

УДК 681.787

© Е. Е. Майоров, В. В. Курлов, А. В. Арефьев, В. П. Пушкина, 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ $\text{SiO}_2\text{--ZrO}_2\text{--P}_2\text{O}_5\text{--CaO}$ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

В работе рассмотрена возможность применения экспериментальной интерференционной установки с опорным волновым фронтом, сформированным путем дифракции лазерного пучка на микрометрическом отверстии, для контроля поверхности. Получение высокоточной и достоверной информации о геометрических параметрах поверхности объектов всегда являлось важной задачей метрологии, поэтому данная работа актуальна и перспективна. В работе определена цель и поставлена задача исследования. Приведены внешний вид и оптическая схема, а также описана работа схемы. Получены размах (peak-to-valley, R) и среднеквадратическое отклонение (RMS, σ) в микрометрах поверхности, а также распределение коэффициента отражения в двух направлениях по x и по y .

Ключевые слова: интерференционная установка, распределение коэффициента отражения, размах, точность измерений, среднеквадратическое отклонение, пленочный отражатель

EDN: QDSTDM

ВВЕДЕНИЕ

Научные исследования нуждаются в высокоточных, информативных и достоверных измерениях, роль которых с каждым днем стремительно растет, осуществляются современными интерференционными приборами и комплексами [1, 2]. Для решения ряда сложных задач измерения: контроль оптических поверхностей прецизионной оптики, микроканалов аналитических чипов; исследование поверхностей, полученных воздушно-капельным способом, и т.д. — эти методы и средства единственно возможны [3, 4]. Исследуя направления исследований интерференционных приборов и комплексов, можно с уверенностью констатировать, что область их применения значительно расширилась в связи с разработками новых источников света (полупроводниковых диодов, работающих на разных длинах волн и имеющих разные мощности), современных оптических элементов (микрообъективов ZnSe , кварцевого стекла K_2O , кристаллов LiF , отражательных элементов на основе $\text{SiO}_2\text{--H}_2\text{O--ZrO}_2$, $\text{SiO}_2\text{--ZrO}_2\text{--P}_2\text{O}_5\text{--CaO}$, светоделиителей и т.д.), программного обеспечения [5].

С развитием электроники и микроэлектроники, а также компьютерных технологий интерференционные измерения вышли на более высокий уровень. Повысилась чувствительность измерений, увеличился диапазон измерений величин, измерения стали более информативными, достоверными и надежными [6, 7]. Анализируя научно-

техническую литературу, исследователи отмечают тот факт, что отечественные автоматизированные интерферометрические комплексы и цифровые интерферометры практически исключили причины, снижающие контраст и искажения формы интерференционных полос [8, 9]. Несмотря на определенные успехи этих приборов и комплексов, остается рассмотрение инженерных вопросов их теории, таких как обоснование требований к оптическим и механическим блокам интерферометров различного назначения, к точности установки этих блоков в заданные положения, юстировки оптических систем и, конечно, выявление, прогнозирование источников погрешностей измерения [10, 11].

В научных работах за последние пять лет по интерференции света и ее применению приводится информация о цифровых интерферометрах (внешний вид) и полученных результатах, но не освещаются в полной мере упомянутые выше вопросы и соответственно нет достаточно полных ответов. Не приводятся упоминания о материале и технических характеристиках источников белого света, полупроводниковых светодиодах, работающих на разных длинах волн, иногда даже не приводятся оптические схемы приборов, а об отражательных элементах оптических схем информация малоинформативная или ее вообще нет.

Также ничего не говорится о возможностях интерференционных приборов и комплексов в сочетании с современными фотоцифровыми

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

устройствами и аппаратно-цифровыми блоками, новейшим программным обеспечением, позволяющим представлять результаты эксперимента в удобном виде для инженерных и научных работников, занятых эксплуатацией этих приборов.

В данной работе освещены вопросы исследования микрорельефа поверхности элемента оптической системы интерференционным методом [12, 13]. Для контроля высокополированного элемента это — единственный высокоточный прибор, который реагирует на сотые доли длины волны излучения.

Развитие интерференционного инструментария определило спрос на оптические системы и элементы нового поколения. В интерференционных приборах и комплексах стали применять новые схемные решения и материалы, которые позволили увеличить чувствительность и точность измерений на порядок по сравнению с классикой. У некоторых приборов и комплексов точность на уровне $1/100$ – $1/200 \lambda$; где λ — длина волны оптического излучения [14–19].

В настоящее время исследователи огромное внимание уделяют дифракционной интерферметрии. Поэтому может представлять интерес исследование поверхности пленочного отражателя на основе $\text{SiO}_2\text{--ZrO}_2\text{--P}_2\text{O}_5\text{--CaO}$ для опорной ветви интерферометра Майкельсона экспериментальным лазерным безэталоным интерферометром с опорным

волновым фронтом, сформированным путем дифракции лазерного пучка на микрометрическом отверстии.

Цель работы состояла в исследовании поверхности отражательной пленки, используемой в зеркале интерферометра экспериментальной дифракционной интерференционной установки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Провести измерения поверхности пленочного отражателя на основе пленки $\text{SiO}_2\text{--ZrO}_2\text{--P}_2\text{O}_5\text{--CaO}$, предоставленной одним из отечественных производителей оптических материалов, использованного в опорной ветви интерферометра Майкельсона. Измерения провести на экспериментальной дифракционной интерференционной установке.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовалась поверхность отражательной пленки на основе $\text{SiO}_2\text{--ZrO}_2\text{--P}_2\text{O}_5\text{--CaO}$. Образец имел следующие геометрические размеры: диаметр 5 мм, толщина по оси 500 мкм.

Для измерения поверхности использовалась лазерная экспериментальная дифракционная интерференционная установка для измерения гладких поверхностей объектов (рис. 1; Приложение, рис. П).

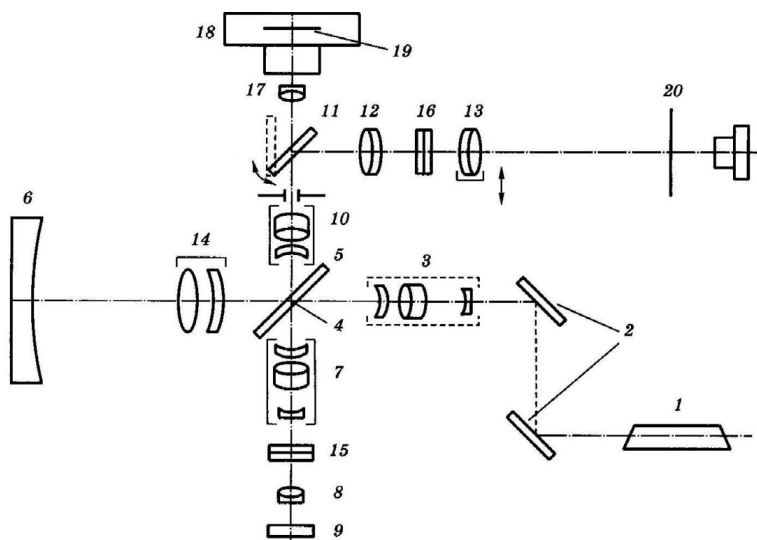


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки.

1 — источник излучения; 2 — зеркала; 3 — расширитель излучения; 4 — отверстие в зеркале; 5 — зеркало; 6 — объект; 7 — объектив коллиматора; 8 — линза; 9 — зеркало; 10 — объектив с диафрагмой; 11 — светоделитель; 12 — линза; 13 — линза Бертрона; 14 — окуляр; 15, 16 — поляризационные пластины; 17 — проекционная линза; 18 — фотокамера; 19 — плоскость регистрации; 20 — плоскость изображения

Установкой возможно проводить контроль поверхности вогнутых, выпуклых, плоских элементов высокоточных оптико-электронных систем и комплексов различного назначения. Информация о поверхности исследуемого образца извлекается с помощью специального программного обеспечения.

На рис. 1 приведена оптическая схема установки.

Излучение концентрируется на отверстии в зеркале. Световое пятно имеет диаметр 1 мкм. Далее формируется волновой фронт в объектном плече. В результате сложения этой волны с рабочей возникает интерференция в совмещенных световых пучках.

Технические характеристики:

- погрешность — $\lambda/50$;
- апертура поверхностей, не более — 0.1;
- апертура объектива — 0.1;
- пределы перемещения интерференционной головки по 3 осям, мм — ± 10 ;
- фотоприемный блок — фотокамера "Canon";
- источник когерентного света — лазер ЛГ-79-1;
- длина волны излучения, мкм — 0.63.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На экспериментальной установке была получена интерферограмма поверхности пленочного отражателя на основе $\text{SiO}_2\text{--ZrO}_2\text{--P}_2\text{O}_5\text{--CaO}$, используемого в отражающих зеркалах для опорной ветви интерферометра Майкельсона. Интерференционная картина, полученная от исследуемой поверхности, показана на рис. 2. Для восстановления микрорельефа поверхности использовалась компьютерная программа обработки записанной интерференции.

Для получения качественной интерференционной картины необходимо исключить помехи, правильно определить полосы и, применяя математический аппарат полиномов Цернике, получить достоверную картину отклонения волнового фронта или поверхности. Выявить размах (peak-to-valley, R) и среднеквадратическое отклонение (RMS, σ) в микрометрах.

Для отражающей пленки:

$$R = 0.83545 \text{ мкм}, \sigma = 0.10334 \text{ мкм}.$$

Экспериментальные результаты доказали, что пленочный отражатель на основе $\text{SiO}_2\text{--ZrO}_2\text{--P}_2\text{O}_5\text{--CaO}$ — высокого качества. И применение этих отражателей в зеркалах оптических систем двухлучевых, многолучевых интерферометрических приборов и комплексов перспективно и актуально.

Помимо определения качества поверхности исследуемого материала, в работе исследована от-

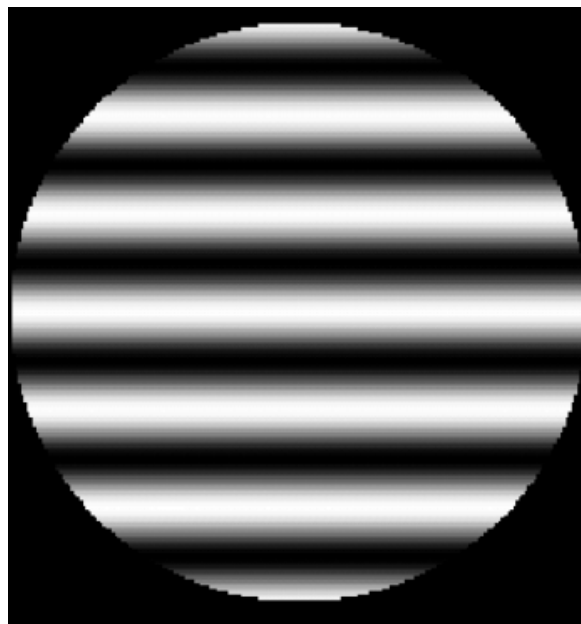


Рис. 2. Интерферограмма плоской поверхности отражательной пленки.

ражательная способность, где использовался другой пакет специализированных программ. Одна из программ позволяла извлечь информацию о коэффициенте отражения при движении исследуемой поверхности в направлении OX и OY . Поверхность с помощью микрометрического столика ориентировали по отношению к лазерному излучению по нормали, при этом измерялось расстояние до поверхности при перемещении объекта относительно зондирующего пятна.

Объект размещался на рабочей плоскости микрометрического столика, и движение осуществлялось с шагом 50 мкм, производилось 10 измерений по каждому направлению.

На рис. 3 показан эксперимент, где распределение коэффициента отражения находилось на уровне 99.6–99.9 %, ни провалов, ни всплесков не наблюдалось. А это означает, что отражательная поверхность высокого качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение разного программного обеспечения дало возможность выявить основные характеристики поверхности. Эксперимент важен, т.к. многие экспериментаторы представляют отражатели на других химических соединениях, предлагая их брать за основу.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

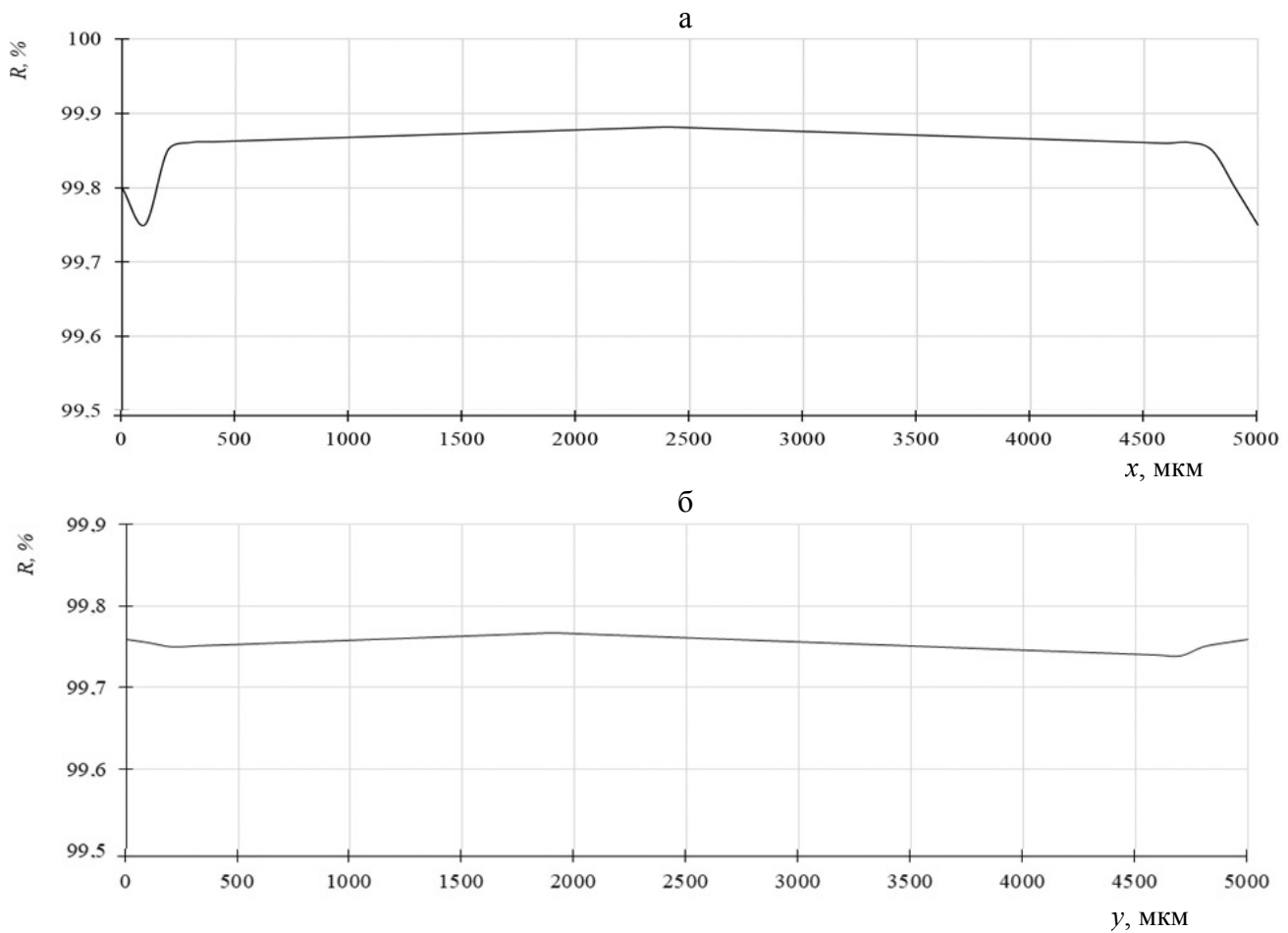


Рис. 3. Распределение коэффициента отражения.
а — по координате x ; б — по координате y

Полученные экспериментальные результаты измерений испытываемой поверхности показали, что данный материал не хуже представленных ранее.

Данная работа может заинтересовать производителей оптико-электронных приборов и комплексов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

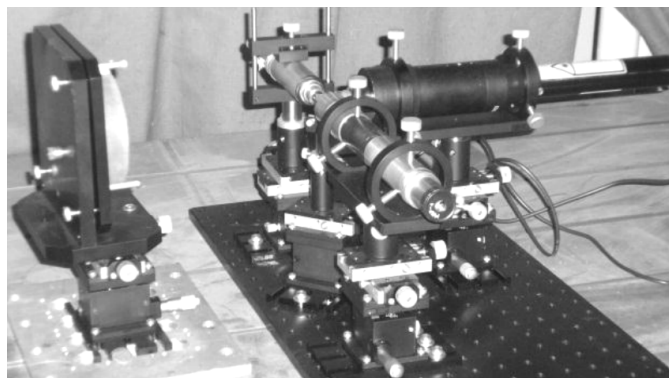


Рис. II. Внешний вид измерительной установки.

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. 1751. pp. 197–200. DOI: 10.1117/12.138881
3. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.В. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. Л.: Лениздат, 1987. 294 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. Духонел И.И., Федина Л.Г. Интерференционные методы и приборы для контроля правильности формы сферических поверхностей // ОМП. 1973. № 8. С. 50 – 55.
7. Захарьевский А.Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
8. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 295 с.
9. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 195 с.
10. 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://www.elibrary.ru/item.asp?id=17755116>
11. 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>
12. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1983. 231 с.
13. 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://opticjourn.ru/ru/abstract/2013-80-3-47-51>
14. 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>
15. 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>
16. 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>
17. 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
18. 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.izmt.ru/jour/article/view/1015>
19. Майоров Е.Е., Бородянский Ю.М., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В., Курлов В.В., Таюрская И.С. Исследование оптических поверхностей плосковыпуклых линз экспериментальной интерференционной установкой с дифрагированным опорным волновым фронтом // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, № 1. С. 43–53. URL: <http://iairas.ru/mag/2023/abst1.php#abst4>

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург

Контакты: Майоров Евгений Евгеньевич,
majorov_ee@mail.ru

Материал поступил в редакцию 17.09.2024

INVESTIGATION OF THE SURFACE OF A FILM REFLECTOR BASED ON $\text{SiO}_2\text{--ZrO}_2\text{--P}_2\text{O}_5\text{--CaO}$ FOR AN OPTICAL INTERFEROMETER SYSTEM

E. E. Maiorov, V. V. Kurlov, A. V. Arefiev, V. P. Pushkina

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

The paper considers the possibility of using an experimental interference installation with a reference wavefront formed by diffraction of a laser beam focused on a micrometer hole for surface control. Obtaining high-precision and reliable information about the geometric parameters of the surface of objects has always been an important task of metrology, therefore this work is relevant and promising. The paper defines the purpose and sets the task of the study. The appearance and optical scheme are given, as well as the operation of the scheme is described. The range (peak-to-valley, R) and standard deviation (RMS, σ) in micrometers of the surface, as well as the distribution of the reflection coefficient in two directions in x and y , are obtained.

Keywords: interference installation, reflection coefficient distribution, span, standard deviation, measurement accuracy, film reflector

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. UK, Pergamon Press, 1959. 852 p. (Russ. ed.: Born M., Vol'f Eh. *Osnovy optiki*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p.).
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. 1751, pp. 197–200. DOI: 10.1117/12.138881
3. Selivanov M.N., Fridman A.Eh., Kudryashova Zh.V. *Kachestvo izmerenii. Metrologicheskaya spravochnaya kniga* [Measurement quality. Metrological reference book]. Leningrad, Lenizdat Publ., 1987. 294 p. (In Russ.).
4. Malacara D. *Optical Shop Testing*. John Wiley and Sons. (Russ. ed.: Malakara D. *Opticheskii proizvodstvennyi kontrol'*. Translate A.N. Sosnov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 340 p.).
5. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p. (In Russ.).
6. Dukhopel I.I., Fedina L.G. [Interference methods and devices for control of the correctness of the spherical surfaces shape]. *OMP* [OMP], 1973, no. 8, pp. 50–55. (In Russ.).
7. Zakhar'evskii A.N. *Interferometry* [Interferometers]. Moscow, Oborongiz Publ., 1952. 296 p. (In Russ.).
8. Kolomiitsev Yu.V. *Interferometry* [Interferometers]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 295 p. (In Russ.).
9. Prokopenko V.T., Maiorov E.E. *Interferometriya diffuzno otrazhayushchikh objektov* [Interferometry of diffusely reflecting objects]. Saint-Petersburg, ITMO Publ., 2014. 195 p. (In Russ.).
10. 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://www.elibrary.ru/item.asp?id=17755116>
11. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. [Calculation of scanning parameters of the interferometric system for controlling the shape of diffusely reflecting objects]. *Pribory* [Instruments], 2012, no. 7 (145), pp. 23–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17910855> (In Russ.).
12. Ivanova T.A., Kirillovskii V.K. *Proektirovanie i kontrol' optiki mikroskopov* [Design and control of microscope optics]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 231 p. (In Russ.).
13. 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://opticjourn.ru/ru/abstract/2013-80-3-47-51> (In Russ.).
14. 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.).
15. 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.).
16. Maiorov E.E., Mashek A.C., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaidarov G.G., Chernyak T.A. [Development of computer interference system for control of nonsmooth surfaces]. *Pribory* [Instruments], 2015, no. 11 (185), pp. 26–31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25340893> (In Russ.).

17. Prokopenko V.T., Maiorov E.E., Mashek A.C., Udashkina S.V., Tsygankova G.A., Khaidarov G.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. 388–394. (In Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-388-394
18. 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 the automated interferometric system for measuring the surface shape of diffusely reflecting objects]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2017, no. 10, pp. 33–37. (In Russ.). URL: <https://www.izmt.ru/jour/article/view/1015>
19. Maiorov E.E., Borodyansky Y.M., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S. [Investigation of optical surfaces of plane-convex lenses using an experimental interference setup with a diffracted reference wavefront]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2023, vol. 33, no. 1, pp. 43–53. URL: <http://iairas.ru/mag/2023/abst1.php#abst4> (In Russ.).

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

Article received by the editorial office on 17.09.2024

INTRODUCTION

Scientific research requires highly accurate, informative, and reliable measurements, the role of which is growing rapidly every day, carried out by modern interference devices and complexes [1, 2]. To solve a number of complex measurement problems: control of optical surfaces of precision optics, microchannels of analytical chips; study of surfaces obtained by airborne transmission, etc. — these methods and means are the only possible ones [3, 4]. Exploring the research areas of interference devices and systems, we can confidently state that the scope of their application has expanded significantly due to the development of new light sources (semiconductor diodes operating at different wavelengths and having different powers), modern optical elements (ZnSe microlenses, KY quartz glass, LiF crystals, reflective elements based on $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O-ZrO}_2$, $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO}$, beam splitters, etc.), software [5].

Due to the development of electronics and microelectronics, as well as computer technologies, interference measurements have reached a higher level. The sensitivity of measurements and the range of measured values have increased, measurements have become more informative, reliable, and trustworthy [6, 7]. Analyzing scientific and technical literature, researchers note the fact that domestic automated interferometric complexes and digital interferometers have practically eliminated the causes that reduce contrast and distort the shape of interference fringes [8, 9]. Despite certain successes of these devices and complexes, there remains the consideration of engineering issues of their theory, such as the substantiation of requirements for optical and mechanical blocks of interferometers for various purposes, the accuracy of installing these blocks in specified positions, adjusting optical systems, and, of course, identifying and predicting sources of measurement errors [10, 11].

In scientific papers on light interference and its application over the past five years, information is provided on digital interferometers (appearance) and the results obtained, but the above-mentioned issues are not fully covered, and, accordingly, there are no sufficiently complete answers. There is no mention of the material and technical characteristics of white light sources, semiconductor LEDs operating at different wavelengths, sometimes even optical diagrams of devices are not given, and there is little or no information about the reflective elements of optical diagrams.

Also, nothing is said about the capabilities of interference devices and complexes in combination with modern photo-digital devices and hardware-digital units, the latest software that allows you to present the results of the experiment in a convenient form for engineering and scientific workers involved in the operation of these devices.

This work covers the issues of studying the micro-relief of the surface of an element of an optical system using the interference method [12, 13]. For monitoring a highly polished element, this is the only high-precision device that responds to hundredths of the radiation wavelength.

The development of interference instruments has determined the demand for new-generation optical systems and elements. New circuit solutions and materials have been used in interference devices and complexes and increased the sensitivity and accuracy of measurements by an order of magnitude compared to the classics. Some devices and complexes have an accuracy of $1/100\text{--}1/200\lambda$; where λ is the wavelength of optical radiation [14–19].

Researchers are currently paying great attention to diffraction interferometry. Therefore, it may be of interest to study the surface of a film reflector based on $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO}$ for the reference branch of a Michelson interferometer. The study is carried out using an experimental laser no-standard interferometer with a reference wave front formed by diffraction of a laser beam on a micrometer hole. The aim of the work was to study the surface of the reflective film used in the interferometer mirror using an experimental diffraction interference setup.

PROBLEM STATEMENT

To measure the surface of the film reflector based on the $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO}$ film provided by one of the domestic manufacturers of optical materials used in the reference arm of the Michelson interferometer. The measurements were carried out using an experimental diffraction interference setup.

STUDY OBJECT AND METHOD

The surface of the $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO}$ -based reflective film was examined. The sample had the following geometric dimensions: diameter 5 mm, thickness along the axis 500 microns.

To measure the surface, a laser experimental diffraction interference system was used to measure the smooth surfaces of objects (Appendix, Fig. II).

The installation can control the surface of concave, convex, and flat elements of high-precision optoelectronic systems and complexes for various purposes. Information about the surface of the test sample is extracted using special software.

Fig. 1 shows the optical layout of the unit. The radiation is concentrated on the hole in the mirror. The light spot has a diameter of $1\mu\text{m}$. Then a wave front is formed in the test arm. As a result of adding this wave to the working wave, interference occurs in the combined light beams.

Fig. 1. Optical scheme of the experimental installation.

1 — radiation source; 2 — mirrors; 3 — radiation expander; 4 — hole in the mirror; 5 — mirror; 6 — object; 7 — collimator lens; 8 — lens; 9 — mirror; 10 — lens with aperture; 11 — beam splitter; 12 — lens; 13 — Bertrand lens; 14 — eyepiece; 15, 16 are polarizing plates; 17 — projection lens; 18 — camera; 19 — recording plane; 20 — image plane

Specifications:

- error — $\lambda/50$;
- surface aperture, not more than — 0.1;
- lens aperture — 0.1;
- limits of interference head movement along 3 axes, mm — ± 10 ;
- photodetector unit — camera Canon;
- coherent light source — ЛЛ-79-1 laser;
- radiation wavelength, μm — 0.63.

EXPERIMENTAL RESULTS

The experimental setup was used to obtain an interferogram of the surface of a film reflector based on $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO}$ and used in reflective mirrors for the reference arm of the Michelson interferometer. The interference pattern obtained from the surface under study is shown in Fig. 2. A computer program for processing the recorded interference was used to reconstruct the surface microrelief.

Fig. 2. Interferogram of a flat surface of a reflective film

To obtain a high-quality interference pattern, it is necessary to eliminate interference, correctly determine the fringes, and, using the mathematical apparatus of Zernike polynomials, obtain a reliable picture of the deviation of the wave front or surface. Determine the peak-to-valley (R) and root mean square (RMS, σ) in micrometers.

For reflective film:

$$R = 0.83545 \mu\text{m}, \sigma = 0.10334 \mu\text{m}.$$

The experimental results have proven that the film reflector based on $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO}$ is of high quality. The use of these reflectors in mirrors of optical systems of double-beam, multi-beam interferometric devices and complexes is promising and relevant.

In addition to determining the surface quality of the material under study, the reflectivity was investigated in the work, and another package of specialized programs was used. One of the programs enabled the extraction of information on the reflection coefficient when moving the surface under study in the OX and OY directions. The surface was oriented along the normal with respect to the laser radiation using a micrometer table, while the distance to the surface was measured when the object was moved relative to the probing spot.

The object was placed on the working plane of the micrometer table, and the movement was carried out with a step of $50 \mu\text{m}$, 10 measurements were made in each direction.

Fig. 3 shows an experiment where the distribution of the reflection coefficient was at the level of 99.6–99.9%, no dips or spikes were observed. This means that the reflective surface is of high quality.

Fig. 3. Reflection distribution.
a — by x coordinate; $\bar{\sigma}$ — by y coordinate

CONCLUSION

The use of different software made it possible to identify the main characteristics of the surface. The experiment is important since many experimenters present reflectors based on other chemical compounds and suggest taking them as a basis. The obtained experimental results of measurements of the tested surface showed that this material is not worse than those presented earlier. This work may be of interest to manufacturers of optical-electronic devices and complexes.

APPENDIX

Fig. II. Appearance of the measuring setup