



ЛАЗЕРНЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.Г.Полещук, В.Н.Хомутов, А.Е.Маточкин,
Р.К.Насыров, В.В.Черкашин,
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

Представлен обзор современных лазерных интерферометров, предназначенных для контроля формы оптических поверхностей, и проведен их анализ. Рассмотрены методы контроля формы сферических и асферических поверхностей на основе применения компьютерно-синтезированных голограмм в сочетании с лазерными интерферометрами. Приведены результаты разработки интерферометра типа Физо с расширенными функциональными особенностями и программным обеспечением для управления прибором и для анализа интерферограмм. Рассмотрены ключевые особенности и отличительные черты интерферометра модели ФТИ-100.

Если нельзя измерить,
то невозможно и изготовить.
В.Томсон (Лорд Кельвин)

ВВЕДЕНИЕ

Интерферометры – одни из самых точных измерительных приборов, использующих принцип интерференции световых волн [1]. Микроэлектроника, оптика, лазерная техника, телекоммуникация, астрономия, прецизионная механика, измерительная техника не могли бы существовать без применения различных типов интерферометров. Качество оптических поверхностей определяется методами их контроля. При изготовлении современных оптических систем требуется контролировать форму поверхностей (пластин, зеркал и линз) с точностью до единиц и даже долей нанометра. При этом площадь контролируемой поверхности может составлять несколько десятков квадратных метров.

Существуют много типов датчиков волнового фронта [2] и интерферометров, из которых наиболее распространены конфигурации Физо и Тваймана-Грина. Идеальный интерферометр должен формировать карту трехмерной оптической поверхности без дисторсии (ошибки), независимо

LASER INTERFEROMETERS FOR OPTICAL SURFACE TESTING

A.G.Poleshchuk, V.N.Khomutov, A.E.Matochkin,
R.K.Nasyrov, V.V.Cherkashin,
Institute of Automation and Electrometry
of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
(IAE SB RAS)

The review of up-to-date laser interferometers for optical surface testing is presented and their analysis is performed. The methods of spherical and aspherical surfaces testing are considered on the basis of the use of computer-generated holograms in combination with laser interferometers. The results of development of Fizeau interferometer with expanded functional characteristics and software for device control and interferogram analysis are specified. The key peculiarities and distinctive features of FTI-100 interferometer are considered.

"If you cannot measure it,
you cannot improve it".
W. Thompson (Lord Kelvin)

INTRODUCTION

Interferometers are one of the most accurate measuring devices, which use the principle of light wave interference [1]. Microelectronics, optics, laser engineering, telecommunication, astronomy, precision mechanics, measuring equipment could not exist without use of various types of interferometers. Quality of optical surfaces is determined by the methods of their control. When making the modern optical systems, it is required to control the shape of surfaces (plates, mirrors and lenses) with the accuracy of units and even fractions of nanometer. At the same time, the area of surface under test can be equal to several tens of square meters.

There are many types of wavefront sensors [2] and interferometers, of which the most common are configurations of Fizeau and Twyman-Green. Perfect interferometer must form the map of three-dimensional optical surface without distortion (error) irrespective if the surface is flat, spherical or aspherical. The perfect system must be resistant to vibrations, temperature differences, it must be easy to use and it should operate without failures. For



от того, является ли поверхность плоской, сферической или асферической. Идеальная система должна быть устойчива к вибрациям, перепадам температур, быть проста в использовании и работать без сбоев. Для практического применения интерферометров необходимо знать и понимать их особенности, области применения и направления их совершенствования.

В настоящей работе детально рассмотрена конфигурация интерферометра типа Физо, приведен обзор наиболее распространенных моделей, обсуждены в деталях характеристики и особенности их схем и тенденции развития. Основное внимание уделено применению компьютерно-синтезированных голограмм (СГ) в схемах интерферометров типа Физо на примере разработанного в ИАиЭ СО РАН и ЗАО "Дифракция" прибора ФТИ-100.

СОВРЕМЕННЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ТИПА ФИЗО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Интерферометры с большим полем обычно строятся по схеме Физо, которая требует минимума оптических компонентов: источник и приемник излучения, коллимирующая линза, эталонная пластина и контролируемый объект. Интерферометр типа Физо использует общий ход измерительного и опорных пучков света, поэтому на качество компонентов особых требований не накладывается.

Диаметр светового поля с одной стороны определяет размеры контролируемых деталей, а с другой – габариты и стоимость прибора. В настоящее время выпускаются интерферометры с рабочим полем от 5 до 150 мм. Большой диаметр поля обеспечивается расширителями пучка. Наибольшее распространение получили приборы с полем 102 мм.

В качестве источника излучения обычно используют одночастотные He-Ne – или полупроводниковые лазеры. Одной из основных характеристик источника является длина когерентности, которая может достигать 100 м. Иногда в интерферометрах используют одночастотные 532/1064-нм лазеры. Однако для прецизионного контроля асферических поверхностей с использованием СГ выбор остается за He-Ne лазером, длина волны которого определена с высокой точностью.

В настоящее время интерферометры типа Физо серийно производятся многими компаниями. В таблице приведены некоторые модели серийных приборов с полем 102 мм, рассчитанные на применение эталонных пластин и объективов стандарта Zygo. Современные приборы управляются от компьютера и позволяют формировать двух- и трехмер-

the practical application of interferometers it is necessary to know and understand their peculiarities, application ranges and areas of their improvement.

In this paper the configuration of Fizeau interferometer is considered in details, the review of the most common models is given, the characteristics and features of their layouts and development trends are discussed. The main focus is concentrated on the application of computer-generated hologram (CGH) in the Fizeau-type interferometers by the example of FTI-100 device developed in IAE SB RAS and "Diffraction" company.

MODERN FIZEAU INTERFEROMETERS FOR OPTICAL SURFACES TESTING

Interferometers with large field are usually based on Fizeau principle, which requires minimum optical components: source and detector of radiation, collimating lens, reference plate and object under test. Fizeau interferometer uses the common path for test and reference beams, and therefore there are no special requirements to the quality of optical components.

On one hand, light field diameter determines the dimensions of tested components, and on the other hand, it determines the dimensions and cost of device. At the present time, interferometers with the operational field from 5 to 150 mm are produced. Larger diameter of the field is provided by beam expanders. Devices with the field of 102 mm are the most common devices.

Single-frequency He-Ne – or semiconductor lasers are usually used as the light source. One of the main characteristics includes coherence length, which can reach 100 m. Sometimes single-frequency 532/1064-nm lasers are used in interferometers. However, for high-precision testing of aspherical surfaces with the use of CGH, He-Ne lasers are selected, as its wavelength is determined with high accuracy.

Currently, Fizeau interferometers are commercially available from many companies. Some models of commercially available devices with the 102 mm field, which are compatible with reference flats and spheres of Zygo standard, are specified in the table. Modern devices are controlled by computer and allow generating 2- and 3-dimensional maps of tested optical surface. The algorithms of phase shift (PS) or spectral analysis (SA) are used for processing of interferograms [1]. PS method is the most



ные карты контролируемой оптической поверхности. Для обработки интерферограмм используются алгоритмы временного фазового сдвига (ВФЗ) или спектральный анализ (СА) [1]. Метод ВФЗ является наиболее точным, однако он не применим в условиях вибраций, так как время измерения составляет до 0,3 секунды. Метод СА использует одну интерферограмму, поэтому время измерения сокращено до десятков микросекунд. Однако принципиальной особенностью этого метода является регистрация интерферограммы со множеством полос, что приводит к появлению погрешностей, вызванных нарушением принципа общего хода лучей, а также к необходимости применения высокоразрешающих видеокамер без защитного стекла [3]. При контроле асферических поверхностей, особенно большой кривизны, при наклоне возникает aberrация типа комы. Эту aberrацию нужно исключать из результатов измерений программным путем, что не всегда удобно.

В последние годы были разработаны приборы, реализующие алгоритмы одновременного фазового сдвига (ОФЗ) применительно как к интерферометрам типа Тваймана-Грина [4], так и Физо [5]. Эти приборы позволяют проводить измерения в условиях повышенного уровня вибраций, однако требуют тщательной калибровки, так как принцип общего хода лучей также нарушен.

Часто интерферометры встраиваются в измерительные комплексы с вертикальным расположением прибора и детали [6]. Одними из самых высокотехнологичных являются комплексы компаний Zygo [7] и QED [8], позволяющие контролировать форму как сферических, так и асферических поверхностей. Стоимость таких систем достигает миллионов долларов.

В России ранее серийно выпускался интерферометр ИКД-110 [9]. В настоящее время выпускаются приборы следующих моделей: OPTOTL-ICO-60 (поле 60 мм, $\lambda=0,532$ мкм, погрешность измерения $\delta \approx 1/20 \lambda$) [10], РИФ (поле 95 мм, $\lambda=0,65$ мкм, $\delta \approx 1/20 \lambda$) [11], ИФА-300 (поле до 300 мм, $\lambda=0,65$ мкм, $\delta \approx 1/100 \lambda$) [12] и ФТИ-100PS [13] (см. таблицу).

Для контроля плоских и сферических поверхностей применяются обычные коммерческие интерферометры, а для контроля асферических поверхностей (АП) они дополняются СГ [14]. Однако применение СГ имеет ряд особенностей, таких как наличие паразитных дифракционных порядков (ДП), низкой дифракционной эффективности, требуемой высокой точности юстировки СГ и др. [15]. Применение СГ совместно с коммерческими интерферометрами [16] не всегда позволяет учесть

precise method; however, it is not applicable under the conditions of vibrations because the measurement time is up to 0.3 sec. SA method uses one interferogram, and therefore the measurement time is reduced to tens of microseconds. However, the key feature of this method is registration of interferogram with many fringes, and this fact brings measuring errors caused by the disturbance of common path principle and requires high-resolution CCD cameras without protective glass [3]. When testing the aspherical surfaces, especially with large curvature, in case of inclination the aberration of coma type occurs. This aberration must be excluded from the measurement results via software, but it is not always convenient.

Over the recent years, the devices implementing instantaneous phase shift algorithms (IPS) have been developed in relation to Twyman-Green type interferometers [4] as well as Fizeau-type interferometers [5]. These devices allow performing the measurements under the conditions of high level of vibrations; however, they require careful calibration because the common path principle is disturbed.

Often, interferometers are built into the measuring complexes with vertical arrangement of device and component [6]. Complexes of Zygo [7] and QED [8] companies refer to one of the highest-technology devices, which allow controlling the shape of spherical and aspherical surfaces. The cost of such systems reaches millions of dollars.

Earlier, in Russia the interferometer IKD-110 was commercially available [9]. At the present moment the devices of following models are produced: OPTOTL-ICO-60 (field - 60 mm, $\lambda=0.532 \mu\text{m}$, measurement error $\delta \sim 1/20 \lambda$) [10], RIF (field - 95 mm, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$, $\delta \sim 1/20 \lambda$) [11], IFA-300 (field - up to 300 mm, $\lambda=0.65 \mu\text{m}$, $\delta \sim 1/100 \lambda$) [12] and FTI-100PS [13] (see Table 1).

In order to test flat and spherical surfaces the standard commercial interferometers are used, and in order to test aspherical surfaces (AS) they are complemented [14] CGH. However, use of CGH has a number of peculiarities, such as presence of parasitic diffraction orders (DO), low diffraction efficiency, required high accuracy of CGH adjustment, etc. [15]. Use of CGHs in combination with commercial interferometers [16] do not always allow taking into account these factors, which causes the decrease of measurement accuracy and sometimes gives wrong measurement result.

эти факторы, что приводит к снижению точности измерений, а иногда к получению ошибочного результата.

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ТИПА ФИЗО ДЛЯ КОНТРОЛЯ АСФЕРИКИ

Упрощенная оптическая схема ИФ приведена на рис. 1а. Оптическое излучение от источника (S) с помощью светоделителя (СД) и коллимирующего объектива (O1) направляется к эталонной пластине (ЭП) и далее к поверхности контролируемого объекта (плоскость P1). Излучение, отраженное от этой поверхности и от стороны А эталонной пластины (сторона Б имеет клин α), фокусируется объективом O1 в плоскости диафрагмы Д (точка S') и далее с помощью объектива O2 направляется к расположенной в плоскости P2 видеокамере ВК1. Одним из ключевых элементов ИФ является диафрагма Д, которая служит для блокировки паразитного излучения, отраженного от элементов схемы, в частности от стороны Б эталонной пластины (штриховая линия и точка S''). Диаметр d диафрагмы определяет пространственное разрешение прибора. Если эталонная пластина имеет клин $\alpha=15$ угловых минут, то при фокусном расстоянии объектива O1 $f1=600$ мм диаметр диафрагмы должен быть $d < 4\alpha f1 \approx 10$ мм. Однако, если ИФ используется совместно с СГ, размер диафрагмы должен определяться углами дифракции ДП. На рис. 1б показан пример положения ДП на поверхности диафрагмы при контроле АП с помощью СГ [17]. Для блокировки нежелательных ДП диаметр диафрагмы должен

PECULIARITIES OF FIZEAU INTERFEROMETERS FOR ASPHERE TEST

Simplified optical layout of IF is shown in Fig. 1a. Optical radiation from the light source (S) using beam splitter (BS) and collimating lens (L1) is directed to the transmission flat (TF) and then to the surface under test (plane P1). Radiation reflected from this surface and from the side A of transmission flat (side B has wedge α) is focused by the lens L1 in the plane of diaphragm D (point S'), and then with the help of lens L2 it is directed to CCD camera VC1 located in the plane P2. Diaphragm D, which serves for blocking of parasitic radiation reflected from optical elements, in particular, from the side B of transmission flat (dashed line and point S''), is one of the key elements of IF. The diameter d of diaphragm determines the spatial resolution of device. If the transmission flat has wedge $\alpha=15$ angular minutes, then at the focal length of lens L1 $f1=600$ mm, the diaphragm diameter must be $d < 4\alpha f1 \sim 10$ mm. However, if IF is used together with CGH, the diaphragm size must be determined on the basis of diffraction angles of DO. In Fig. 1b the example of DO position on diaphragm surface is shown during the AS testing using CGH [17]. In order to block unwanted DO, the diaphragm diameter must be $d < 2f1\lambda/T_{max}$, where T_{max} is maximum period of the CGH pattern. At $\lambda=633$ nm and $T_{max} \sim 0.5$ mm, the diaphragm diameter must be $d < 1.5$ mm. Thus, the reasonable selection of diaphragm diameter d allows minimizing

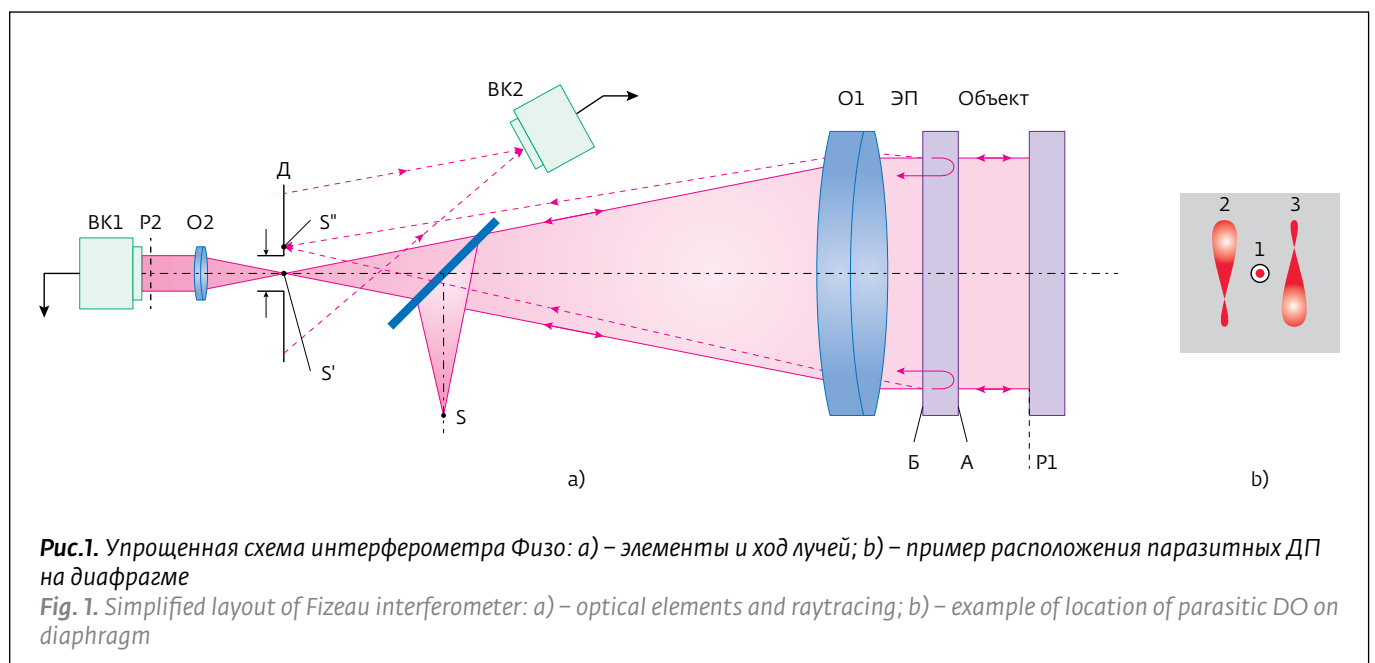


Рис.1. Упрощенная схема интерферометра Физо: а) – элементы и ход лучей; б) – пример расположения паразитных ДП на диафрагме

Fig. 1. Simplified layout of Fizeau interferometer: a) – optical elements and raytracing; б) – example of location of parasitic DO on diaphragm

быть $d < 2f_1 \lambda / T_{\max}$, где T_{\max} – максимальный период структуры СГ. При $\lambda = 633$ нм и $T_{\max} \approx 0,5$ мм, диаметр диафрагмы должен быть $d < 1,5$ мм. Таким образом, разумный выбор диаметра d диафрагмы позволяет минимизировать влияние паразитных ДП. Диафрагма также может быть использована для юстировки интерферометра. Если поверхность диафрагмы имеет достаточную площадь, то с помощью установленной перед ней второй видеокамеры ВК2 можно контролировать положение и перемещение автоколлимационных пятен [18]. Этот метод юстировки реализован в ИФ типа ФТИ-100.

Интерферометр с плоской ЭП (см. рис.1а) позволяет контролировать поверхность объекта только с небольшим отклонением от плоскости. Для контроля сферических поверхностей вместо ЭП устанавливают эталонный объектив (ЭО), состоящий из нескольких линз, причем выходная линза имеет высококачественную апланатическую поверхность, которая формирует опорный волновой фронт на отражение [19]. В настоящее время такие ЭО с полем 102 мм и 153 мм и апертурой от $f/0,65$ выпускаются многими зарубежными компаниями (Zygo, MPE, Marh и др.).

Для контроля АП эталонные объективы дополняются корректорами волнового фронта на основе СГ. Голограмма-корректор преобразует сферический волновой фронт W_1 на выходе ЭО в волновой фронт W_2 , сопряженный с формой АП, как показано на рис. 2а. Эта схема широко используется для контроля АП [20], однако она имеет недостаток – точность всегда меньше, чем точность контроля плоских или сферических поверхностей. Это обусловлено, в частности, тем, что подложка СГ не входит в общий ход световых пучков ИФ и, следовательно, ее погрешность складывается с результатом измерения. Также существенную роль играет точность юстировки СГ относительно ИФ и контролируемой поверхности.

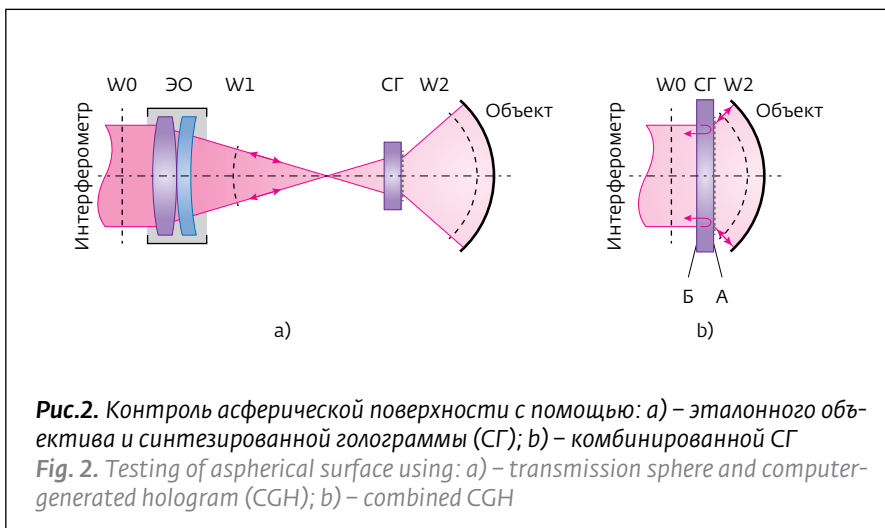
Одним из путей устранения указанных недостатков является применение так называемых "комбинированных синтезированных голограмм" [14, 21]. Такие голограммы позволяют формировать два и более независимых волновых фронта с помощью одного элемента. В приложении к ИФ, один волновой фронт является измерительным, а второй опорным. В этом случае отпадает необходимость в эталоне.

the influence of parasitic DO. Diaphragm can also be used for interferometer adjustment. If diaphragm surface has sufficient area, then the position and movement of autocollimating spots can be controlled using the second CCD camera VC2, installed in front of it [18]. This adjustment method is implemented in IF of FTI-100 type.

Interferometer with TF (see Fig. 1a) allows testing the surfaces only with low deviation from plane. In order to test the spherical surfaces, instead of TF the transmission sphere (TS) consisting of several lenses is installed; the output lens has high-quality aplanatic surface, which reflects the reference wavefront [19]. Currently, such TS with the field of 102 mm and 153 mm and aperture of $f/0.65$ are produced by many companies (Zygo, MPE, Marh etc.).

In order to test AS, the transmission spheres are complemented with wavefront correctors based on CGH. Hologram-corrector transforms the wavefront W_1 at TF output into the wavefront W_2 conjugated with the shape of AS as shown in Fig. 2a. This layout is widely used for AS testing [20]; however, it has disadvantage: the accuracy is always lower than the accuracy of flat or spherical surfaces testing. In particular, it is caused by the fact that CGH substrate is not included into the common path of IF, and therefore its error is added to the measurement result. Also, the accuracy of CGH alignment relative to IF and surface has essential role.

One of the ways for elimination of specified disadvantages consists in the application of so-called "combined computer-generated holograms" [14, 21]. Such holograms allow generating two and more independent wavefronts



На рис. 2b представлена схема контроля сферического или асферического объекта с помощью комбинированной СГ, работающей в параллельном пучке света [22]. Опорный плоский волновой фронт формируется при отражении от стороны А подложки. Сторона Б имеет небольшой клин и не влияет на работу схемы. Использование параллельного пучка света позволяет существенно упростить юстировку голограммы. В предложенной схеме подложка комбинированной СГ включена в общий ход световых пучков и ее неоднородности не влияют на точность измерения. Эталонные комбинированные СГ по техническим показателям превосходят обычные ЭО [14], а по стоимости они дешевле.

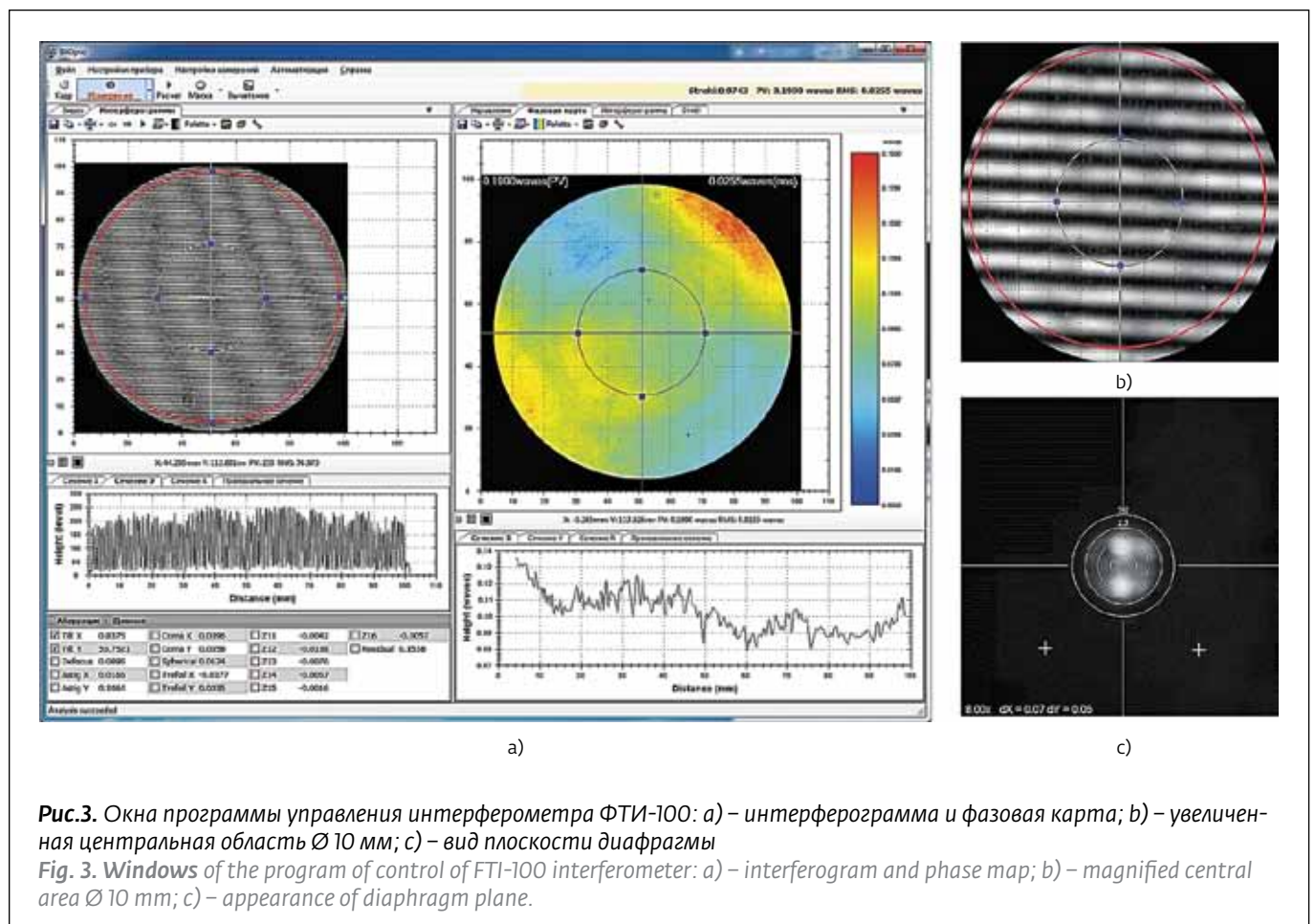
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ИФ

Для контроля прецизионных крупногабаритных зеркал требуются ИФ с высоким пространственным разрешением. Этот параметр на практике обычно определяется количеством интерференционных полос, регистрируемых видеокамерой прибора. Ряд современных ИФ позволяют регистрировать

using one element. In this case the need in TS or TF is eliminated. In Fig. 2b the layout of spherical or aspherical surface testing using the combined CGH operating in parallel beam is shown [22]. The reference flat wavefront is formed during the reflection from side A of substrate. Side B has low wedge and does not influence the measurements. Use of parallel beam significantly simplify the hologram alignment. In suggested layout, the substrate of combined CGH is included into the common path and its inhomogeneities have no effect on measurement accuracy. Combined CGHs exceed standard TS [14] by technical parameters and they are cheaper.

SPATIAL RESOLUTION OF IF

In order to test the precision large mirrors, IF with high spatial resolution are required. In practice, this parameter is usually determined by number of interference fringes recorded by the CCD camera. A number of modern IF allows recording more than 1000 fringes [23], and this fact makes it possible to perform AS test with quite large





свыше 1000 полос [23], что дает возможность проводить контроль формы АП с достаточно большим отклонением от ближайшей сферы. В этом случае диаметр d диафрагмы (см. рис. 1а) должен быть около ~ 8 мм. Однако работа с таким большим количеством полос нарушает принцип Физо (общий ход измерительного и опорного пучков), что, с одной стороны, приводит к снижению точности измерения (до $\lambda/4$ [24]) и требует калибровки, а с другой – увеличивает стоимость прибора из-за повышенных требований к качеству оптической системы.

Разумным компромиссом является использование сменных диафрагм, переключаемых по команде оператора. В одном из вариантов ИФ модели ФТИ-100 реализовано переключение сменных диафрагм от $d=1,2$ до 4,8 мм. На рис. 3 приведен пример рабочего окна интерферометра ФТИ-100 при контроле пластины $\varnothing 100$ мм. В левой части окна располагается зарегистрированная интерферограмма (на рис. 3а количество полос равно 110), график распределения интенсивности полос по оси Y , таблица aberrаций (коэффициентов полиномов Цернике), а в правой – фазовая карта (двух- или трехмерная). На рис. 3б показана увеличенная ($10\times$) интерферограмма центральной области ($\varnothing 10$ мм) контролируемой пластины. На рис. 3в представлено окно вспомогательной видеокамеры (ВК2, на рис. 1) при увеличении $8\times$. Хорошо видны автоколлимационные пятна измерительного и опорного пучков, которые формируют интерференционную картину. Центр сетки соответствует центру диафрагмы, а ее внешнее кольцо – угловому отклонению в 3 угловые минуты.

УПРАВЛЕНИЕ ПРИБОРОМ

Для обработки интерферограмм используется как универсальное (Durango [25], IntelliWave [26], Reveal [27] и др.) программное обеспечение (ПО), так и специализированное ПО (см. таблицу), интегрированное с прибором. Последний вариант более удобен, так как позволяет реализовать проведение серии измерений, вывод фазовой карты в реальном времени, автоматическую юстировку и все стандартные функции калибровки и настройки прибора.

Интерферометр осуществляет связь с компьютером по проводному или беспроводному соединению. Существует несколько вариантов. В первом варианте блок управления размещается в компьютере на специальной плате расширения (PCI, PCI Express), при этом видеокамеры подключаются отдельно по интерфейсам типа USB 3.0. или Camera Link. Во втором случае соединение интерферометра и управляющего компьютера через интерфейс

deviation from the nearest sphere. In this case the diaphragm diameter d (see Fig. 1a) must be about ~ 8 mm. However work with such great number of fringes violates the Fizeau principle (common path of test and reference beams), which, on one hand, results in the decrease of measurement accuracy (to $\lambda/4$ [24]) and requires calibration but, on the other hand, increases the device cost due to higher requirements to the quality of optical system.

Reasonable compromise includes the use of replaceable diaphragms switched by operator command. In one of the modifications of FTI-100 model, switching of replaceable diaphragms is implemented from $d=1.2$ to 4.8 mm. In Fig. 3 the example of operational window of interferometer FTI-100 is shown during the plate $\varnothing 100$ mm test. Recorded interferogram (in Fig. 3a number of fringes is equal to 110), the plot of fringes intensity distribution by Y axis, table of aberrations are located in left part of the window; the right part contains phase map (2 – or 3-dimensional). The magnified ($10\times$) interferogram of central area ($\varnothing 10$ mm) of plate under test is shown in Fig. 3b. The window of additional CCD camera (VC2, in Fig. 1) is shown in Fig. 3c with the magnitude $8\times$. Autocollimating spots of test and reference beams, which generate the interferogram, are well seen. The center of grid corresponds to the diaphragm center, and its outer ring – to angular deviation of 3 angular minutes.

DEVICE CONTROL

Universal (Durango [25], IntelliWave [26], Reveal [27] etc.) software (SW) and specialized SW integrated with the device are used for interferogram processing (see Table 1). The latter variant is more convenient because it allows implementing the series of measurements, displaying of phase map on a real-time basis, automatic adjustment and all standard functions of device calibration and setting.

Interferometer has communication with computer through wire or wireless connection. There are several possibilities. In the first variant, the control unit is located in computer on special expansion board (PCI, PCI Express); CCD cameras are connected separately by the interfaces of USB 3.0. or Camera Link type. In the second case, the connection of interferometer and controlling computer through the interface USB 2.0/3.0 has a number of advantages: high speed of data transmission and capability of

USB 2.0/3.0 обладает рядом преимуществ: высокая скорость передачи данных и возможность поддержки технологии PnP, что облегчает процедуру подключения прибора. Однако существенными недостатками USB являются ограничение на длину кабеля (это важно, если интерферометр размещается в "чистой комнате" или в недоступном месте) и низкая стабильность. В третьем варианте связи, который является прогрессивным, подключение интерферометра к компьютеру осуществляет сетевой интерфейс Gigabit Ethernet (GigE) спецификации 802.3ab. Он обеспечивает требуемую скорость передачи данных и в то же время лишен недостатков, связанных с ограничением длины кабеля и стабильности. Интерферометры, работающие по интерфейсу GigE, можно устанавливать на расстоянии до 100 м от оператора. Кроме того, интерферометры с GigE могут быть включены в корпоративную сеть, что позволяет организовать коллективный доступ. Таким образом, интерфейс GigE является наиболее универсальным и легко применим в условиях производства. Интерферометры типа ФТИ-100 оснащены интерфейсом GigE.

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

По своему назначению интерферометр предназначен для измерения отклонения формы поверхности от эталона. Однако оптическая схема ИФ (см. рис.1а) имеет много общего с автоколлиматором, который предназначен для измерения угла наклона контролируемой поверхности. Совмещение этих функций в одном приборе позволяет существенно расширить его функциональные возможности. В интерферометре ФТИ-100 изображение от вспомогательной видеокамеры (см. рис.3с) анализируется управляющим компьютером, который осуществляет поиск центров автоколлимационных пятен и вычисляет их смещение из исходного поло-

support of PnP technology, which makes the procedure of device connection easier. However, USB has significant disadvantages, which consist in the restriction of cable length (it is important if interferometer is located in "clean room" or inaccessible place) and low stability. In the third variant of communication, which is progressive, the connection of interferometer to computer is performed by the network interface Gigabit Ethernet (GigE) of 802.3ab specification. It provides required speed of data transmission, and at the same time it does not have disadvantages connected with the restriction of cable length and stability. Interferometers operating with GigE interface can be installed at the distance up to 100 m from operator. Besides, the interferometers with GigE can be included into the corporate network, which makes it possible to organize the multi-user access. Thus, GigE interface is the most universal and it can be easily applied under production conditions. Interferometers of FTI-100 type are equipped with GigE interface.

ENHANCEMENT OF FUNCTIONAL CAPABILITIES

By its intended purpose, interferometer is intended for the measurement of deviation of surface shape in comparison with standard. However, the optical layout of IF (see Fig. 1a) has much in common with the autocollimator, which is intended for the measurement of inclination angle of controlled surface. Combination of these functions in one device allows enhancing its functional capabilities considerably. In interferometer FTI-100 the image from additional CCD camera (see Fig. 3c) is analyzed by controlling computer, which performs the search of centers of autocollimating spots and calculates their shift from the initial position

жения по двум координатам (dx и dy , см. рис.3с). То есть в интерферометре реализована функция фотоэлектрического автоколлиматора, позволяющая проводить юстировку плоскости СГ [28]. На этапе юстировки вспомогательная видеокамера регистрирует излучение в виде двух пятен (от эталонной и от контролируемой поверхностей) в плоскости диафрагмы (см. рис.3с). При точной настройке интерферометра они должны проецироваться точно в центр диафрагмы и формировать интерферограмму с "бесконечной" полосой. Изображение этих световых пятен наблюдается оператором, а также передается в блок обработки изображения, где вычисляются координаты их центров и текущая погрешность наводки.

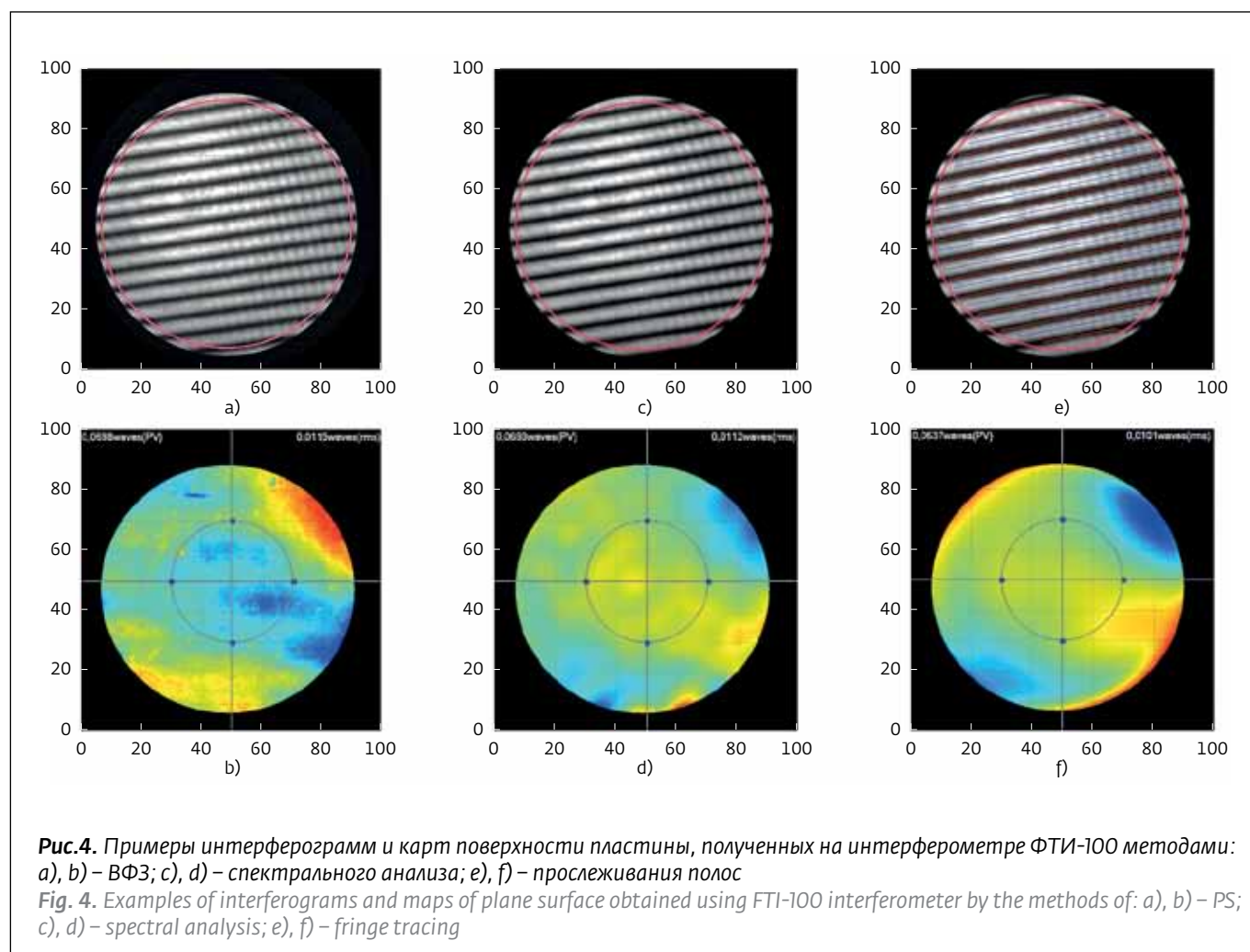
ОБРАБОТКА ИНТЕРФЕРОГРАММ

В интерферометре ФТИ-100 для восстановления формы волнового фронта и получения коэффициентов разложения по базису полиномов Цернике используются (по выбору оператора) метод

by two coordinates (dx and dy , see Fig. 3c). In other words, the function of photoelectric autocollimator, which allows performing adjustment of CGH surface, is implemented in interferometer [28]. At the stage of adjustment, the additional CCD camera records the image in the form of two spots (from reference and from surface under test) in diaphragm plane (see Fig. 3c). In case of accurate setting of interferometer they must be projected precisely at the diaphragm center and generate interferogram with "infinite" fringe. Image of these light spots is observed by operator and also it is sent to the unit of image processing where the coordinates of their centers and current error of pickup are calculated.

PROCESSING OF INTERFEROGRAMS

For calculation of wavefront shape and Zernike coefficients the method of phase shift (5 interferograms), method of SA based on Fourier



ВФЗ (пять интерферограмм), метод СА на основе преобразования Фурье и метод прослеживания интерференционных полос [29, 30]. Причем, алгоритмы ВФЗ могут быть самокалибрующимися [31]. Для увеличения точности восстановления формы волнового фронта при наличии турбулентности воздуха и вибраций предусмотрено автоматическое выполнение серии измерений с усреднением результатов.

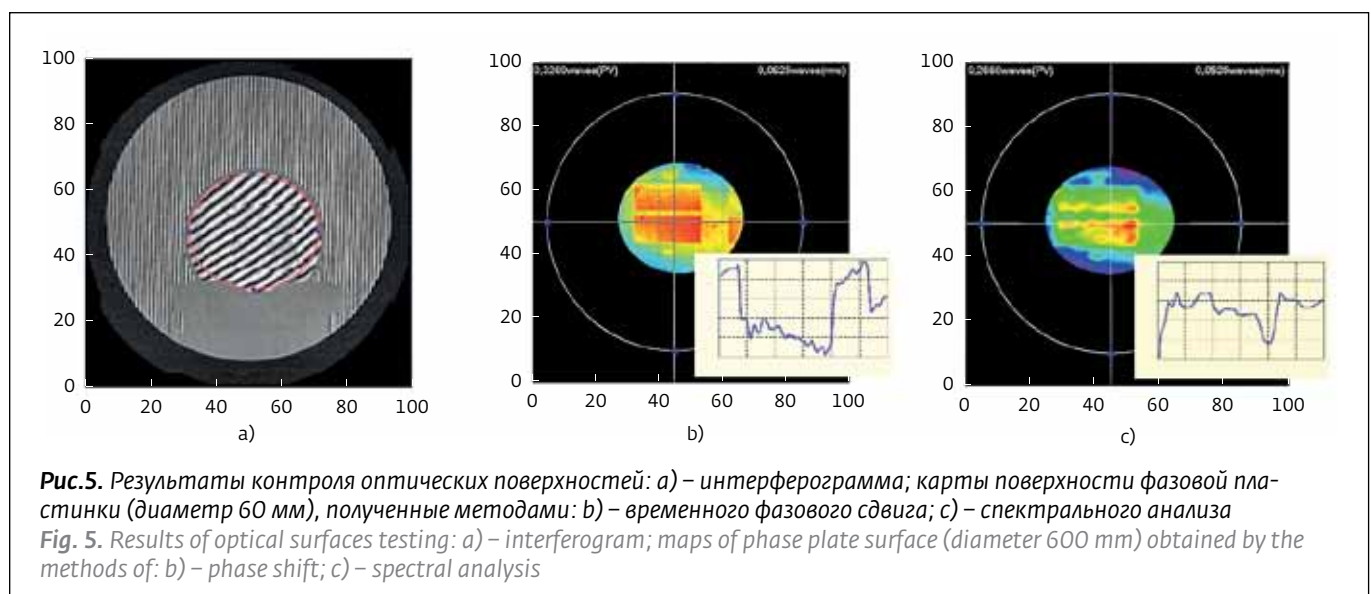
Точность измерений обычно ограничивается качеством ЭП или объективов или голограмм. ПО интерферометра ФТИ-100 позволяют вычитать из результатов измерений данные калибровки, что существенно увеличивает точность измерений. При этом основным параметром, характеризующим прибор, становится воспроизводимость результатов по серии из нескольких десятков измерений.

На рис.4 приведены примеры интерферограмм и карты поверхности контролируемой пластины диаметром 100 мм, полученные программой Diopto тремя методами. Хорошо видно, что метод ВФЗ дает лучшую детализацию формы поверхности (рис. 4b), вследствие чего значение PV больше, чем полученные другими методами (см. рис.4d, e), хотя их среднеквадратичные значения (rms) совпадают с погрешностью $\lambda/1000$. Преимущество метода ВФЗ хорошо демонстрирует пример интерферограммы и карт поверхности фазовой пластинки, приведенный на рис.5. Видно, что метод ВФЗ воспроизводит прямоугольную форму рельефа фазовой пластинки, в то время как метод спектрального анализа ее сглаживает, как показано на графиках (см. врезки на рис.5b, c).








transformation and method of tracking of interference fringes are used (at the option of operator) in interferometer FTI-100 [29, 30]. At the same time, PS algorithm can be self-calibrating [31]. In order to increase the accuracy of restoration of wavefront shape in case of the presence of air turbulence and vibrations, automatic carrying out of the series of measurements with result averaging is provided.

Accuracy of the measurements is usually limited by the quality of TF or TS, lenses or holograms. SW of the interferometer FTI-100 make it possible to subtract calibration data from measurement results, and this fact considerably enhances the measurement accuracy. The main parameter, which characterizes the device, includes the reproducibility of results in the series of several tens of measurements.

Examples of interferograms and maps of surface of controlled plate with the diameter of 100 mm obtained by Diopto program using three methods are shown in Fig. 4. It is seen that PS method gives better detailing of surface shape (Fig. 4b); as a result the value PV is higher than the values obtained by other methods (see Fig. 4d, e), although their root-mean-square (rms) values coincide with the error $\lambda/1000$. Advantage of PS method demonstrates the example of interferogram and maps of surface shown in Fig. 5. It is apparent that PS method reproduces the rectangular shape of phase plate profile, whereas the method of spectral analysis smoothes out its shape as shown in plots (see insertions in Fig. 5b, c).



Параметры серийных интерферометров типа Физо
Parameters of commercially available interferometers of Fizeau type

Параметры	Graham Optical Systems, MODEL 4HPS	ZYGO Inc., Verifire XPZ	Mahr GmbH MarSurf FI 1100Z	4D Technology, США, FizCam 2000	MÖLLER-WEDEL OPTICAL GmbH, Германия, VI-direct 100	ОПТОФАЗЕ, Франция, SILO 100AV	ЗАО Дифракция, Россия ФТИ-100PS
Изображение							
Лазер, нм	635,0	632,8	632,8	658,0	632,8	632,8	632,8
Разрешение в/к	768×494	640×480, 8 бит	1000×1000	1000×1000	1600×1200	1000×1000	1312×1082
Погрешность	–	–	1/100 λ PV	1/20 λ PV	1/20 λ PV	1/60 λ PV	1/200 λ PV
Воспроизводимость	1/1000 λ rms	1/1800 λ rms	1/5000 λ rms	1/1000 λ rms	1/300 λ rms	1/300 λ rms	1/1000 λ rms
Методы измерения	ВФЗ	ВФЗ	ВФЗ, СА	ОФЗ	СА	СА	ВФЗ, СА
Масса, кг	30	38	14	40	10	20	18
Габариты, см	50×35×21	69×31×34	34×19×25	72×42×23	60×15×15	55×36×18	49×20×27
Примерная цена, (FOB), тыс. долл.	100	80	72	120	30	40	32
Сайт	www.grahamoptical.com	www.zygo.com/?/met/interferometers/	www.esdimetrology.com/pdfs/MarSurf_FI_1100_Z_DS.pdf	www.4dtechnology.com/products/	www.moellerwedel-optical.com/	www.optophase.com/Copie%20de%20SILO_Interfero.html	www.diffraction.ru

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерферометры являются незаменимым инструментом при производстве и контроле прецизионных оптических и лазерных систем. Для эффективного применения интерферометров необходимо знать и понимать их особенности, области при-

CONCLUSIONS

Interferometers are irreplaceable instruments during the production and control of precision optical and laser systems. For the efficient application of interferometers it is necessary to know and understand their peculiarities,



менения и направления их совершенствования. В работе детально рассмотрена конфигурация интерферометра Физо, приведен обзор наиболее распространенных моделей, обсуждены в деталях характеристики и особенности их схем и тенденции развития. Основное внимание уделено применению СГ в схемах ИФ на примере прибора ФТИ-100. Представлен новый тип комбинированной СГ, позволяющей снизить погрешности контроля АП за счет устранения влияния неоднородностей подложки. Приведены результаты разработки ИФ с расширенными функциональными особенностями для высокоточного контроля оптических поверхностей. Предложенный ИФ сочетает в себе функции интерферометра и фотоэлектрического автоколлиматора, что позволяет с высокой точностью проводить юстировку эталонных СГ и автоматизировать процесс настройки. Разработано оригинальное программное обеспечение для управления прибором и анализа интерферограмм.

Авторы благодарят В.Г. Максимова, В.А. Тартаковского, С.А. Чудинова за разработку программного модуля POINT программы Dioptr управления интерферометром, А.Е. Качкина и Б.В. Драчкова за конструирование и изготовление интерферометра ФТИ-100.

application ranges and areas of their improvement. In this paper the configuration of Fizeau interferometer is considered in details, the review of the most common models is given, the characteristics and peculiarities of their layouts and development trends are discussed. The main focus is concentrated on the application of CGH in IF by the example of FTI-100. The new type of combined CGH is presented, which allows reducing the errors of AS test at the expense of elimination of the influence of substrate inhomogeneities. The results of development of IF with enhanced functional characteristics for high-accuracy optical surfaces test are given. Suggested IF combines the functions of interferometer and photoelectric autocollimator, which makes it possible to perform CGH alignment with high level of accuracy and automate the setting process. Original software is developed for device control and interferogram analysis.

Authors show appreciation to V.G.Maksimov, V.A.Tartakovsky, S.A.Chudinov for the development of software module POINT of Dioptr program for interferometer control, A.E.Kachkin and B.V.Drachkov for design and fabrication of interferometer FTI-100.



ЛИТЕРАТУРА

1. Малакара Д. Оптический производственный контроль. – М. Машиностроение, 1985.
2. Венедиктов В. Ю. Голографические датчики волнового фронта. – Фотоника, 2016, № 1, с.132–141.
3. Fairman P.S., Ward B.K., Oreb B.F., Farrant D.I., Y. Gilliland Y. et al. 300-mm-aperture phase-shifting Fizeau interferometer. – Opt. Eng., 1999, v.38, № 8, p.1371–1380.
4. Brock N., Hayes J., Kimbrough B., Millerd J., North-Morris M., Novak M., and Wyant J. C. – Dynamic interferometry. – Proc. SPIE, 2005, 5875, 58750F.
5. esdimetrology.com/w/marsurf-fi3100-vb
6. www.optotech.de/en/measuring/owi-100-eco-invers
7. Küchel Michael F. Interferometric measurement of rotationally symmetric aspheric surfaces. – Proc. SPIE, 2009, 7389, 738916.
8. Supranowitz C., McFee C., Murphy P. Asphere metrology using variable optical null technology. – Proc. SPIE, 2012, 8416, 841604.
9. Трегуб В.П., Агурок И.П., Горелик М.С., Духопел И.И., Скворцов Ю.С. Универсальный интерферометр ИКД-110. – ОМП, 1990, № 1, с.61–63.
10. www.optotl.ru/prod/interferometer
11. www.nightn.ru/files/products/files/interf/interf_ru.htm
12. www.vniiofi.ru/depart/m44/ifa-300.html
13. Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Хомутов В.Н. Лазерный интерферометр ФТИ-100. – Сборник трудов Научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013", конференция "СибОптика-2013", Новосибирск, 2013, вып.3, т.5, с. 25–31.
14. Poleshchuk A.G., Nasyrov R., Asfour J-M. Combined computer-generated hologram for testing steep aspheric surfaces. – Optics Express, 2009, 17, Issue 7, p.5420–5425.
15. Полещук А.Г., Насыров Р.К., Хомутов В.Н., Маточкин А.Е., Черкашин В.В. Интерферометр Физо с дифракционными эталонными сферами для контроля асферической оптики. – Сборник трудов 12-й МНК "Голография ЭКСПО-2015" (12–15 октября 2015 года, Казань, Россия), 2015, с. 172–175. – М.: Изд-во ООО "Голография-Сервис".
16. http://www.rp-photonics.com/bg/buy_interferometers.html?s=vbox
17. Burge H., Zhao C., Dubin M. Measurement of aspheric mirror segments using Fizeau interferometry with CGH correction. – Proc. of SPIE, 2010, v. 7739, p.773902.
18. Патент № 2432546 РФ. Интерферометр для контроля формы поверхности оптических деталей (Опубликован 27.10.2011) /Полещук А.Г. и Маточкин А.Е.
19. Smythe R. Practical aspects of modern interferometry for optical manufacturing quality control: Part 1. – Adv. Opt. Techn., 2012, v.1, p.59–64.
20. Полещук А.Г., Маточкин А.Е. Лазерные методы контроля асферической оптики. – Фотоника, 2011, №2, с.38–43.
21. Asfour J-M., Poleshchuk A.G. Asphere testing with a Fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram. – JOSA A, 2006, 23, № 1, p.172–178.
22. Патент № 2534435 РФ. Эталонный дифракционный оптический элемент (Варианты) / Полещук А.Г. (Опубл. 27.11.2014).
23. Groot P., Deck L. Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms. – Optics Letters, 1993, 18, Issue 17, p.1462–1464.
24. www.esdimetrology.com/pdfs/Mahr-ESDI_MarSurf-FI-2100-AS_OV.pdf
25. www.diffraction.com/durango_software.php
26. esdimetrology.com/w/intelliwave/
27. apre-inst.com/software/
28. Патент № 147271 РФ. Интерферометр для контроля формы и углового положения оптических поверхностей /Полещук А.Г. и Хомутов В.Н. (Опубл. 27.10.2014).
29. Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е., Черкашин В.В., Максимов В.Г., Тартаковский В.А. Лазерный интерференционный измерительный комплекс для высокоточного оптического контроля. – Сборник трудов IX МНК "Прикладная оптика", 2010, т.1, с.129–136 (<http://www.oop-ros.org/maket/part142>).
30. Максимов В.Г., Тартаковский В.А., Полещук А.Г., Маточкин А.Е., Насыров Р.К. Метод повышения точности восстановления волнового фронта по набору интерферограмм. – Автометрия, 2011, т. 47, № 6, с. 82–91.
31. Парпин М.А., Серегин Д.А. Алгоритм калибровки и расчета фазы при работе на интерферометре фазового сдвига. – Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения, 2012, вып. 1, с. 72–85.