры, мм — 750×450×550.

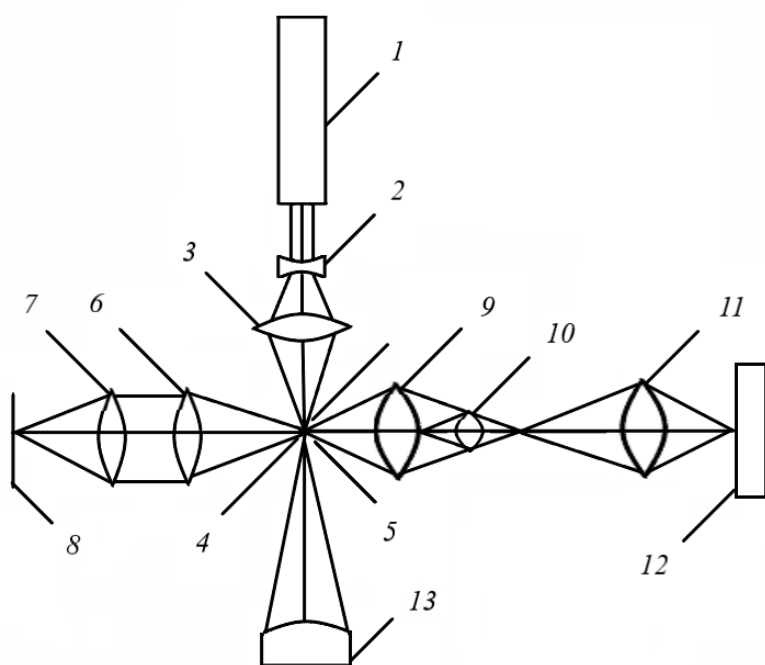


Рис. 1. Оптическая схема лазерной интерференционной установки с дифрагированным эталонным волновым фронтом.

1 — лазер; 2 — двояковогнутая линза; 3 — микрообъектив; 4 — высокополированная металлическая пластинка; 5 — точечное отверстие; 6 и 7 — встречные коллиматорные объективы; 8 — опорное зеркало; 9 — объектив; 10 — линза Бертрана; 11 — окуляр; 12 — фотокамера

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На экспериментальной установке были получены поочередно интерферограммы поверхностей исследуемых плосковыпуклых линз: из бесцветного оптического стекла марки К8, кварцевого стекла марки КИ (плавленный кварц SiO_2) и селенида цинка (ZnSe). Интерферограммы получены на дифракционном интерферометре, где в качестве эталонного волнового фронта используется волна, дифрагированная на отверстии с диаметром, равным 5 мкм. На рис. 2 приведены экспериментальные результаты. С целью восстановления фазы волнового фронта и топографии поверхности использовалась компьютерная программа обработки интерферограмм ZEBRA MathOPTIX.

Программа ZEBRA MathOPTIX аналогична программному обеспечению интерферометров таких ведущих фирм, как Zygo, Veeco и Mӧller-Wedel. Обработка интерферограмм производится в несколько этапов. Этап неглубокой пространственной фильтрации для удаления "мусора" из интерферограммы и этап идентификации полос — расстановка точек вдоль полос с определением возможного порядка базиса аппроксимации контролируемого волнового фронта или поверхности. Дальнейшая обработка основывается на серии математических методов интерпретации функций, целью которых является получение достоверного разложения отклонения волнового фронта или по-

верхности по полиномам Цернике. При этом определяются такие важные величины, как размах (peak-to-valley, R) и среднеквадратическое отклонение (RMS, σ) в микрометрах.

Полученные результаты:

– Для оптического стекла марки К8:

$R = 0.191180$ мкм, $\sigma = 0.03025$ мкм.

– Для кварцевого стекла марки КИ:

$R = 0.152534$ мкм, $\sigma = 0.02925$ мкм.

– Для селенида цинка:

$R = 0.102198$ мкм, $\sigma = 0.02113$ мкм.

Выпуклые поверхности плосковыпуклых линз контролировались экспериментальной установкой с точностью не хуже 0.01λ .

Исследования показали, что измеряемые оптические поверхности высокого качества. Использование этих оптических элементов в объективах интерференционных микроскопов целесообразно.

На представленной экспериментальной установке проведены измерения отражательной способности исследуемых поверхностей (экспериментальная установка позволяла получить данные об отражательной способности исследуемых образцов). Для проведения этих измерений использовались программы Golden Software Interferometer. Эти программы позволяли получать данные о зависимости коэффициента отражения от перемещения исследуемого образца по координатам x и y .

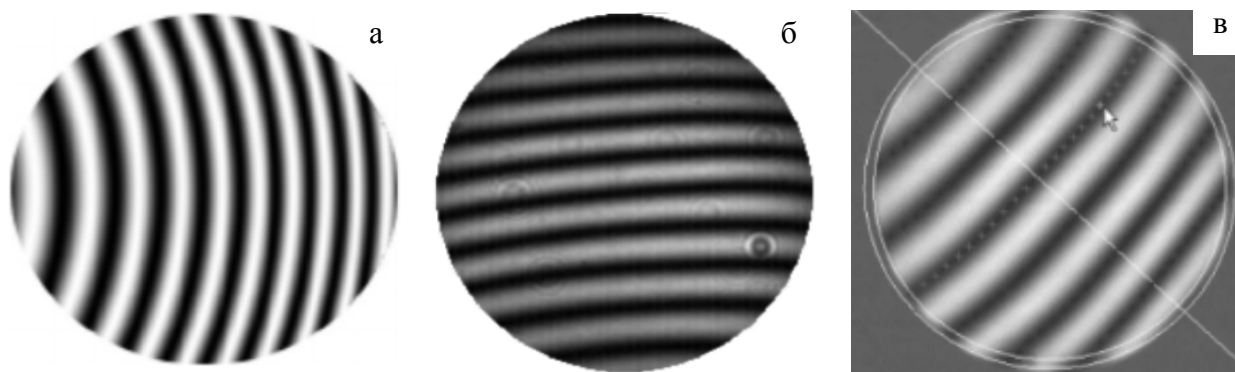


Рис. 2. Интерферограммы оптических поверхностей плосковыпуклых линз. а — линза из марки К8; б — линза из марки КИ; в — линза из ZnSe

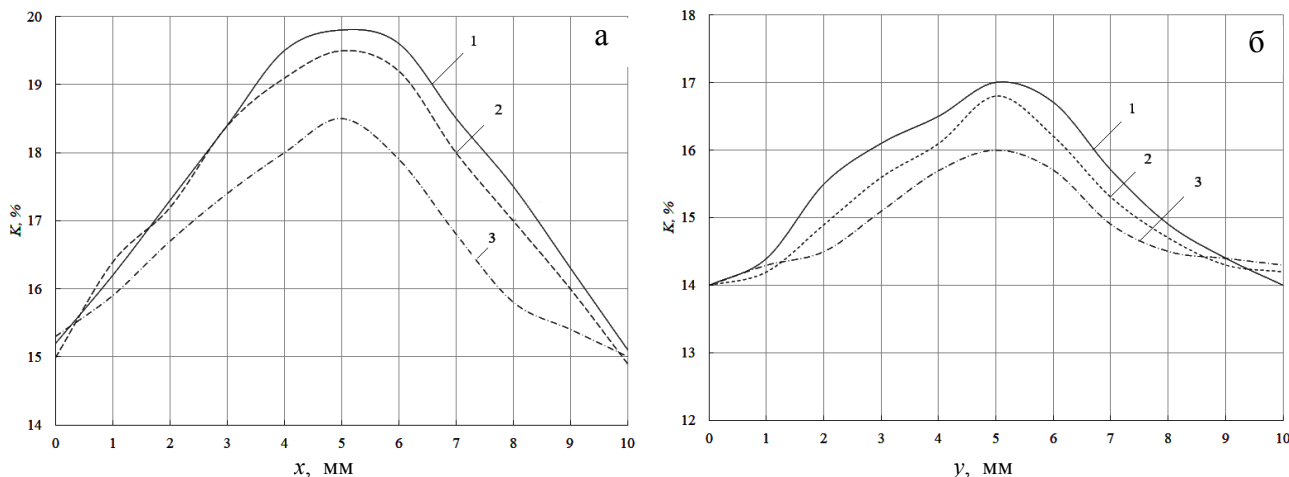


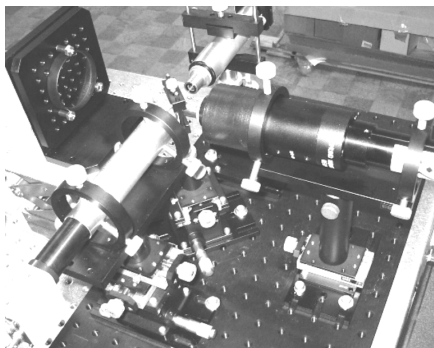
Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от перемещения исследуемых образцов.
 а — по координате x для 1 — линзы из марки К8, 2 — линзы из марки КИ, 3 — линзы из ZnSe;
 б — по координате y для 1 — линзы из марки К8, 2 — линзы из марки КИ, 3 — линзы из ZnSe

На рис. 3 представлены экспериментальные данные. Графические зависимости показывают, что распределение коэффициента отражения имело плавную колоколообразную форму, ни смещений, ни всплесков не наблюдалось. А это означает, что оптические поверхности высокого качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты измерений оптических поверхностей исследуемых образцов значимы, т.к. данные оптические элементы планируется применить в объективах высокоточных оптических комплексов и приборов различного назначения. Данная работа представляет интерес как для оптического приборостроения, так и для совершенствования научной базы научных исследований оптических деталей различного назначения.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Внешний вид экспериментальной установки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Kirillovsky V.K. Diffraction reference wavefront laser interferometer // SPIE. The International Society for Optical Engineering Proceed. "Miniature and Microoptics: Fabrication and System Applications". 1992. Vol. 5 (1751). P. 197–200. DOI: 10.1117/12.138881
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. Колосийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
10. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. М.: НИУ ИТМО, 2014. 195 с.
11. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Уиверидзе 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://elibrary.ru/item.asp?id=17755116>
12. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Уиверидзе Л.А. Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих

- объектов // Приборы. 2012. № 7 (145). С. 23–25. URL: <https://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. 59–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17790990>
 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://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://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://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://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://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://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., Курлов В.В.)**
- Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург (Бородянский Ю.М.)**
- Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕвразЭС, Санкт-Петербург (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.)**
- Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики (Таюрская И.С.)**
- Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич, majorov_ee@mail.ru
- Материал поступил в редакцию 12.01.2023

INVESTIGATION OF OPTICAL SURFACES OF PLANE-CONVEX LENSES USING AN EXPERIMENTAL INTERFERENCE SETUP WITH A DIFFRACTED REFERENCE WAVEFRONT

E. E. Maiorov¹, Y. M. Borodyansky², R. B. Guliyev³,
A. V. Dagaev⁴, V. V. Kurlov¹, I. S. Tayurskaya⁵

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

²*The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, RF*

³*University at the EurAsEC inter-parliamentary Assembly, Saint Petersburg, RF*

⁴*Ivangorodskii Humanitarian-Technical Institute (branch of) State educational institution for higher professional education "Saint Petersburg University of Aerospace Instrumentation", Ivangorod, RF*

⁵*Saint Petersburg university of management technologies and economics, Saint Petersburg, RF*

The paper describes a layout of an experimental interferometric setup, the operation of which is based on the formation of a reference wavefront using a pinhole diaphragm. Optical devices and complexes built according to this scheme enable the carrying out of measurements on the surfaces of optical parts and elements intended for high-precision optics (interferometers for various purposes, interference microscopes, etc.), therefore, the work is promising and relevant. The paper presents an optical layout of the interferometer, as well as technical and operational characteristics of the experimental setup. The objects and the method of research are stated. Interferograms were obtained from the surfaces of plane-convex lenses made of K8 colorless optical glass, KH quartz glass (fused quartz SiO₂), and zinc selenide (ZnSe). The images of interference fields were analyzed, and the main parameters of wavefronts were revealed. Optical surfaces were controlled using an experimental setup with an accuracy of not worse than 0.01 λ . The reflectivity of the optical surfaces of the provided samples was investigated, and the dependences of the reflection coefficient along the x and y coordinates were obtained.

Keywords: accuracy, sensitivity, optical control, interference methods, flat-convex lenses, vibration resistance, micro lens

INTRODUCTION

Currently, great attention is paid to the methods and means of optical measurements in the development of optical and optoelectronic devices and complexes [1, 2]. These methods and tools play a crucial role in the control of optical parts. Their high accuracy and sensitivity ensure the reliability of measurements of the objects under study [3, 4]. The threshold sensitivity and accuracy of optical measurement methods are in the range of 1 μm to 0.01 μm [5, 6]. Using optical devices and systems together with modern computer technologies, it is possible to increase these parameters many times over. The analysis of scientific and technical literature showed that optical control proved its reliability, informational value, and clarity [7, 8]. Therefore, optical methods and means have found their application in the natural sciences and technical areas. Every day their role increases in technical, medical, biological, and chemical practices [9, 10].

Among the methods of optical control, methods of coherent optics, namely, interference methods are

predominant [11, 12]. Interference methods make it possible to solve problems of varying complexity: to study flat, spherical, and wedge-shaped surfaces of optical elements; obtain information about the deformation of objects with complex surface topography [13, 14]. The importance of interference methods is due to their capabilities. These methods make it possible to obtain information about statistical and dynamic processes, data about wavefronts at different time intervals, information about the surface of an object in qualitative and quantitative aspects, images in 3-D graphics [15, 16].

Interference methods for monitoring an optical surface and the operation of corresponding devices are based on the analysis of light emission reflected from the surface under study [17, 18]. The optical surfaces of products are in the shapes of spheres, planes, and inclined planes. The study of scientific and technical literature presented the following picture: when measuring optical surfaces, it is possible to use the shadow Foucault method, the Hartmann method, as well as the interferometric method using the Fizeau interferometer [19, 20].

In recent years, scientific works have appeared aimed at obtaining quantitative estimates of system errors based on test data using the shadow method, and in the Hartmann method they have learned to provide clarity and extract the value of aberrations in an aberration-corrected optical system using hartmannograms. As for the interference method, until now the control of the optical surface has been carried out by the Fizeau interferometer, because it has reduced sensitivity to vibrations, which was available in the two-beam Twyman interferometer [2, 21]. And another important note: the optoelectronic complexes produced, which include a Fizeau interferometer, are equipped with computers, a video output, and expensive software. However, their accuracy capabilities are limited by the need to use exemplary parts, which accuracy is inevitably limited and is at the level of $\lambda/20$ [2, 22].

Layouts of classical interferometers are based on the formation of a reference wavefront using exemplary optical surfaces (Twyman and Fizeau interferometers), which are still widely used to control optical surfaces. Today, there is a tendency to check elements of optical systems with the highest accuracy class. Among them are optical elements of modern research microscopes, microelectronics equipment, and optoelectronic devices for recording information [23, 24]. Requirements for the accuracy of calculation and implementation of these systems are at the level of $1/20$ – $1/30 \lambda$, where λ is the wavelength of optical emission. Thus, for control during their manufacture and use, there is a need for instruments that provide an accuracy of $1/100$ – $1/200 \lambda$, i.e., an order of magnitude more accurate than the classical ones [2, 25].

Therefore, it may be of interest to study the optical surfaces of plano-convex lenses used in the objectives of modern interference microscopes using an experimental interference setup with a diffracted reference wavefront.

The purpose of the work was to study the optical surfaces of plano-convex lenses with an experimental interference setup with a diffracted reference wavefront.

FORMULATION OF THE PROBLEM

In modern interference microscopes, microobjectives are one of the main elements. Plano-convex lenses are used in these micro lenses, and the quality of the lens surface determines the accuracy of measurements. In the last 10–12 years, microobjectives have been created on the basis of imported optical elements (biconvex, biconcave, plano-convex lenses, plane-parallel plates, etc.). Therefore, it was necessary to measure the optical surfaces of plano-convex lenses of domestic production, provided by LLC Zavod Opticheskikh Izdelij, within the framework of import substitution. The measurements were carried out on an

experimental optical-measuring setup built on the basis of a laser diffraction interferometer.

OBJECT AND METHOD OF STUDIES

Three types of plano-convex lenses were studied: colorless optical glass of the K8 brand, quartz glass of the KH brand (fused silica SiO_2), and zinc selenide (ZnSe). All samples had the same geometric dimensions: a diameter of 10 mm, an axial thickness of 3 mm, an edge thickness of 2 mm.

To check the optical surfaces of products of various shapes, automated systems and devices built on the basis of the Twyman or Fizeau interferometer [2, 20, 25] are used. This unique technology is easy to use and has low vibration resistance. These devices and complexes have one significant drawback — fatal residual errors in the reference wavefront of the standard, which occur during its manufacture. Automated interferometric complexes, built according to the classical scheme, and which operation is based on the analysis of light emission reflected from the controlled surface, are used in various optical industries to this day. In everyday practice, as a result of the long-term operation of these complexes, problems with measurements arose. For example, with a continuous control of the same sample at different times, there could be different readings. Apparently it is related to improper storage of the standards, and the complexes themselves, produced in 1973.

At present, modern automated interferometric systems based on a laser interferometer with a diffracted reference (standard) wavefront have been created and are being actively developed [2, 25]. The advantages of such a scheme implementation over the classical one are that they give the researcher convenience and ease in the operation of such a complex. In such a scheme solution, the physical reference sample is replaced by a diffracted reference wavefront, which means that the measurement accuracy increases significantly. The issue of residual errors in the reference wavefront in the standard and its limitation of accuracy during manufacture are removed.

Therefore, to control the optical surfaces of elements of high-precision optical devices and complexes, it is advisable to use a laser interference experimental setup with a diffracted reference wavefront.

The Appendix shows the appearance of the setup. The laser emission has a high coherence and can be focused into diameters ranging from 1 to 10 μm . In the experimental setup, a spherical wavefront was used as a standard, formed by the diffraction of converging rays on a hole diameter equal to 5 μm . The pinhole diaphragm is a polished metal plate with a 5 μm hole diameter. The aperture diameter served as a diffraction wave source. The addition of this wave (reference) to the wave reflected from the meas-

ured surface (object) is the result of interference. Fig. 1 shows the optical layout of a laser interference setup with a diffracted reference wavefront.

Fig. 1. Optical layout of a laser interference setup with a diffracted reference wavefront.

1 — laser; 2 — biconcave lens; 3 — micro objective; 4 — high polished metal plate; 5 — pin hole; 6 and 7 — counter collimator lenses; 8 — reference mirror; 9 — objective; 10 — Bertrand lens; 11 — eyepiece; 12 — camera

After passing through the negative component 2, light from a coherent source 1 (a ЛГ-79-1 He-Ne laser with $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ and $P = 15 \text{ mW}$) is focused by objective 3 into a pin hole 5 of an inclined, highly polished metal plate 4. The hole is aligned with the center of the spherical surface of the object under study 13. In the observation branch, there is a lens 9 and an eyepiece 11 for observing the illuminated pinhole and autocollimation image of a point in the center of the controlled surface. A Bertrand lens 10 is additionally introduced to observe the interference in the pupil. To record the interference pattern, a camera 12 is installed behind the eyepiece.

Technical and operational characteristics of the experimental setup:

- limiting instrumental error — $\lambda/100$;
- aperture of the controlled surfaces, no more — 0.25;
- numerical aperture of the objective — 0.2;
- limits of the movement of the interference heads along 3 axes, mm — ± 10 ;
- image receiver — camera Canon;
- light source — ЛГ-79-1 laser;
- emission wavelength, μm — 0.63;
- overall dimensions, mm — $750 \times 450 \times 550$.

EXPERIMENTAL RESULTS

Interferograms of the surfaces of the studied plano-convex lenses were sequentially obtained on the experimental setup: colorless optical glass of the K8 brand, quartz glass of the КИ brand (fused silica SiO_2) and zinc selenide (ZnSe). The interferograms were obtained on a diffraction interferometer using a wave diffracted by a hole with a diameter of $5 \mu\text{m}$, as a reference wavefront. Fig. 2 shows the experimental results. In order to reconstruct the wavefront phase and the surface topography, the computer program ZEBRA MathOPTIX for processing interferograms was used. The ZEBRA MathOPTIX program is an analogue of the interferometer software from leading companies such as Zygo, Veeco, and Møller-Wedel.

Fig. 2. Interferograms of optical surfaces of plano-convex lenses.

a — K8 lens; б — КИ lens; в — ZnSe lens

Interferograms are processed in several stages. First, two stages are performed: the stage of shallow spatial filtering to remove "garbage" from the interferogram and the stage of fringe identification — the placement of points along the fringes with the determination of the possible order of the basis of approximation of the controlled wavefront or surface. Further processing is based on a series of mathematical methods of function interpretation, the purpose of which is to obtain a reliable expansion of the wavefront or surface deviation in terms of Zernike polynomials. This determines such important values as the range (peak-to-valley, R) and root-mean-square deviation (RMS, σ) in micrometers.

Results:

- For K8 optical glass:
 $R = 0.191180 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.03025 \mu\text{m}$.
- For КИ quartz glass:
 $R = 0.152534 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.02925 \mu\text{m}$.
- For zinc selenide:
 $R = 0.102198 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.02113 \mu\text{m}$.

The convex surfaces of plano-convex lenses were controlled by an experimental setup with an accuracy of no worse than 0.01λ .

Studies have shown that the measured optical surfaces are of high quality. The use of these optical elements in the lenses of interference microscopes is expedient.

Measurements of the reflectivity of the surfaces under study were carried out on the presented experimental setup. The program Golden Software was used to perform these measurements. This program made it possible to obtain data on the dependence of the reflection coefficient on the displacement of the test sample along the x and y coordinates.

Fig. 3 shows the experimental data. The graphical dependences show that the distribution of the reflection coefficient had a smooth bell-shaped shape: neither shifts nor breaks were observed. This means that the optical surfaces are of high quality.

Fig. 3. Dependence of the reflection coefficient on the displacement of the samples under study.

a — along the x coordinate for 1 — K8 lenses, 2 — КИ lenses, 3 — ZnSe lenses;
б — along the y coordinate for 1 — K8 lenses, 2 — КИ lenses, 3 — ZnSe lenses

CONCLUSION

The obtained experimental results of measurements of the optical surfaces of the studied samples are significant, because these optical elements are intended to be used in lenses of high-precision optical complexes and devices for a variety of applications. This work is of interest for both optical instrumentation and improving the scientific base for research on optical parts for various purposes.

REFERENCES

- Born M., Wolf E. *Principles of optics*. Oxford, London, Edinburgh, New York, Paris, Frankfurt: Pergamon Press, 1968. 859 p. (Russ. Ed.: Born M., Vol'f Eh. *Osnovy optiki*. Translate S.N. Breus, A.I. Golovashkina, A.A. Shubina. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p.).
- Kirillovsky V.K. Diffraction reference wavefront laser interferometer. *SPIE. The International Society for Optical Engineering Proceed. "Miniature and Microoptics: Fabrication and System Applications"*, 1992, vol. 5 (1751), pp. 197–200. DOI: 10.1117/12.138881
- Landsberg G.S. *Optika* [Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 926 p. (In Russ.).
- Malacara D. *Optical Shop Testing*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, John Wiley and Sons. 862 p. (Russ. Ed.: Malakara D. *Opticheskii proizvodstvennyi kontrol'*. Translate E.V. Mazurova, A.N. Sosnov, T.V. Ushakova. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 340 p.).
- Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p. (In Russ.).
- Afanas'ev V.A. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 263 p. (In Russ.).
- Levin B.M. [Optical methods for determining the nature of the surface profile]. *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost'* [Soviet Journal of Optical Technology], 1938, no. 10-11, pp. 37–41. (In Russ.).
- Zakhar'evskii A.N. *Interferometriya* [Interferometers]. Moscow, Oborongiz Publ., 1952. 296 p. (In Russ.).
- Kolomiitsev Yu.V. *Interferometriya* [Interferometers]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 296 p. (In Russ.).
- Prokopenko V.T., Maiorov E.E. *Interferometriya diffuzno otrazhayushchikh objektov* [Interferometry of diffuse reflecting objects]. Moscow, NIU ITMO Publ., 2014. 195 p. (In Russ.).
- Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Dynamic parameters optimization for trigger type optical probe]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2012, no. 2 (78), pp. 13–16. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17755116>
- Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Calculation of scanning parameters of the interferometric system for controlling the shape of diffusively reflecting objects]. *Pribory* [Instruments], 2012, no. 7 (145), pp. 23–25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17910855> (In Russ.).
- Maiorov E.E., Mashek A.C., 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://elibrary.ru/item.asp?id=17790991> (In Russ.).
- 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. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23285864> (In Russ.).
- 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/mag/2013/abst2.php#abst5> (In Russ.).
- 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/mag/2013/abst3.php#abst10> (In Russ.).
- Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Coherent Speclogram Processing System for Examination of Dental Tissue Surfaces]. *Meditsinskaya tekhnika* [Biomedical Engineering], 2013, no. 6 (282), pp. 25–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21034782> (In Russ.).
- Maiorov E.E., Mashek A.C., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaidarov G.G., Chernyak T.A. [Development of a computer interference system for monitoring non-smooth surfaces]. *Pribory* [Instruments], 2015, no. 11 (185), pp. 26–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25340893> (In Russ.).
- Prokopenko V.T., Maiorov E.E., Mashek A.C., 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 zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2016, vol. 59, no. 5, pp. 388–394. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-388-394 (In Russ.).
- 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.).
- Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Mashek A.C., Tsygankova G.A., Kurlov A.V., Khokhlova M.V., Kirik D.I., Kapralov D.D. [Experimental study of metrological characteristics of an automated interferometric system for measuring the shape of the surface of diffusively reflecting objects]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique], 2017, no. 10, pp. 33–37. URL: <https://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 the Tula state university. Technical sciences], 2020, no. 8, pp. 179–189.
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44038077> (In Russ.).
23. Tsygankova G.A., Maiorov E.E., Chernyak T.A., Konstantinova A.A., Mashek A.C., Pisareva E.A. [Investigation of a developed cross-shear interferometer to adjust interference bands in interferogram processing]. *Pribory* [Instruments], 2021, no. 2, pp. 20–25.
URL: <https://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 O.V. [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 12.01.2023