

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МИКРОСКАНИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СТЕКЛЯННЫХ ПЛАСТИНОК ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Е. Е. МАЙОРОВ^{1*}, Ю. М. БОРОДИНСКИЙ², В. В. КУРЛОВ¹,
И. С. ТАЮРСКАЯ³, В. П. ПУШКИНА¹, Р. Б. ГУЛИЕВ⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия,
*majorov_ee@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕвразЭС, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследованы плоскопараллельные стеклянные пластинки для пространственного микросканирования поверхности интерференционным методом. Необходимость контроля качества оптических поверхностей для высокоточных оптических приборов и систем определяет актуальность работы. Представлен внешний вид интерферометра, приведены оптическая схема и технические характеристики прибора. В результате экспериментальных измерений получены интерферограммы поверхностей оптических плоскопараллельных пластинок с погрешностью не более $0,05\lambda$. Получены зависимости коэффициента отражения от продольного и поперечного смещения поверхности. Графические зависимости показали, что все поверхности исследуемых образцов имели равномерные распределения в области от $K = 19$ до $20,2\%$.

Ключевые слова: интерферограмма, оптическая поверхность, интерферометр Физо, коэффициент отражения, полином Цернике, размах, клиновидная пластина

Ссылка для цитирования: Майоров Е. Е., Бородинский Ю. М., Курлов В. В., Таюрская И. С., Пушкина В. П., Гулиев Р. Б. Пространственное микросканирование поверхности плоскопараллельных стеклянных пластинок интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 688—695. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695.

SPATIAL MICRO-SCANNING OF PLANE-PARALLEL GLASS PLATE SURFACE BY THE INTERFERENCE METHOD

E. E. Maierov^{1*}, Yu. M. Borodyansky², V. V. Kurlov¹,
I. S. Tayurskaya³, V. P. Pushkina¹, R. B. Guliyev⁴

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia,
*majorov_ee@mail.ru

² The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, Russia

³ St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, St. Petersburg, Russia

⁴ University under the Inter-Parliamentary Assembly of EurAsEC, St. Petersburg, Russia

Abstract. Plane-parallel glass plates for spatial micro-scanning of the surface by the interference method are studied. The need to control the quality of optical surfaces for high-precision optical instruments and systems determines the relevance of the work. The appearance of the interferometer is presented, the optical scheme and technical characteristics of the device are given. As a result of experimental measurements, interferograms of the surfaces of optical plane-parallel plates are obtained with an error of no more than 0.05λ . The dependences of the reflection coefficient on the longitudinal and transverse displacements of the surface are obtained. Graphic dependences shows that all surfaces of the studied samples have uniform distributions in the range from $K = 19$ – 20.2% .

Keywords: interferogram, optical surface, Fizeau interferometer, reflection coefficient, Zernike polynomial, span, wedge-shaped plate

For citation: Maierov E. E., Borodyansky Yu. M., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S., Pushkina V. P., Guliyev R. B. Spatial micro-scanning of plane-parallel glass plate surface by the interference method. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 8. P. 688—695 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695.

Введение. Одной из важнейших задач метрологии является получение высокоточных, информативных и достоверных данных о геометрических параметрах поверхности объекта [1, 2]. Решая эту задачу, многие исследователи опираются на контактные и бесконтактные методы и технические средства [3, 4].

В применении контактных методов и средств (микрометры, механические щупы различного назначения и т.д.) экспериментаторы сталкиваются с низкой производительностью, а порой не могут добиться необходимой виброзащиты для проведения измерений [5, 6]. Поэтому на применение контактных методов накладываются определенные ограничения по классу исследуемых поверхностей объектов [7, 8]. Перечисленные недостатки контактных методов устраняются использованием бесконтактных методов и средств. Ведущее место среди них занимают оптические и оптико-электронные приборы и комплексы [9, 10].

Современные тенденции развития оптико-электронных приборов и комплексов определяют новые требования к показателям качества выпускаемой оптической промышленностью продукции [11, 12]. Улучшение конструкции этих приборов позволяет обеспечить функциональную точность изделий, которая является основным показателем качества [13, 14].

В оптическом приборостроении плоскопараллельные стеклянные пластинки применяются в качестве защитных стекол, светофильтров, оптических сеток, а также вспомогательных элементов микросканирования зондирующим световым лучом измеряемой поверхности объекта [15, 16]. Для пространственного микросканирования зондирующим лучом плоскопараллельную пластинку устанавливают между источником излучения и объективом. При этом пластинка совершает угловые колебания. В результате при контроле поверхности разной шероховатости данный оптический элемент обеспечивает независимые измерения продольной структуры поверхности объекта.

Для контроля плоскостности оптических поверхностей, а также для измерения концевых мер преимущественно применяют интерферометр Физо [17, 18] — разновидность многолучевых интерферометров, в котором интерференция происходит в воздушном зазоре между двумя отражающими поверхностями [19, 20].

Анализ литературных данных показал, что наиболее универсальным методом контроля плоскостности объектов является бесконтактный метод измерений с применением интерферометра Физо, так как он исключает основной недостаток метода пробных стекол — контакт материалов эталонной и исследуемой поверхностей [21, 22].

Поэтому может представлять интерес исследование оптических поверхностей плоскопараллельных стеклянных пластинок для пространственного микросканирования поверхностей различной формы. 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 настоящей работы явилось исследование оптических плоских поверхностей плоскопараллельных стеклянных пластинок интерференционным методом.

Постановка задачи. Плоскопараллельные стеклянные пластинки являются одним из основных оптических элементов высокоточных оптических и оптико-электронных приборов и комплексов. И от плоскостности оптической поверхности плоскопараллельной стеклянной пластинки зависят достоверность, информативность и точность измерений. Поэтому задача

настоящей работы — сравнительный анализ плоскостности оптических поверхностей плоскопараллельных пластинок, изготовленных из бромида калия (KBr), фторида магния (MgF_2) и фторида лития (LiF).

Метод и объект исследования. Объектом исследования выступали плоскопараллельные стеклянные пластинки одинаковой толщины ($s = 0,25$ мм), длины ($l = 2$ см) и ширины ($b = 1$ см).

Оптическая плоскопараллельная пластинка, изготовленная из KBr, имеет спектральный диапазон пропускания от 230 до 28 000 нм; может применяться от дальней ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области благодаря высокой прозрачности. Данный материал выращивается методом Кирополуса, он гигроскопичен и потому должен хорошо защищаться от влажности.

Оптическая плоскопараллельная пластинка, изготовленная из MgF_2 , имеет спектральный диапазон пропускания от 110 до 7500 нм; может применяться от дальней ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области, материал твердый, устойчивый к нагрузкам, из которого делают прочную оптику. Данный материал выращивается методом Стокбаргера.

Оптическая плоскопараллельная пластинка, изготовленная из LiF, имеет спектральный диапазон пропускания от 110 до 7000 нм; может применяться от дальней ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области. Кристаллы выращиваются двумя методами в зависимости от назначения продукции: методом Стокбаргера и методом Кирополуса.

Исследуемые материалы были предоставлены ООО „Завод оптических изделий“ (Санкт-Петербург). Для измерений использовался интерферометр Физо, внешний вид которого приведен на рис. 1.

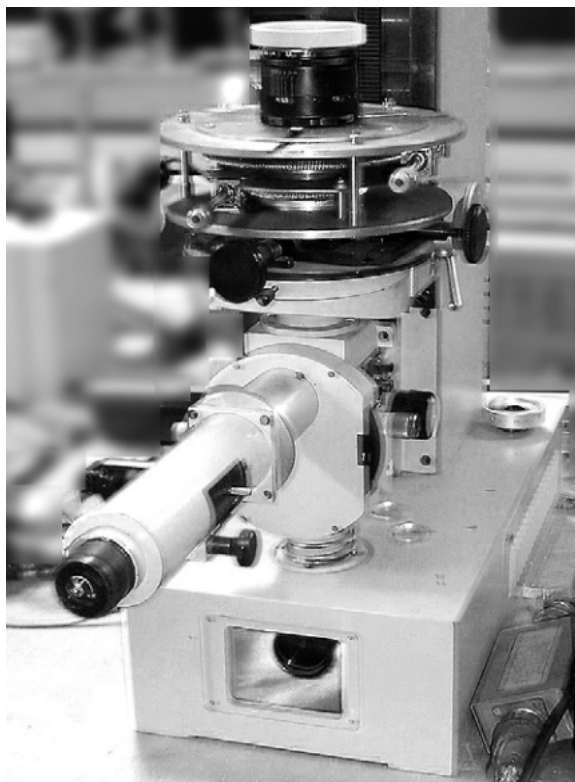


Рис. 1

Для измерений плоских поверхностей объектов применяют интерферометр Физо. В этом приборе объектный канал, в котором находится исследуемая поверхность, совмещается с опорным каналом, где расположена образцовая (эталонная) поверхность, формирующая опорный волновой фронт. Такая схема работает благодаря проходящему через эталонную поверхность свету.

На рис. 2 приведена оптическая схема интерферометра Физо. В качестве эталонной используется фронтальная поверхность клиновидной пластины, выполненная с образцовой точностью на уровне $1/20 \lambda$ (1 — источник когерентного излучения; 2 — микрообъектив; 3 — светоделитель; 4 — коллимирующий объектив; 5 — клиновидная пластина с эталонной поверхностью; 6 — контролируемая поверхность образца; 7 — плоскость наблюдения).

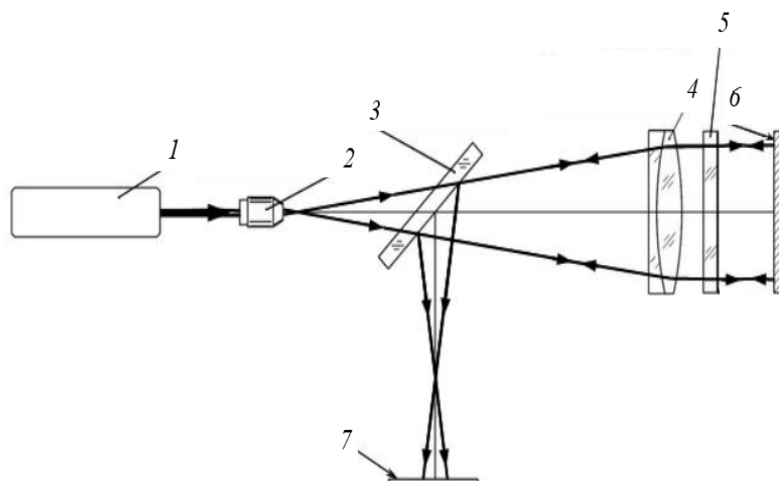


Рис. 2

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 повышает однородность светового пучка. Далее световой пучок преобразуется в расходящийся, который после светоделителя 3 объективом 4 преобразуется в коллимирующий. Параллельный пучок лучей, вышедший из объектива 4, отражается от верхней плоскости поверхности контролирующего 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 трем осям — ± 10 мм;
- приемники изображения — фотокамера Зенит и цифровая камера TourCam;
- источник света — лазер ЛГ-79-1;
- длина волны излучения — 0,63 мкм;
- габаритные размеры — 700×350×520 мм;
- масса — 60 кг.

Экспериментальные результаты. В результате экспериментов получены интерферограммы поверхностей оптических плоскопараллельных пластинок. На рис. 3 приведены результаты съемок (а — пластинка из KBr; б — MgF_2 ; в — LiF). В процессе измерений необходимо было получить информацию о деформации исследуемых волновых фронтов оптических плоскопараллельных пластинок [23, 24]. Полученные интерферограммы были обработаны компьютерной программой Master Zebra. Изображения интерферограмм были преобразованы в графический формат файлов (tiff). Программой была проведена аппроксимация функции деформации волнового фронта по полиномам Цернике, после чего программа выводила на дисплей основные параметры деформации: размах (S), максимум (Max), минимум (Min) и среднее квадратичное отклонение (σ).

Для оптической плоскопараллельной пластинки, изготовленной из KBr: $S = 0,119261$ мкм, $\text{Max} = 0,071621$ мкм, $\text{Min} = 0,029273$ мкм, $\sigma = 0,029492$ мкм.

Для пластинки, изготовленной из MgF_2 : $S = 0,101891$ мкм, $\text{Max} = 0,049362$ мкм, $\text{Min} = 0,021783$ мкм, $\sigma = 0,021121$ мкм. Для пластинки, изготовленной из LiF: $S = 0,113219$ мкм, $\text{Max} = 0,053912$ мкм, $\text{Min} = 0,025172$ мкм, $\sigma = 0,023711$ мкм.

Плоские поверхности были измерены с погрешностью не более $0,05\lambda$.

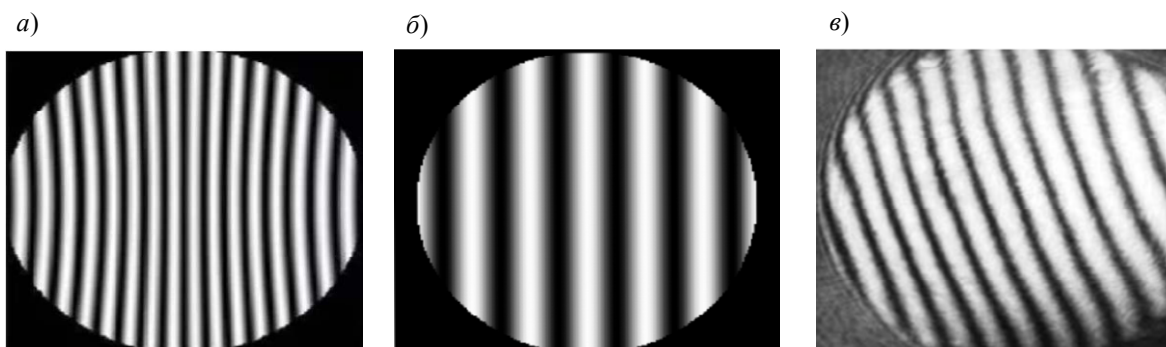


Рис. 3

На интерферограммах поверхностей (рис. 3) отсутствует какая-либо сферичность, т.е. аберраций нет, а значит, поверхность высокого качества. Само интерференционное изображение высокого качества и чистоты поверхности, шумы отсутствуют. Компьютерная программа Master Zebra обеспечивает высокую надежность опознавания и измерения координат интерференционных полос, стабильную повторяемость выходных числовых величин, что является гарантией достоверности и точности экспериментальных данных. Анализ карт и профилей деформаций волновых фронтов подтверждает высокое качество поверхностей.

В работе проведены исследования с применением компьютерной программы Interferometer, которая позволила получить данные о коэффициенте отражения при смещении поверхности объекта по координатам x и y . На рис. 4 приведены зависимости коэффициента отражения от продольного и поперечного смещения поверхности исследуемого образца (a — по оси x : 1 — пластинка KBr; 2 — MgF_2 ; 3 — LiF; b — по оси y : 1 — пластинка KBr; 2 — MgF_2 ; 3 — LiF). Согласно графическим зависимостям, все поверхности исследуемых образцов имеют равномерные распределения в области $K = 19\text{—}20,2\%$.

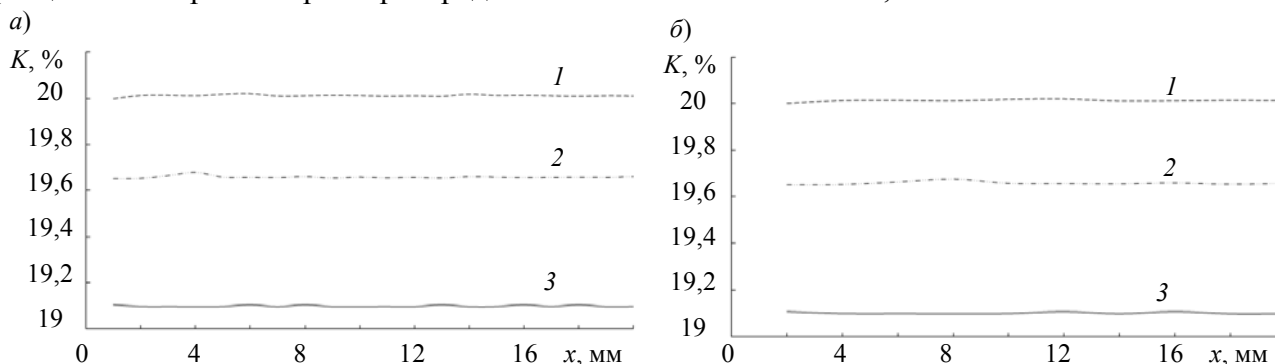


Рис. 4

Незначительность „деформаций“ кривых распределения доказывает высокое качество выращенных кристаллов, следовательно, они могут использоваться в разных оптических изделиях.

Заключение. В работе проведен сравнительный анализ плоскостности оптических поверхностей плоскопараллельных пластинок, изготовленных из следующих материалов: бромид калия (KBr), фторид магния (MgF_2) и фторид лития (LiF). Исследования доказали, что измеренные поверхности плоскопараллельных пластинок удовлетворяют требованиям опти-

ческого контроля и могут применяться в оптических и оптико-электронных приборах и комплексах. Данное исследование представляет интерес для оптического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малакара Д. Оптический производственный контроль / Пер. с англ. под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
2. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пурыев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
3. Левин Б. М. Оптические методы определения характера профиля поверхностей // ОМП. 1938. № 10—11. С. 37—41.
4. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
5. Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. М.: НИУ ИТМО, 2014. 195 с.
6. 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.
7. 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.
8. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Прокопенко В. Т., Чистякова Н. Я. Исследование метрологических характеристик измерительной оптико-механической головки // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 7. С. 59—65.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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 // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 388—394.
15. 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.
16. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Курлов А. В., Хохлова М. В., Кирик Д. И., Капралов Д. Д. Экспериментальное исследование метрологических характеристик автоматизированной интерферометрической системы измерения формы поверхности диффузно отражающих объектов // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 33—37.
17. 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 // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 179—189.
18. 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.

19. 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: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.015>.
20. 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: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.029>.
21. Арефьев А. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Сорокин А. А., Удахина С. В. Исследование разработанного интерференционного зонда для измерения неровностей реальных поверхностей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 2. С. 1—6. DOI: 10.25791/pribor.2.2022.1319.
22. Майоров Е. Е., Коцкович В. Б., Пушкина В. П., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В. Исследование оптических плоских поверхностей светоделительных пластин средством когерентной оптики // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 2. С. 65—74.
23. Бородянский Ю. М., Майоров Е. Е., Петрова Е. А., Попова Е. В., Курлов В. В., Удахина С. В. Измерение геометрических параметров поверхностей сложной формы низкокогерентной оптической системой // Приборы. 2022. № 5(263). С. 3—7.
24. Майоров Е. Е. Исследование разработанной измерительной системы на основе двухлучевой интерферометрии // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Третья Всерос. науч. конф. (СПб, 18—22 апреля 2022 г.). СПб: ГУАП, 2022. С. 52—55. DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3.

Сведения об авторах

- | | |
|------------------------------------|--|
| Евгений Евгеньевич Майоров | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru |
| Юрий Михайлович Бородянский | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, кафедра безопасности информационных систем; E-mail: borodyanskyum@gmail.com |
| Виктор Валентинович Курлов | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; E-mail: vitek543@rambler.ru |
| Ирина Соломоновна Таюрская | — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики, E-mail: tis_ivesep@mail.ru |
| Вера Павловна Пушкина | — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра высшей математики и механики, E-mail: vera150465@yandex.ru |
| Рамиз Балахан оглы Гулиев | — канд. техн. наук, доцент; Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕвразЭС, кафедра математики и информационных технологий, E-mail: ramiz63@yandex.ru |

Поступила в редакцию 05.12.22; одобрена после рецензирования 09.01.23; принята к публикации 22.06.23.

REFERENCES

1. Malacara D. *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, 2007, 888 p.
2. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1987, 264 p. (in Russ.)
3. Levin B.M. *Soviet Journal of Optical Technology*, 1938, no. 10-11, pp. 37—41 (in Russ.)
4. Kolomiitsev Yu.V. *Interferometry* (Interferometers), Leningrad, 1976, 296 p. (in Russ.)
5. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Interferometriya diffuzno otrazhayushchikh ob"yektov* (Interferometry of Diffusely Reflecting Objects), St. Petersburg, 2014, 195 p. (in Russ.)
6. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 2(78), pp. 13—16. (in Russ.)
7. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Instruments*, 2012, no. 7(145), pp. 23—25. (in Russ.)
8. Maiorov E.E., Mashek A.Ch., Prokopenko V.T., Chistyakova N.Ya. *Journal of Instrument Engineering*, 2012, no. 7(55), pp. 59—65. (in Russ.)

9. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Sherstobitova A.S. *Journal of Optical Technology*, 2013, no. 3 (80), pp. 162–165.
10. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2013, no. 2(23), pp. 38–46. (in Russ.)
11. Majorov E.E., Prokopenko V.T. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2013, no. 3(23), pp. 76–81. (in Russ.)
12. Maiorov E.E., Prokopenko V.T., Ushveridze L.A. *Biomedical Engineering*, 2013, no. 6(282), pp. 25–27. (in Russ.)
13. Majorov E.E., Mashek A.Ch., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaydarov G.G., Chernyak T.A. *Instruments*, 2015, no. 11(185), pp. 26–31. (in Russ.)
14. Prokopenko V.T., Majorov E.E., Mashek A.Ch., Udakhina S.V., Tsygankova G.A., Khaydarov G.G., Chernyak T.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 5(59), pp. 388–394. (in Russ.)
15. Majorov E.E., Dagaev A.V., Ponomarev S.V., Chernyak T.A. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2017, no. 2(27), pp. 32–40. (in Russ.)
16. Mayorov E.E., Prokopenko V.T., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Kurlov A.V., Khokhlova M.V., Kirik D.I., Kapralov D.D. *Measurement Techniques*, 2017, no. 10, pp. 33–37. (in Russ.)
17. Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Maiorov E.E., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2020, no. 8, pp. 179–189. (in Russ.)
18. Tsygankova G.A., Maiorov E.E., Chernyak T.A., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A. *Instruments*, 2021, no. 2, pp. 20–25 (in Russ.)
19. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Mayorov E.E., Arefyev A.V., Guliev R.B., Gromov O.V. *Meždunarodnyj naučnoissledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 8(110), pp. 103–108, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.015>. (in Russ.)
20. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Arefyev A.V., Guliev R.B., Mayorov E.E., Gromov O.V. *Meždunarodnyj naučnoissledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 6(108), pp. 184–189, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.029>. (in Russ.)
21. Arefyev A.V., Kotskovich V.B., Maiorov E.E., Pushkina V.P., Sorokin A.A., Udakhina S.V. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2022, no. 2, pp. 1–6, DOI: 10.25791/pribor.2.2022.1319 (in Russ.)
22. Maiorov E.E., Kotskovich V.B., Pushkina V.P., Arefyev A.V., Guliev R.B., Dagaev A.V. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2022, no. 2(32), pp. 65–74. (in Russ.)
23. Borodyansky Yu.M., Maiorov E.E., Petrova E.A., Popova E.V., Kurlov V.V., Udakhina S.V. *Instruments*, 2022, no. 5(263), pp. 3–7. (in Russ.)
24. Maiorov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Control of Complex Systems), Collection of reports of the Third All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2022, pp. 52–55, DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|-----------------------------------|---|
| Evgeny E. Maiorov | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: maiorov_ee@mail.ru |
| Yury M. Borodyansky | — PhD, Associate Professor; The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, Department of Information Systems Security; E-mail: borodyanskyum@gmail.com |
| Viktor V. Kurlov | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; E-mail: vitek543@rambler.ru |
| Irina S. Tayurskaya | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technology and Mathematics; E-mail: tis_ivesep@mail.ru |
| Vera P. Pushkina | — PhD, Associate Professor; Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics; E-mail: vera150465@yandex.ru |
| Ramiz Balahan oglu Guliyev | — PhD, Associate Professor; University at the EurAsEC inter-parliamentary Assembly, Department of Mathematics and Information Technologies; E-mail: ramiz63@yandex.ru |

Received 05.12.22; approved after reviewing 09.01.23; accepted for publication 22.06.23.