

ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫПУКЛЫХ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Д.Т. Пуряев, Н.Н. Кулакова, Л.И. Бурмак

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: nnkulakova@gmail.com

Рассмотрен контроль выпуклых гиперболических поверхностей малого диаметра на лазерном интерферометре Физо и указана область их применения. Приведены обзор существующих методов контроля таких асферических поверхностей, основные зависимости, описывающие положение оптических элементов в схеме интерферометра, а также аберрационные соотношения. Проведен аберрационный расчет рабочей ветви интерферометра. На основании этого расчета представлены результаты исследования диапазонов эксцентриситетов и радиусов кривизны при вершине контролируемых гиперболических отражающих поверхностей и соответствующей этим диапазонам точности контроля. Предложена усовершенствованная схема интерферометра с регистрационной ветвью.

Ключевые слова: интерферометр Физо, выпуклое гиперболическое зеркало, контроль качества оптической поверхности, волновая аберрация.

INTERFEROMETER TO CONTROL CONVEX HYPERBOLIC SURFACES OF SMALL DIAMETER

D.T. Puryaev, N.N. Kulakova, L.I. Burmak

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: nnkulakova@gmail.com

Control of small diameter convex hyperbolic surfaces on Fizeau interferometer is analyzed, and the field of these surfaces application is specified. Survey of existing methods to control such aspherical surfaces, principal dependencies describing optical element positions into the interferometer, and aberration relationships, are presented. Aberration analysis for operating branch of interferometer is performed. Further, investigation results are presented for eccentricity ranges and radii of curvature at the apex of controlled hyperbolic reflecting surfaces, and for the control precision corresponding to those ranges. Modified layout of interferometer with the registration branch is proposed.

Keywords: Fizeau interferometer, convex hyperbolic mirror, control of optical surface quality, wave aberration.

Оптические элементы с выпуклыми гиперболическими поверхностями находят широкое применение в медицинских оптических приборах, объективах специального назначения, астрономической оптике и других системах. Качество этих асферических поверхностей (АП) всегда определяет качество прибора. Под качеством поверхности понимают соответствие изготовленной поверхности ее теоретической форме. Для высокоточных оптических поверхностей допустимое отклонение действительной формы поверхности от ее теоретического вида исчисляется долями длины волны света. Известны следующие методы

контроля таких поверхностей [1, 4–12]: метод пробных стекол; компенсационный метод; метод анаберрационных точек.

Метод пробных стекол не получил широкого распространения; его недостатками являются контактность и сложность изготовления асферического пробного стекла. В отличие от метода пробных стекол, компенсационный метод весьма распространен. Однако в некоторых задачах его применение не целесообразно. Это обусловлено индивидуальностью компенсатора и тем, что размеры последнего соизмеримы, либо превосходят размеры контролируемой поверхности.

Разработка высокоточного метода контроля, свободного от перечисленных выше недостатков, является актуальной задачей. В настоящей работе рассмотрена схема интерферометра для контроля качества отражающих выпуклых гиперболических поверхностей с местной погрешностью формы 0,05 и более длины волны методом анаберрационных точек. Указанный метод основан на использовании свойства геометрических фокусов отражающих АП второго порядка, являющихся парой оптически сопряженных анаберрационных точек. Идея метода заключается в применении расположенной между фокусами гиперболической поверхности плоскопараллельной пластины для создания рабочего и эталонного волновых фронтов. Схема интерферометра впервые была предложена в работе [1]. Однако в этой работе не было проведено исследование диапазона контролируемых поверхностей в соответствии с заданным требованием к их точности. Цель настоящей работы – оценка возможностей интерферометра – исследование диапазона радиусов и эксцентриситетов контролируемых поверхностей и соответствующей этим диапазонам точности контроля.

Описание интерферометра. Принципиальная схема интерферометра Физо представлена на рис. 1. В основу его действия положены свойства когерентности и монохроматичности лазерного излучения.

Для пояснения принципа работы интерферометра предположим, что полупрозрачная плоскопараллельная пластина 4, установленная перпендикулярно линии, соединяющей геометрические фокусы F_1 и F_2 контролируемой гиперболической поверхности, – бесконечно тонкая. Пусть расстояние от геометрических фокусов до пластины одинаковы, а фокус микрообъектива 2 совмещен с фокусом F_1 . Числовая апертура микрообъектива выбирается по апертурному углу σ_1 в фокусе F_1 . Лучи, отраженные от пластины, создают эталонный сферический волновой фронт. Лучи, прошедшие через пластину, отражаются от контролируемой АП и вторично проходят через пластину, формируя рабочий волновой фронт. Последний будет сферическим, если контролируемая поверхность и пластина имеют идеальную форму. Центры кривизны эталонного и рабочего волновых фронтов совмещены, поэтому на экране 3 должно наблюдаться равномерно освещенное интерференционное поле.

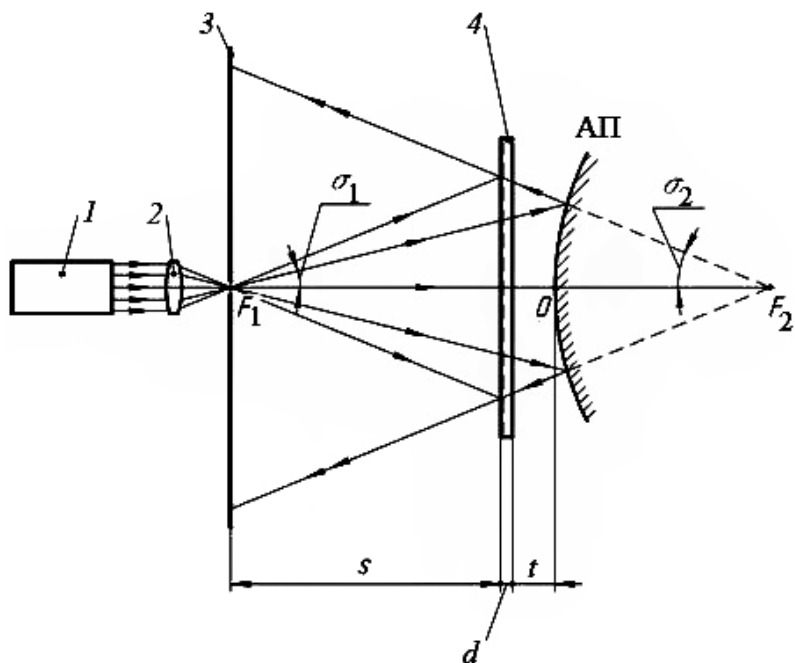


Рис. 1. Принципиальная схема интерферометра для контроля выпуклых гиперболических отражающих поверхностей:

1 — лазер; 2 — микрообъектив; 3 — экран; 4 — полупрозрачная плоскопараллельная пластина

Небольшие наклоны пластины или смещение ее в продольном направлении приведут к образованию интерференционных полос или колец, по виду которых можно сделать вывод о качестве контролируемой поверхности. Интерферометр наиболее удобен для контроля поверхностей с небольшими диаметрами и малыми апертурами.

Основные соотношения для габаритного и абберационного расчета ветвей интерферометра. Найдем расстояния s и t (см. рис. 1), определяющие положение плоскопараллельной пластины относительно фокуса микрообъектива и контролируемой АП для случая, когда полупрозрачное покрытие нанесено на первой поверхности пластины. В реальной схеме интерферометра пластина имеет конечную толщину d . Прошедшие через пластину лучи (рис. 2) оказываются смещенными вдоль оптической оси на величину Δ . Для параксиального луча эта величина определяется по формуле [2]

$$\Delta = \frac{n-1}{n}d, \quad (1)$$

где n — показатель преломления стекла пластины.

Расстояния от вершины (точка O на рис. 2) выпуклой гиперболической поверхности до геометрических фокусов F_1 и F_2 находятся по формулам [1]:

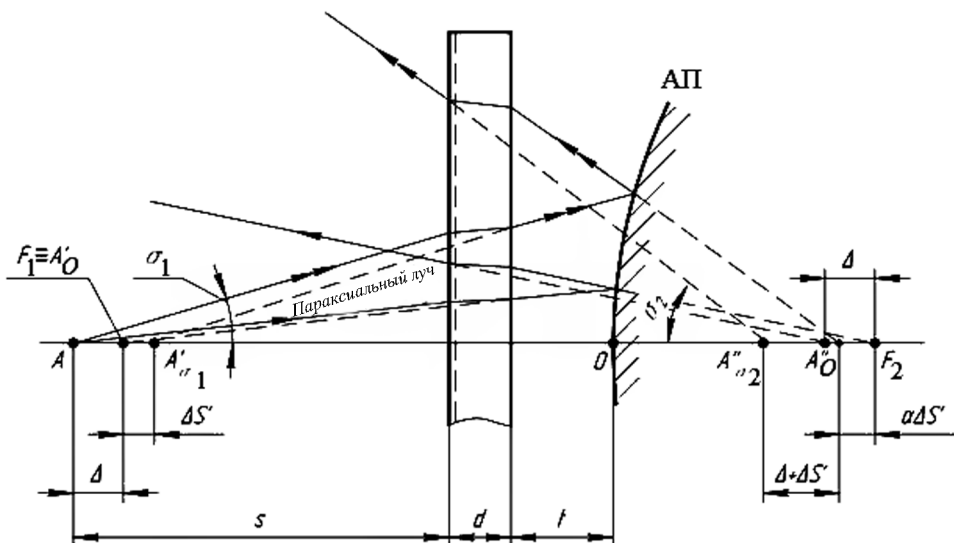


Рис. 2. Схема хода лучей в интерферометре

$$OF_1 = \frac{r_0}{\varepsilon - 1}; \quad (2)$$

$$OF_2 = \frac{r_0}{\varepsilon + 1}, \quad (3)$$

где r_0 — радиус кривизны при вершине контролируемой АП; ε — эксцентриситет контролируемой АП.

Для совмещения центров кривизны рабочего и эталонного волновых фронтов необходимо выполнить следующие условия:

$$s = d + t + (OF_2 - \Delta); \quad (4)$$

$$(s - \Delta) + d + t = OF_1.$$

Используя формулы (1)–(4), находим

$$s = \frac{r_0 \varepsilon}{\varepsilon^2 - 1}; \quad (5)$$

$$t = \frac{r_0}{\varepsilon^2 - 1} - \frac{d}{n}. \quad (6)$$

Формулы (5), (6) позволяют определить положение пластины в системе интерферометра.

Эталонный волновой фронт создан лучами, отраженными от первой поверхности пластины, и имеет сферическую форму. Рабочий волновой фронт деформируется не только вследствие наличия погрешностей контролируемой поверхности, но и вследствие сферической аберрации $\Delta s'$ (см. рис. 2) пластины в результате двойного прохождения лучей через нее. Сферическая аберрация плоскопараллельной пласти-

ны положительна и определяется по формуле [2] $\Delta s'_\sigma = \frac{n^2 - 1}{2n^3} d \operatorname{tg}^2 \sigma$, где σ — угол падения луча на пластину.

При двойном ходе через пластину сферическая aberrация для апертурного луча составит

$$\begin{aligned} \Delta s' &= \alpha \Delta s'_{\sigma_1} + \Delta s'_{\sigma_2} = \alpha \frac{n^2 - 1}{2n^3} \operatorname{tg}^2 \sigma_1 d + \frac{n^2 - 1}{2n^3} \operatorname{tg}^2 \sigma_2 d = \\ &= \frac{d(n^2 - 1)}{2n^3} \left(\frac{\operatorname{tg}^2 \sigma_1}{\operatorname{tg}^2 \sigma_2} \alpha + 1 \right) \operatorname{tg}^2 \sigma_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь α — продольное увеличение в фокусах контролируемой АП; σ_1 , σ_2 — апертурные углы контролируемой АП в фокусах F_1 и F_2 .

Продольное увеличение α связано с угловым (γ) и линейным (β) увеличениями зависимостью [3]

$$\alpha = \frac{1}{\gamma^2} = \left(\frac{\operatorname{tg} \sigma_1}{\operatorname{tg} \sigma_2} \right)^2 = \beta^2 \approx \left(\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \right)^2. \quad (8)$$

Из формул (7), (8) найдем

$$\Delta s' \approx \frac{d(n^2 - 1)}{2n^3} \left[\left(\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \right)^4 + 1 \right] \sigma_2^2. \quad (9)$$

Для вычисления волновой aberrации рабочего волнового фронта можно воспользоваться формулой [1]:

$$N = \int \Delta s' \sin \sigma_2 d\sigma_2. \quad (10)$$

Подставим (9) в (10):

$$\begin{aligned} N &\approx \int \Delta s' \sigma_2 d\sigma_2 = \frac{d(n^2 - 1)}{2n^3} \left[\left(\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \right)^4 + 1 \right] \int \sigma_2^3 d\sigma_2 = \\ &= \frac{d(n^2 - 1)}{2n^3} \left[\left(\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \right)^4 + 1 \right] \frac{\sigma_2^4}{4} = \frac{d(n^2 - 1)}{8n^3} \left[\left(\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \right)^4 + 1 \right] \sigma_2^4. \end{aligned} \quad (11)$$

Формула (11) позволяет выбрать толщину и материал плоскопараллельной пластины так, чтобы они не вносили существенных aberrаций, или учесть их действие при анализе интерференционной картины.

Исследование диапазона параметров контролируемых поверхностей. Для исследования диапазона параметров контролируемых гиперболических поверхностей и соответствующей им точности контроля был проведен aberrационный расчет рабочей ветви интерферометра с помощью программы автоматизированного расчета оптических систем Zemax. Область интереса представляли поверхности

диаметром 10...60 мм. Для расчета были выбраны следующие исходные данные: длина волны источника излучения $\lambda = 632,8$ нм; толщина плоскопараллельной пластины $d = 3$ мм; показатель преломления пластины из стекла $n = 1,5146$ для $\lambda = 632,8$ нм; синус переднего апертурного угла $\sin \sigma_1 = 0,1$. В качестве коррекционных параметров заданы толщины воздушных промежутков s и t (см. рис. 1). При оптимизации выдерживалось равенство расстояний от фокуса микрообъектива до первой поверхности плоскопараллельной пластины и от первой поверхности плоскопараллельной пластины до плоскости изображения. Результаты абберационного расчета значений параметров рабочей ветви интерферометра приведены в таблице, где r_0 — радиус кривизны при вершине контролируемой АП; s и t — толщины воздушных промежутков, вычисленные по формулам (5), (6);

Значения параметров рабочей ветви интерферометра

Исходные параметры			Параметры после оптимизации				
r_0 , мм	s , мм	t , мм	$s_{\text{опт}}$, мм	$t_{\text{опт}}$, мм	l , длин волн	$d_{\text{АП}}/2$, мм	$d_{\text{П}}/2$, мм
<i>Экцентриситет $\varepsilon = 1,5$</i>							
50	60	38,2	76,41	53,42	1,064	13,5	51,5
80	96	62,02	111,84	76,80	0,522	19,4	69,0
100	120	78,02	135,67	92,61	0,033	23,5	81,3
120	144	94,02	159,55	108,48	0,294	27,5	93,8
130	156	102,02	171,51	116,43	0,842	29,5	100,1
150	180	118,02	195,43	132,35	0,667	33,6	112,7
<i>Экцентриситет $\varepsilon = 2$</i>							
100	66,67	31,35	72,92	36,43	0,441	11,3	23,6
150	100	48,02	106,28	53,10	0,174	16,4	33,8
200	133,33	64,69	139,63	69,76	0,408	21,4	44,1
250	166,67	81,35	172,97	86,43	0,091	26,5	54,3
300	200	98,02	206,32	103,10	0,286	31,5	64,6
<i>Экцентриситет $\varepsilon = 3$</i>							
200	75	23,02	78,78	25,32	0,133	10,7	16,1
250	93,75	29,27	97,55	31,58	0,061	13,3	19,9
300	112,50	35,52	116,33	37,84	0,084	15,8	23,7
400	150,00	48,02	153,85	50,35	0,074	20,8	31,3
500	187,50	60,52	191,38	62,86	0,106	25,9	38,9
600	225	73,02	228,90	75,37	0,107	30,9	46,5
<i>Экцентриситет $\varepsilon = 5$</i>							
300	62,50	10,52	66,05	11,92	0,067	8,1	10,0
500	104,17	18,85	107,85	20,29	0,015	13,1	16,3
800	166,67	31,35	170,44	32,82	0,054	20,7	25,8
1000	208,33	39,69	212,14	41,16	0,038	25,7	32,11

$s_{\text{опт}}$ и $t_{\text{опт}}$ — толщины воздушных промежутков после оптимизации; l — волновая абберрация рабочего волнового фронта; $d_{\text{АП}}/2$ — половина светового диаметра контролируемой АП; $d_{\text{п}}/2$ — половина светового диаметра плоскопараллельной пластины.

Приведенная в таблице волновая абберрация l рассчитана для случая, когда контролируемая поверхность идеальна. Поэтому она представляет собой приборную погрешность интерферометра. Для обнаружения погрешности на контролируемой поверхности необходимо, чтобы деформация волнового фронта, вызванная этой погрешностью, превышала собственную погрешность интерферометра в 5–10 раз. Следовательно, интерферометр позволит обнаружить погрешность $\delta_{\text{АП}}$ на контролируемой поверхности, вычисляемую по формуле

$$\delta_{\text{АП}} = (5 \dots 10) \frac{l}{2}, \quad (12)$$

где l — приборная погрешность.

С учетом формулы (12) на основании результатов расчета, приведенных в таблице, можно сделать следующие выводы:

- 1) интерферометр не пригоден для контроля большинства поверхностей с малым эксцентриситетом ($\varepsilon < 3$);
- 2) АП с эксцентриситетом $\varepsilon = 3$ могут быть проконтролированы на этом интерферометре с точностью не менее $0,5\lambda$, если их радиусы кривизны при вершине находятся в диапазоне значений $r_0 = 200 \dots 600$ мм;
- 3) АП с эксцентриситетом $\varepsilon = 5$ могут быть проконтролированы с точностью не менее $0,2\lambda$, если их радиусы кривизны при вершине находятся в диапазоне значений $r_0 = 300 \dots 1000$ мм.

Как показали исследования, точность контроля возрастает с увеличением значения эксцентриситета.

Схема интерферометра с фотоэлектрической регистрацией интерферограммы. В рассмотренной схеме интерферометра (см. рис. 1) интерференционная картина наблюдается на экране. Регистрация картины не предусмотрена, что является существенным недостатком этой схемы. Усовершенствованная схема интерферометра с фотоэлектрической регистрацией интерферограммы приведена на рис. 3. Регистрирующая ветвь состоит из фокусирующего сферического зеркала 3 и матричного приемника излучения (ПИ). Экран 5 препятствует прямому попаданию излучения источника на приемник.

Особенностью приведенной схемы является то, что к точности сферического зеркала не предъявляются высокие требования, так как оно вносит абберрации одновременно в оба интерферирующих пучка. Его световой диаметр варьируется в пределах 65...183 мм, а радиус кривизны — 100...370 мм. Например, при контроле АП с уравнением

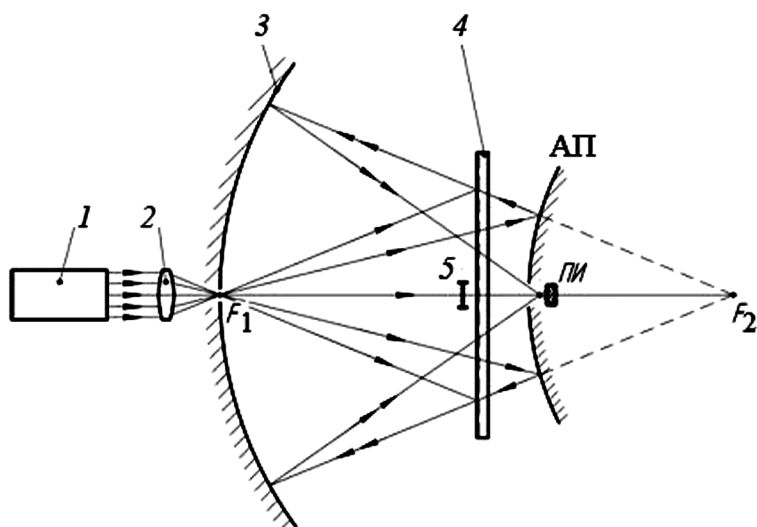


Рис. 3. Принципиальная схема интерферометра для контроля выпуклых гиперболических зеркал с фотоэлектрической регистрацией интерферограммы:
 1 — лазер; 2 — микрообъектив; 3 — сферическое зеркало; 4 — полупрозрачная пластина; 5 — непрозрачный экран

профиля $y^2 - 715x - 11,5x^2 = 0$ потребуется фокусирующее сферическое зеркало с радиусом кривизны около 180 мм и диаметром 82 мм.

Заключение. Научная новизна настоящей работы заключается в том, что:

- 1) исследованы диапазоны радиусов и эксцентриситетов контролируемых поверхностей и определена соответствующая этим диапазонам точность контроля;
- 2) предложена усовершенствованная схема интерферометра с регистрирующей ветвью, которая позволит упростить процесс расшивки интерферограммы и повысить точность контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 261 с.
2. Максудов Д.Д. Астрономическая оптика. Л.: Наука, 1979. 395 с.
3. Заказов Н.П., Киришин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем. СПб.: Лань, 2008. 446 с.
4. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М.: Машиностроение, 1978. 223 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения; под ред. Д.Т. Пуряева. М.: Машиностроение, 1987. 263 с.
6. Волосов Д.С., Цивкин М.В. Теория и расчет светооптических систем. М.: Искусство, 1960. 534 с.
7. Колодийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
8. Кирилловский В.К., Гаврилов Е.В. Оптические измерения. Ч. 7. Инновационные методы контроля при изготовлении прецизионных асферических поверхностей. СПб.: ГУ ИТМО, 2009. 118 с.

9. Пуряев Д.Т. Интерферометр для контроля качества выпуклых гиперболических зеркал телескопа Кассегрена: пат. 523274 СССР. 1976. Бюл. № 28. 3 с.
10. Изготовление вторичных зеркал из ситалла CO-115M для европейских проектов TTL, NOA и VST. [Электронный ресурс] URL: <http://lzos.ru/content/view/214/5/> (дата обращения: 05.06.2014).
11. Интерференционные методы производственного контроля оптических поверхностей зеркал телескопов. [Электронный ресурс] URL: <http://lzos.ru/content/view/216/> (дата обращения: 05.06.2014).
12. Malacara D. Optical Shop Testing. John Wiley & Sons, Inc., 2007. 888 p.

REFERENCES

- [1] Puryaev D.T. Metody kontrolya opticheskikh asfericheskikh poverkhnostey [Control methods for optical aspherical surfaces]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 261 p.
- [2] Maksutov D.D. Astronomicheskaya optika [Astronomic optics]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 395 p.
- [3] Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.N. Teoriya opticheskikh system [Theory of optical systems]. SPb, Lan' Publ., 2008. 446 p.
- [4] Kreopalova G.V., Puryaev D.T. Issledovanie i kontrol' opticheskikh system [Research and control of optical systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1978. 223 p.
- [5] Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. ed. Opticheskie izmereniya [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 263 p.
- [6] Volosov D.S., Tsivkin M.V. Teoriya i raschet svetoopticheskikh system [Theory and design of light-optical systems]. Moscow, Iskusstvo Publ., 1960. 534 p.
- [7] Kolomiyytsev Yu.V. Interferometry [Interferometers]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 296 p.
- [8] Kirillovskiy V.K., Gavrilov E.V. Opticheskie izmereniya. Ch. 7. Innovatsionnye metody kontrolya pri izgotovlenii pretsizionnykh asfericheskikh poverkhnostey [Optical measurements. Part 7. Innovation control methods at the precise aspherical surfaces manufacturing]. SPb., GU ITMO Publ., 2009. 118 p.
- [9] Puryaev D.T. Interferometer to control quality of Cassegrainian telescope convex hyperbolic mirrors. Patent SSSR no. 523274, 1976. Bull. no. 28. 3 p.
- [10] Manufacture of secondary mirrors of glass-ceramics CO-115M for European projects. Available at: <http://lzos.ru/content/view/214/5/> (accessed 05.06.2014).
- [11] Interference techniques for in-process monitoring of telescope mirror optical surfaces] Available at: <http://lzos.ru/content/view/216/> (accessed 05.06.2014).
- [12] Malacara D. Optical Shop Testing. John Wiley & Sons, Inc., 2007. 888 p.

Статья поступила в редакцию 22.05.2014

Пуряев Даниил Трофимович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Оптико-электронные приборы и системы научных исследований” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 работ, 95 изобретений и четырех книг в области оптических измерений, контроля асферических поверхностей, конструирования офтальмологических приборов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Puryaev D.T. — Dr. Sci. (Eng.), professor of the Bauman Moscow State Technical University department “Optoelectronic Instruments and Research Systems”. Author of more than 200 scientific publications, 95 patents and 4 monographs in the fields of optical measurements, aspherical surfaces control, design of ophthalmologic devices.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Кулакова Надежда Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные приборы и системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области расчета оптических систем оптико-электронных приборов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Kulakova N.N. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Laser and Optoelectronic Devices and Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of design of optoelectronic systems.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Бурмак Людмила Игоревна — студентка кафедры “Лазерные и оптико-электронные приборы и системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области интерференционных методов контроля асферических поверхностей.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Burmak L.I. — student of “Laser and Optoelectronic Devices and Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of interference methods of aspherical surfaces control.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Вниманию авторов журнала “Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Приборостроение”

Редакция журнала принимает к рассмотрению статьи, оформленные в соответствии с действующими правилами, по следующей тематике.

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

- Приборы и методы измерения
- Приборы навигации
- Акустические приборы и системы
- Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
- Радиоизмерительные приборы
- Приборы и методы для измерения ионизирующих излучений и рентгеновские приборы
- Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий
- Технология приборостроения
- Метрология и метрологическое обеспечение
- Информационно-измерительные и управляющие системы
- Приборы, системы и изделия медицинского назначения
- Приборы и методы преобразования изображений и звука

Радиотехника и связь

- Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

- Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- Радиолокация и радионавигация

Информатика, вычислительная техника и управление

- Системный анализ, управление и обработка информации
- Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления
- Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей
- Системы автоматизации проектирования
- Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети
- Теоретические основы информатики
- Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- Методы и системы защиты информации, информационная безопасность
- Квантовые методы обработки информации

Физика

- Приборы и методы экспериментальной физики
- Радиофизика
- Физическая электроника
- Оптика
- Акустика
- Физика низких температур
- Физика полупроводников
- Электрофизика, электрофизические установки
- Физика и технология наноструктур
- Лазерная физика

Авиационная и ракетно-космическая техника

- Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем
- Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов
- Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сдано в набор 15.11.2014
Формат 70 × 108/16
Заказ

Подписано в печать 23.01.2015
Усл.-печ. л. 13,31 Уч.-изд. л. 14,23

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана