

УДК 535.317

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЗРАЧНЫХ ПОДЛОЖЕК ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Н. Т. АВЛАСЕВИЧ¹⁾, А. И. БУТЬ²⁾, А. М. ЛЯЛИКОВ¹⁾

¹⁾Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,
ул. Э. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

²⁾Технологический колледж Гродненского государственного университета им. Я. Купалы,
ул. Горького, 84, 230009, г. Гродно, Беларусь

Отмечено, что в оптическом производственном контроле требуются сравнительно простые и надежные в работе интерференционные устройства, обеспечивающие реализацию различных способов контроля оптических элементов. Разработана оптическая схема голографического интерферометра, пригодная для работы в производственных условиях, которая позволяет реализовать способ интерференционного контроля качества оптических элементов типа фазовой дифракционной решетки на прозрачной стеклянной подложке. Способ основан на сравнении контролируемого элемента с эталонным. В данной схеме интерферометра конечная интерферограмма формируется при наложении двух световых пучков – объектного и эталонного, сдвинутых в пространстве на величину, сравнимую с диаметром самого пучка и превышающую линейные размеры исследуемого дифракционного оптического элемента. Представлены интерференционные картины результатов контроля качества подложек дифракционного оптического элемента. Предложенный способ может быть использован в оптическом производственном контроле дифракционного оптического элемента.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия; контроль качества оптических элементов; дифракционные оптические элементы.

HOLOGRAPHIC INTERFEROMETER FOR CONTROLLING TRANSPARENT SUBSTRATES OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

N. T. AVLASEVICH^a, A. I. BUTS^b, A. M. LIALIKAU^a

^aYanka Kupala State University of Grodno, E. Ozheshko street, 22, 230023, Grodno, Belarus

^bTechnological college of the Yanka Kupala State University of Grodno,
Gor'kogo street, 84, 230009, Grodno, Belarus

Corresponding author: amlialikov@grsu.by

The procedures of optical manufacturing inspection necessitate implementation of relatively simple and effective interference devices enabling realization of various methods to control optical elements. This paper presents a scheme of

Образец цитирования:

Авласевич Н. Т., Буть А. И., Ляликов А. М. Голографический интерферометр для контроля прозрачных подложек дифракционных оптических элементов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 2. С. 34–40.

For citation:

Avlasevich N. T., Buts A. I., Lialikau A. M. Holographic interferometer for controlling transparent substrates of diffractive optical elements. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 2. P. 34–40 (in Russ.).

Авторы:

Наталья Тадеушевна Авласевич – аспирантка кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета. Научный руководитель – А. М. Ляликов.
Андрей Иванович Буть – кандидат физико-математических наук; директор.

Александр Михайлович Ляликов – доктор физико-математических наук; профессор кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета.

Authors:

Nataliya Avlasevich, postgraduate student at the department of information systems and technologies, physico-technical faculty.
avlnt@grsu.by

Andrey Buts, PhD (physics and mathematics); director.
bai@grsu.by

Aliaksandr Lialikau, doctor of science (physics and mathematics); professor at the department of information systems and technologies, physico-technical faculty.
amlialikov@grsu.by

holographic optical interferometer suitable for the working conditions; the interferometer may be used for the interference quality control of optical elements such as a phase diffraction grating on the transparent glass substrate. The suggested procedure is based on comparison between the element controlled and the reference. In the interferometer scheme under consideration the final interferogram is formed by superposition of two light beams (object and reference) with a spatial shift comparable to the diameter of the beam itself and exceeding the linear dimensions of the diffractive optical element (DOE) under study. The resultant interference patterns for the substrates of DOEs subjected to the control procedures are given. The proposed method may be used for the optical manufacturing inspection of DOEs.

Key words: holographic interferometer; quality control of optical elements; diffractive optical elements.

Интерферометрия наиболее перспективна для контроля качества различных оптических элементов в производственных условиях [1–5]. Основное требование к оптическим интерференционным устройствам реализации контроля в производственных условиях – пониженная чувствительность к вибрациям и простота в обращении. Самым простым методом контроля качества оптического элемента является интерференционный способ сравнения контролируемого элемента с эталонным [2; 6; 7].

Разработанная нами оптическая схема голографического интерферометра, пригодная для работы в производственных условиях, позволяет реализовать способ интерференционного контроля качества оптических элементов типа фазовой дифракционной решетки на прозрачной стеклянной подложке. При создании дифракционных оптических элементов (ДОЭ) предъявлялись самые высокие требования к соответствию плоскопараллельности поверхностей подложки и угла при вершине клина норме.

За основу голографического варианта интерферометра был принят сдвиговый интерферометр, который позволяет осуществить большой боковой сдвиг, превышающий линейные размеры ДОЭ [8; 9]. Применение интерферометра бокового сдвига, а также развязка его и ветви зондирующего светового пучка обеспечивают низкую чувствительность устройства к вибрациям, что очень важно при контроле оптических элементов в производственных условиях [2].

Оптическая схема голографического интерферометра для контроля качества ДОЭ (рис. 1) включает несколько основных частей: осветительную систему формирования коллимированного зондирующего светового пучка посредством лазерного источника света LS, телескопической системы – L_1 , L_2 ; ветвь зондирующего светового пучка с контролируемым O_c и эталонным O_m ДОЭ, содержащую дополнительно систему пространственной фильтрации, посредством объективов L_3 , L_4 и непрозрачного экрана SF_1 с отверстием, обеспечивающую выделение определенных порядков дифракции света на ДОЭ; интерферометр большого бокового сдвига SI; приемную систему формирования интерференционной картины, включающую эталонную голограмму H и систему пространственной фильтрации посредством объектива L_5 и непрозрачного экрана SF_2 с отверстием, обеспечивающую выделение пары световых волн, прошедших и восстановленных с эталонной голограммы и формирующих интерференционную картину в плоскости, оптически сопряженной с O_c и H. Регистрация интерференционных картин осуществляется посредством цифровой фотокамеры CCD с возможностью обработки и вывода изображения на дисплей персонального компьютера PC.

Вследствие того что на выходе сдвигового интерферометра SI формируется интерференционная картина при наложении двух идентичных волновых фронтов, но сдвинутых в пространстве на величину s для минимизации влияния aberrаций на ход интерференционных полос, качество оптических элементов L_1 , L_2 , L_3 и L_4 должно быть высоким, обеспечивающим формирование плоского волнового фронта в невозмущенных исследуемым объектом зонах интерферирующих пучков. В целях создания голографического интерферометра использовались двухлинзовые склейки, которые не отличались высоким качеством. Для исключения данных aberrаций была использована эталонная голограмма H [10].

При записи эталонной голограммы H контролируемый O_c и эталонный O_m ДОЭ, а также непрозрачный экран SF_1 в устройстве (см. рис. 1) отсутствуют. Коллимированный зондирующий световой пучок формируется посредством лазерного источника света LS, телескопической системы L_1 и L_2 , а объективами L_3 , L_4 он уменьшается в диаметре до требуемых размеров для ввода в интерферометр бокового сдвига SI. При записи эталонной голограммы H в интерферометре SI происходит разделение объектного светового пучка по амплитуде и задается такой угол между интерферирующими световыми пучками, чтобы несущая частота полос голографической структуры на носителе голограммы составляла $10\text{--}20\text{ мм}^{-1}$ и величина сдвига волновых фронтов s превышала линейные размеры исследуемого ДОЭ. На рис. 2 представлены контуры световых пучков на входе интерферометра SI (см. рис. 2, а) и в плоскости (см. рис. 2, б) формирования эталонной голограммы H (см. рис. 1).

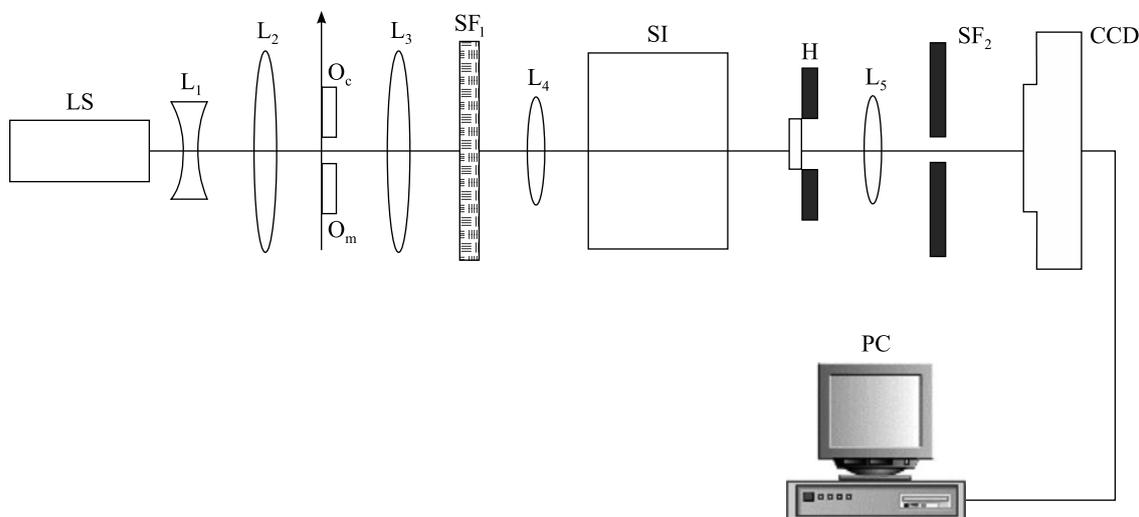


Рис. 1. Оптическая схема голографического интерферометра:
LS – лазерный источник света; L_1, L_2 – телескопическая система; O_c, O_m – положения эталонного и контролируемого ДОО; L_3, L_4 – объективы; SF_1 – непрозрачный экран с отверстием; SI – интерферометр бокового сдвига; H – эталонная голограмма; L_5 – объектив; SF_2 – непрозрачный экран с отверстием; CCD – цифровая фотокамера; PC – персональный компьютер

Fig. 1. Optical scheme of a holographic interferometer:
LS – laser light source; L_1, L_2 – telescopic system; O_c, O_m – the provisions of the reference model and controlled DOE; L_3, L_4 – lenses; SF_1 – opaque screen with a hole; SI – lateral shear interferometer; H – reference hologram; L_5 – the lens; SF_2 – opaque screen with a hole; CCD – digital photo camera; PC – personal computer

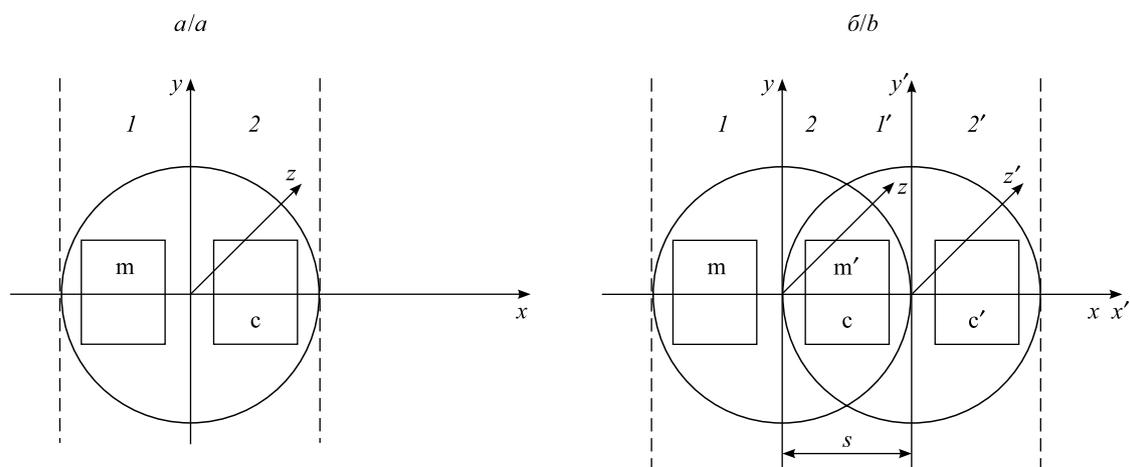


Рис. 2. Схематическое изображение светового пучка (круг) и контуров оптических элементов (прямоугольники) после их прохождения световым пучком (а) и в плоскости образования интерференционной картины (б) при наложении первого и второго световых пучков, сдвинутых в пространстве, где прямоугольниками m и c обозначены контуры эталонного и контролируемого ДОО, расположенных в зонах I и 2 соответственно, для первого пучка; m' и c' – контуры эталонного и контролируемого ДОО, расположенных в зонах I' и 2', для второго пучка; x, y – плоская система координат; s – величина бокового сдвига

Fig. 2. Schematic representation of the light beam (circle) and the contours of the optical elements (rectangles) after their passage through the light beam (a) and in the plane of formation of the interference pattern (b) when the first and second light beams shifted in space are superimposed: where the rectangles m and c outlines of the reference and controlled DOE located in zones I and 2 respectively for the first beam; m' and c' – the contours of the reference and controlled DOE located in zones I' and 2' for the second beam; x, y – planar coordinate system; s – magnitude of lateral shear

Направим ось z системы координат xuz вдоль распространения зондирующего светового пучка и перпендикулярно его волновой поверхности. В этом случае распределение фазы в объектной световой волне на входе интерферометра будет определяться отклонением волнового фронта от плоского, т. е. аберрациями оптических элементов L_1, L_2, L_3 и L_4 , которые можно описать функцией $\varphi(x, y)$. Распределение комплексных амплитуд $A(x, y)$ и $A'(x', y')$ пары интерферирующих световых волн можно представить следующим образом:

$$A(x, y) = a \exp\{i[\varphi(x, y)]\}, \quad (1)$$

$$A'(x', y') = a' \exp\left\{i\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x' \cos \alpha + y' \cos \beta) + \varphi(x', y')\right]\right\}, \quad (2)$$

где a и a' – действительные амплитуды световых волн; λ – длина волны источника света LS (см. рис. 1); α и β – углы между направлением распространения второго светового пучка и осями x' и y' соответственно. Для упрощения записей предположим, что интерферирующие пучки располагаются в плоскости xz , а сдвиг волновых фронтов осуществлен вдоль оси x на величину s . В этом случае второй направляющий косинус в выражении (2) обращается в нуль, и относительно системы координат xuz распределение комплексной амплитуды второй световой волны можно представить как

$$A'(x, y) = a' \exp\left\{i\left[\frac{2\pi}{\lambda}x \cos \alpha + \varphi(x - s, y)\right]\right\}. \quad (3)$$

При наложении пары световых волн (1) и (3) в плоскости носителя голограммы Н (см. рис. 1) образуется интерференционная картина с распределением интенсивности I :

$$I_1(x, y) = [A(x, y) + A'(x, y)][A^*(x, y) + A'^*(x, y)]. \quad (4)$$

Вследствие сдвига волновых фронтов интерферирующих волн формирование интерференционной картины происходит только в совмещенных зонах 2 и I' (см. рис. 2, б) с учетом (1), (3) и (4). После экспонирования и выполнения линейных условий обработки голограммы [11] ее коэффициент амплитудного пропускания будет пропорционален распределению интенсивности $I_1(x, y)$ и примет следующий вид:

$$\tau_1(x, y) \sim \tau_0 + V \cos[2\pi\xi x + \delta\varphi], \quad (5)$$

где τ_0 – постоянный коэффициент; $V = 2aa'/a^2 + a'^2$ – параметр, характеризующий видность голографической структуры; $\xi = \cos\alpha/\lambda$ – несущая частота полос голографической структуры; $\delta\varphi = |\varphi(x, y) - \varphi(x - s, y)|$ определяет искажение фазы, вызванное аберрациями оптики.

На следующем этапе контролируемый O_c и эталонный O_m ДОЭ устанавливаются в голографический интерферометр в ветвь зондирующего пучка в соответствующие схеме положения (см. рис. 1). Дифракционные оптические элементы располагаются по отношению к направлению сдвига интерферирующих пучков и на расстоянии друг от друга (см. рис. 2, а) таким образом, чтобы на эталонной голограмме Н происходило точное совмещение контуров контролируемого c и эталонного m' ДОЭ и самой голограммы Н (см. рис. 2, б). При этом следует отметить, что вершины клина подложек контролируемого и эталонного ДОЭ должны быть ориентированы параллельно друг другу. Непрозрачный экран SF_1 устанавливается в задней фокальной плоскости объектива L_3 в устройство (см. рис. 1), он служит для выделения посредством отверстия световых пучков прямопрошедших ДОЭ.

Для контроля отклонения клиновидности прозрачной подложки ДОЭ от нормы отверстием в экран SF_1 (см. рис. 1) выделяются световые пучки, прямопрошедшие контролируемый O_c и эталонный O_m ДОЭ. В этом случае при описании комплексных амплитуд $A(x, y)$ и $A'(x', y')$ необходимо ввести добавки изменения фазы $\varepsilon(x, y)$, вызванные прохождением зондирующего пучка световой волны через подложки контролируемого O_c и эталонного O_m ДОЭ:

$$\varepsilon(x, y) = \begin{cases} \varepsilon_m(x, y) & \text{для зоны 1,} \\ \varepsilon_c(x, y) & \text{для зоны 2,} \end{cases} \quad (6)$$

где $\varepsilon_m(x, y)$ – изменения фазы объектной волны вследствие взаимодействия с эталонным O_m ДОЭ; $\varepsilon_c(x, y)$ – изменения фазы объектной волны вследствие взаимодействия с контролируемым O_c ДОЭ. Если предположить, что ребра клиньев подложек ДОЭ параллельны оси x , то фазы $\varepsilon_m(x, y)$ и $\varepsilon_c(x, y)$ связаны с параметрами прозрачной подложки клина [12]:

$$\varepsilon_{m,c}(x, y) = \frac{2\pi(n-1)\gamma_{m,c}y}{\lambda}, \quad (7)$$

где n – показатель преломления подложки на длине волны λ ; $\gamma_{m,c}$ – углы при вершине клиновидных подложек эталонного γ_m и контролируемого γ_c ДОЭ соответственно. В этом случае распределения комплексных амплитуд световых волн, освещающих эталонную голограмму H , с учетом (1), (3) и (6) можно представить в следующем виде:

$$A(x, y) \sim \begin{cases} a \exp\{i[\varphi(x, y) + \varepsilon_m(x, y)]\} & \text{для зоны } I, \\ a \exp\{i[\varphi(x, y) + \varepsilon_c(x, y)]\} & \text{для зоны } 2, \end{cases} \quad (8)$$

$$A'(x, y) \sim \begin{cases} a' \exp\left\{i\left[\frac{2\pi}{\lambda}x \cos \alpha + \varphi(x-s, y) + \varepsilon_m(x, y)\right]\right\} & \text{для зоны } I', \\ a' \exp\left\{i\left[\frac{2\pi}{\lambda}x \cos \alpha + \varphi(x-s, y) + \varepsilon_c(x, y)\right]\right\} & \text{для зоны } 2'. \end{cases} \quad (9)$$

Распределение комплексных амплитуд $B_1(x, y) = B_l(x, y) + B'_l(x, y)$ световых волн на выходе эталонной голограммы определится из выражения

$$B_l(x, y) + B'_l(x, y) = [A(x, y) + A'(x, y)]\tau_1(x, y), \quad (10)$$

где $B_l(x, y)$ и $B'_l(x, y)$ – световые волны, дифрагированные в l -порядки ($l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) при освещении эталонной голограммы H световыми волнами $A(x, y)$ и $A'(x, y)$ соответственно. Поскольку эталонная голограмма записана только в области $2, I'$ (см. рис. 2, б), то с учетом (5), (8)–(10) в направлении оси z по нормали к эталонной голограмме H будут распространяться только световые волны вида

$$B_0(x, y) = b_0 \exp\{i[\varphi(x, y) + \varepsilon_c(x, y)]\}, \quad (11)$$

$$B'_{-1}(x, y) = b_{-1} \exp\{i[\varphi(x, y) + \varepsilon_m(x, y)]\}, \quad (12)$$

где b_0 и b_{-1} – действительные амплитуды волн. В задней фокальной плоскости объектива L_5 посредством отверстия в непрозрачном экране SF_2 (см. рис. 1) выделяются световые волны вида (11), (12) и при сложении образуют интерференционную картину вида

$$I_{cm}(x, y) = b_0^2 + b_{-1}^2 + 2b_0b_{-1} \cos[\varepsilon_c(x, y) - \varepsilon_m(x, y)]. \quad (13)$$

Для определения отклонения угла клина подложки контролируемого ДОЭ от нормы из (13) с учетом (7) можно получить уравнение [12]

$$[\gamma_c - \gamma_m] = \frac{\lambda}{P(n-1)}, \quad (14)$$

где P – средний период интерференционных полос, определяемый как отношение расстояния между двумя максимально удаленными интерференционными полосами к количеству полос на данном отрезке [6]. Интерференционные картины, отображающие качество прозрачных подложек ДОЭ, регистрировались цифровой камерой CCD (см. рис. 1) и выводились на монитор персонального компьютера РС.

При экспериментальном опробовании в качестве интерферометра бокового сдвига SI использовался малогабаритный четырехзеркальный интерферометр [10]. Были проведены исследования качества прозрачных подложек фазовых дифракционных решеток пропускающего типа.

К созданным ДОЭ предъявлялись строгие требования по соответствию норме угла клина прозрачной подложки. Для представленных образцов ДОЭ угол клина прозрачных подложек должен быть $6^\circ \pm 30''$. В соответствии с уравнением (14) возникновение интерференционных полос в интерференционной картине с периодом менее 8 мм свидетельствовало о несоответствии контролируемого ДОЭ норме. На фотографиях (рис. 3, а – в) представлены интерференционные картины результата контроля качества подложек ДОЭ. Первые интерферограммы (см. рис. 3, а, б) подтверждают соответствие норме подложек ДОЭ. Последняя интерферограмма (см. рис. 3, в) соответствует результату контроля ДОЭ с подложкой, не отвечающей норме.

В заключение необходимо отметить, что для извлечения информации о соответствии ДОЭ норме можно использовать алгоритмы цифровой обработки интерферограмм, при этом голографический интерферометр может быть дополнен системой автоматической обработки интерференционных картин [13].

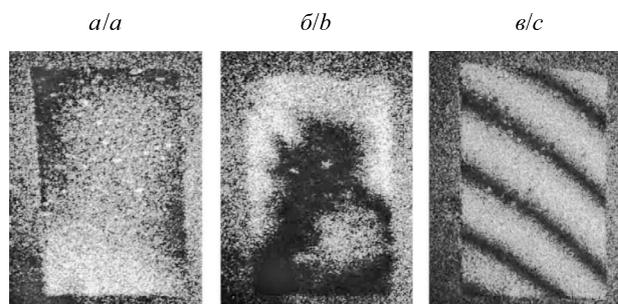


Рис. 3. Интерференционные картины, характеризующие результаты контроля качества подложек ДОЭ: соответствующие (а, б) и несоответствующие (в) норме

Fog. 3. Interference patterns characterizing the quality control results obtained for DOE substrates: in the norm (a, b) and out of the norm (c)

Библиографические ссылки

1. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М., 1981.
2. Оптический производственный контроль / под ред. Д. Малакары. М., 1985.
3. Кожееватов И. Е., Куликова Е. Х., Черагин Н. П. Метод и устройство для прецизионного контроля профилей оптических поверхностей // Опт. журн. 1997. Т. 64, № 9. С. 49–54.
4. Руденчик Е. А., Кожееватов И. Е., Черагин Н. П. и др. Метод абсолютной калибровки эталонных пластин для интерферометрического контроля поверхностей // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 90, № 1. С. 127–135.
5. Доладугина В. С. Методика оценки деформации волнового фронта при контроле однородности крупногабаритных заготовок оптических стекол // Опт. журн. 2003. Т. 70, № 2. С. 64–68.
6. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пурыев Д. Т. Оптические измерения. М., 1987.
7. Государственная система обеспечения единства измерений. Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Ч. 3. Калибровка и аттестация интерферометров, методика измерений оптических волновых фронтов : ГОСТ Р 8.744-2011/ISO/TR 14999-3:2005. Введ. 01.03.13. М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии : Стандартинформ, 2013. 32 с.
8. Ляликов А. М. Универсальное устройство интерферометрического контроля качества оптических элементов // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, № 4. С. 66–71.
9. Ляликов А. М. Высокочувствительный интерферометрический контроль дифракционных элементов // Квант. электроника. 2010. Т. 40, № 12. С. 1141–1145.
10. Буть А. И., Ляликов А. М. Безабберационная интерферометрия большого бокового сдвига // ЖТФ. 2010. Т. 80, № 9. С. 97–103.
11. Бекетова А. К., Белозеров А. Ф., Березкин А. Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л., 1979.
12. Буть А. И., Ляликов А. М. Повышение чувствительности измерений при формировании голографических интерферограмм клиновидных пластин // ЖТФ. 2012. Т. 82, № 5. С. 78–83.
13. Malacara D., Servin M., Malacara Z. Interferogram analysis for optical testing. London, 2005.

References

1. Afanas'ev V. A. Opticheskie izmereniya. Moscow, 1981 (in Russ.).
2. Malakara D. (ed.). Opticheskii proizvodstvennyi kontrol'. Moscow, 1985 (in Russ.).
3. Kozhevato I. E., Kulikova E. Kh., Cheragin N. P. [Method and device for high-precision monitoring of optical surface profiles]. *Opticheskii zh.* 1997. Vol. 64, No. 9. P. 49–54 (in Russ.).
4. Rudenchik E. A., Kozhevato I. E., Cheragin N. P., et al. [Method for absolute calibration of reference plates for interferometric inspection of surfaces]. *Optika spektrosk.* 2001. Vol. 90, No. 1. P. 127–135 (in Russ.).
5. Doladugina V. S. [Technique for estimating wavefront deformation when monitoring the homogeneity of large blanks of optical glasses]. *Opticheskii zh.* 2003. Vol. 70, No. 2. P. 64–68 (in Russ.).
6. Kreopalova G. V., Lazareva N. L., Puryaev D. T. Opticheskie izmereniya. Moscow, 1987 (in Russ.).

7. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Optika i fotonika. Interferentsionnye izmereniya opticheskikh elementov i sistem. Part 3. Kalibrovka i attestatsiya interferometrov, metodika izmerenii opticheskikh volnovykh frontov : GOST P 8.744-2011/ISO/TR 14999-3 : 2005. Introd. 01.03.13. Moscow : Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii : Standartinform, 2013. 32 p.

8. Lyalikov A. M. [Universal interferometric device for the quality control of optical elements]. *Pis'ma v zh. tekh. fiz.* 2009. Vol. 35, No. 4. P. 66–71 (in Russ.).

9. Lyalikov A. M. [High-sensitive interferometric control of the quality of diffractive elements]. *Kvantovaya elektron.* 2010. Vol. 40, No. 12. P. 1141–1145 (in Russ.).

10. But' A. I., Lyalikov A. M. [Aberration-free long lateral shear interferometry]. *Zh. tekh. fiz.* 2010. Vol. 80, No. 9. P. 97–103 (in Russ.).

11. Beketova A. K., Belozarov A. F., Berezkin A. N., et al. *Golograficheskaya interferometriya fazovykh ob'ektov*. Leningrad, 1979 (in Russ.).

12. But' A. I., Lyalikov A. M. [Improvement of the sensitivity of measurements in the formation of holographic interferograms of wedge plates]. *Zh. tekh. fiz.* 2012. Vol. 82, No. 5. P. 78–83 (in Russ.).

13. Malacara D., Servin M., Malacara Z. *Interferogram analysis for optical testing*. London, 2005.

Статья поступила в редакцию 11.02.2017.

Received by editorial board 11.02.2017.