

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-КАЛИБРОВОЧНАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ БОЛЬШЕПОЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ФИЗО

Д. А. НОВИКОВ*, С. Ю. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ*, Г. Н. ВИШНЯКОВ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия

**Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических
измерений, Москва, Россия, e-mail:moiseev@vniiofi.ru

Представлено описание измерительно-калибровочной установки для высокоточного оптического бесконтактного контроля на базе большепольной интерферометрии Физо, предназначенной для контроля отклонений от плоскостности прецизионных оптических поверхностей. Рассмотрено программное обеспечение, позволяющее восстанавливать форму оптической детали из интерферограмм.

Ключевые слова: большепольная интерферометрия Физо, метод фазовых шагов, отклонения от плоскостности.

The description of measurement and calibration installation for high-precision non-contact optical control based on Fizeau wide-field interferometry is presented. The unit is designed to control the flatness error of precision optical surfaces. The software allowing to restore the shape of the optical part by interferograms analysis is considered.

Key words: Fizeau wide-field interferometry, phase steps method, flatness error.

Большое количество точных измерений, роль которых в современной науке и технике быстро возрастает, выполняется с помощью оптических интерференционных методов. Их преимущество заключается в возможности контролировать качество поверхности без ее искажения (нарушения), которое может появиться в результате механического контакта [1].

Интерференционный метод основан на явлении интерференции между опорной и объектной волнами, отраженными от эталонной поверхности и от поверхности контролируемой детали. По возникающей

интерференционной картине определяется карта погрешностей волнового фронта, которые линейно соотносятся с погрешностями изготовления контролируемой поверхности [2].

В последние годы область применения интерференционных приборов значительно расширилась благодаря модернизации источников света (лазеров) и развитию электроники. Для контроля качества плоских поверхностей широко используются интерферометры Физо, так как схемы этих приборов относительно простые, и с их помощью можно контролировать поверхности диаметром 50 – 200 мм с погрешностью $\lambda/100$, где λ – длина волны используемого излучения [3, 4].

В настоящей работе приведены результаты разработки и исследования измерительно-калибровочной установки для высокоточного оптического бесконтактного контроля на базе большепольной интерферометрии Физо. Основными задачами при создании этой установки являлись оптимизация с целью уменьшения ее габаритных размеров и расширения сферы использования, а также разработка программного обеспечения (ПО), позволяющего автоматизировать весь цикл контроля и минимизировать время обработки интерферограмм.

Измерительно-калибровочная установка состоит из следующих основных частей: оптико-механического блока интерферометра, блока фазового сдвига, программного обеспечения расшифровки и обработки интерферограмм.

Оптико-механический блок построен на основе интерферометра Физо, основные схемы которого представлены на рис. 1, а, б [3, 4]. Чтобы уменьшить габаритные размеры установки была усовершенствована схема интерферометра в вертикальном исполнении с изломом оптической оси и добавлено специальное параболическое внеосевое зеркало диаметром 300 мм (рис. 1). Фокус зеркала совпадал с фокусом объектива рабочей ветви, что обеспечивало формирование плоского волнового фронта и полной засветки контролируемой детали. Упрощенная схема интерферометра приведена на рис. 2. В состав установки входит универсальное крепление, позволяющее контролировать оптические детали диаметром 50 – 300 мм. В качестве эталонной поверхности использовалось так называемое «жидкое» зеркало из специальной иммерсионной жидкости. Отклонение от плоскостности такого зеркала может быть меньше $\lambda/500$ – $\lambda/1000$. Оптический блок обеспечивает формирование коллимированного светового пучка диаметром 300 мм, прием, фильтрацию и устранение спекл-шумов

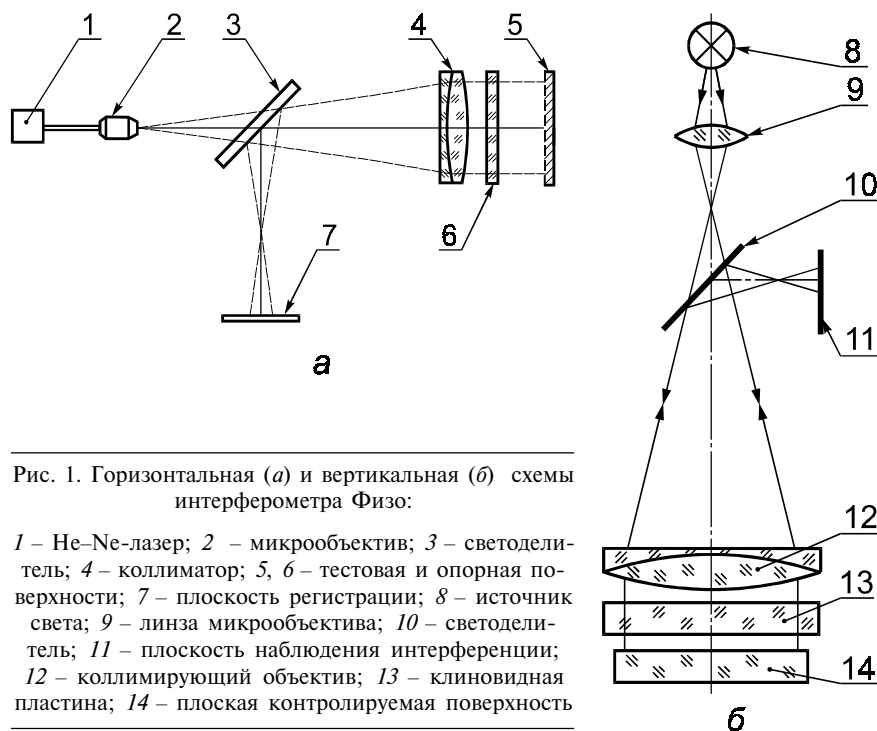


Рис. 1. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) схемы интерферометра Физо:

1 – He-Ne-лазер; 2 – микрообъектив; 3 – светоделитель; 4 – коллиматор; 5, 6 – тестовая и опорная поверхности; 7 – плоскость регистрации; 8 – источник света; 9 – линза микрообъектива; 10 – светоделитель; 11 – плоскость наблюдения интерференции; 12 – коллимирующий объектив; 13 – клиновидная пластина; 14 – плоская контролируемая поверхность

отраженного от контролируемого объекта светового пучка и угловую юстировку контролируемой поверхности.

Основные характеристики установки

Диапазон измеряемых диаметров 50 – 300 мм

Длина волны излучения лазера λ 0,658 мкм

Погрешность (RMS) $\lambda/120$.

Второй важный элемент установки – блок фазового сдвига, реализующий метод «фазовых шагов». Существующие методы интерференционных измерений формы волнового фронта можно разделить на два типа по количеству интерферограмм. Если имеется только одна интерферограмма, то это одна категория алгоритмов, если интерферограмм несколько – то другая. К первой категории относят алгоритмы Фурье, «скелетизации» полос, Фурье, ко второй – многочисленные

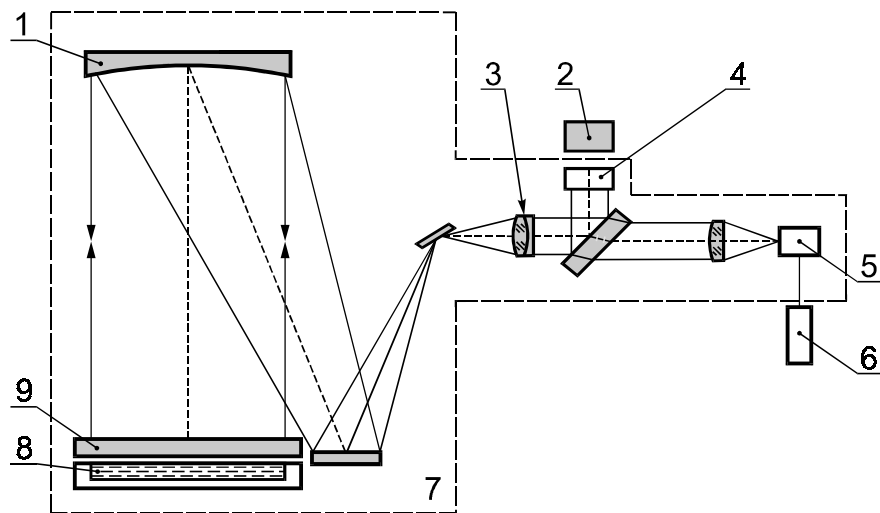


Рис. 2. Оптическая схема усовершенствованного интерферометра Физо:

1 – параболическое внеосевое зеркало; 2 – блок фазового сдвига; 3 – объектив рабочей ветви; 4 – лазерный диод, $\lambda = 0,658$; 5 – цифровая камера; 6 – компьютер с программным обеспечением; 7 – оптико-механический блок; 8 – иммерсионная жидкость; 9 – контролируемая деталь

алгоритмы «фазовых шагов» [5 – 8]. Алгоритмы первой категории требуют высокого качества интерферограмм, но при этом их точность недостаточно высока и ограничена, погрешность реконструкции формы волнового фронта не менее $\lambda/50$ [9 – 11].

Более высокая точность реконструкции (погрешность $\lambda/100$ и менее) достигается методом «фазовых шагов», реализованным в установке. Для его использования необходимо регистрировать несколько интерферограмм при различной разности оптической длины пути (разности хода) опорного и объектного каналов интерферометра.

Изменение оптической разности хода осуществляется следующими способами:

- механическим движением оптического элемента (поворотом плоскопараллельной пластины, смещением зеркала опорного канала и т. п.) с помощью, например, пьезопривода;
- вращением фазовой пластинки;

использованием фазовых акусто- или электрооптических модуляторов света;

изменением длины волны лазерного излучения.

Второй и третий методы трудоемкие и затратные. Механическое движение оптических элементов интерферометра должно быть очень точным и без наклона. Это условие трудно выполнимо для интерферометров с большой апертурой до 300 мм.

В установке был реализован четвертый способ. В блоке фазового сдвига происходит изменение рабочего тока, поступающего на лазерный диод, в результате чего изменяется длина волны излучения, что ведет к сдвигу интерференционных полос. Изменение рабочего тока осуществляется по командам компьютера. В течение процесса измерения компьютер считывает и обрабатывает 10 интерферограмм. Результат отображается в виде трехмерной карты волнового фронта.

Третий важный элемент установки – ПО, позволяющее обрабатывать и анализировать интерферограммы (рис. 3). Исходными данными для работы ПО служат интерферограмма и параметры обработки детали, а также параметры самой детали. Деталь характеризуется своей рабочей апертурой, конфигурация ее внешнего периметра может быть круглой, овальной, квадратной и многоугольной. После задания детали выполняется реконструкция фазовой картины по захваченным интерферограммам. Основным результатом работы ПО является топографическая

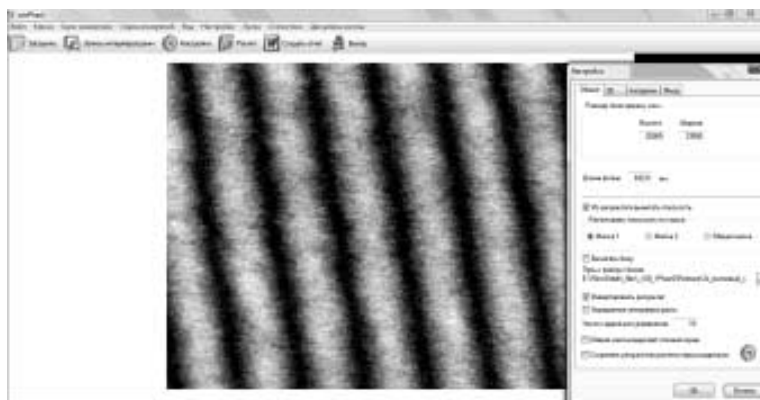


Рис. 3. Программное обеспечение для обработки интерферограмм

карта поверхности исследуемой детали относительно плоской опорной поверхности (рис. 4).

Для экспериментальных исследований метрологических характеристик рассматриваемой установки использовали меры отклонений от плоскостности диаметрами 200 и 300 мм.

Основные характеристики мер

Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерений отклонений от плоскостности для $\lambda=0,658$ мкм, не более
..... $\lambda/120$

Габаритные размеры меры, не менее

диаметр..... 200–300 мм

толщина..... 30–50 мм

Одно из зарегистрированных интерференционных изображений меры отклонений от плоскостности диаметром 300 мм показано на рис. 5, а реконструированная поверхность – на рис. 6. Среднее квадратическое отклонение составило 5,6 нм.

Были проведены по 10 циклов измерений с последующим усреднением для каждой меры на рассматриваемой установке и на автоматизированной фотоэлектрической установке на базе интерферометра Физо со специализированным программным обеспечением в составе ГЭТ 183–2010, результаты измерений приведены в таблице, а топографические карты поверхностей – на рис. 7.

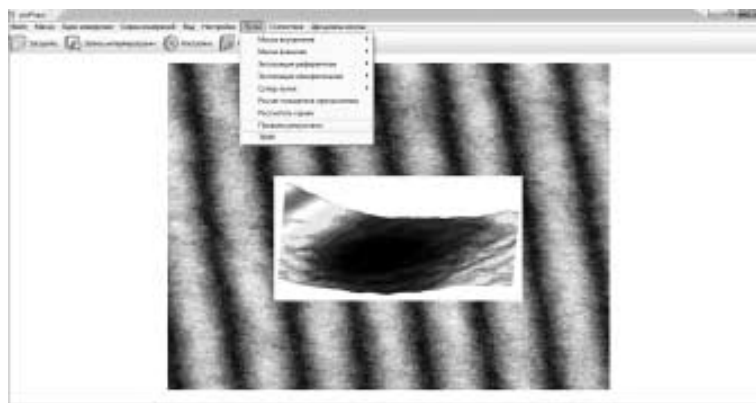


Рис. 4. Результаты обработки интерферограмм

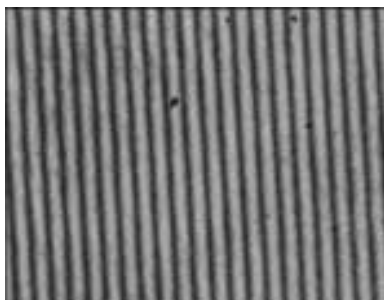


Рис. 5. Интерферограмма меры отклонений от плоскостности диаметром 300 мм, полученная на интерферометре Физо



Рис. 6. Восстановленная топограмма поверхности меры отклонений от плоскостности диаметром 300 мм

Из анализа экспериментальных данных можно сделать вывод, что изготовленная измерительно-калибровочная установка на базе большепольной интерферометрии Физо позволяет проводить измерения отклонений от плоскостности с погрешностью до $\lambda/120$, где $\lambda = 0,658$ нм.

Выводы. Разработана и изготовлена измерительно-калибровочная установка на базе большепольной интерферометрии Физо для высокоточного оптического контроля деталей диаметром до 300 мм с погрешностью $\lambda/120$. Усовершенствована оптическая схема установки. С целью уменьшения габаритных размеров прибора выбрана вертикальная схема интерферометра Физо с изломом оптической оси и добавлено внеосевое параболическое зеркало. В качестве эталонной поверхности использована поверхность иммерсионной жидкости, что позволило повысить качество контроля. Для автоматизации измерений и повышения качества обработки интерферограмм был создан электронный блок фазового сдвига, реализующий метод фазовых шагов и разработано программное обеспечение, позволяющее расшифровывать и анализировать интерферограммы. Прове-

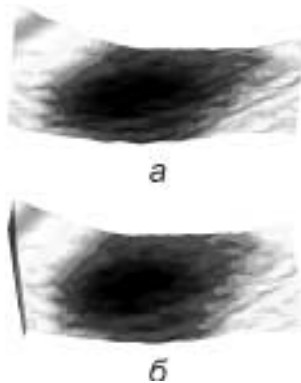


Рис. 7. Топографические карты поверхностей, полученные на измерительно-калибровочной (а) и автоматизированной фотоэлектрической (б) установках

Результаты экспериментальных исследований

Диаметр меры отклонений от плоскостности, мм	Отклонение от плоскостности, нм	
	измерительно-калибровочная установка	автоматизированная фотоэлектрическая установка в составе ГЭТ 183–2010
200	5,5	6,5
300	5,8	6,9

дены экспериментальные исследования, подтвердившие точностные характеристики установки.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (государственный контракт № 16.552.11.7049).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Кривовяз Л. М., Пуряев Д. Т., Знаменская М. А.** Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974.
2. **Малакара Д.** Оптический производственный контроль /Пер. с англ. Е. В. Мазуровой и др. М.: Машиностроение, 1985.
3. **Коломийцев Ю. В.** Интерферометры. М.: Машиностроение, 1976.
4. **Скоков И. В.** Оптические интерферометры. М.: Машиностроение, 1969.
5. **Cheng Y.-Y., Wyant J.** Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry //Appl.Opt. 1985. V. 2. N 18. P. 3049 – 3052.
6. **Creath K.** Phase-shifting speckle interferometry // Appl.Opt. 1985. V. 24. N 18. P. 3053 – 3058.
7. **Бекетова А. К. и др.** Топографическая интерферометрия фазовых объектов. М.: Наука, 1979.
8. **Ковалев А. А., Сухоруков К. А.** Восстановление формы волнового фронта при больших изменениях фазы //Измерительная техника. 2004. № 4. С. 17 – 19; **Kovalev A. A., Sukhorukov K. A.** Reconstruction of the Shape of a Wavefront in the Presence of Large Phase Changes //Measurement Techniques. 2004. V. 47. N 4. P. 343 – 347.
9. **Connes J.** Computing problems in fourier spectroscopy //Proc. Aspen Int. Conf. 1970. P. 83 – 116.
10. **Белл Р.** Введение в Фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975.
11. **Ценсор Я.** Методы реконструкции изображений, основанные на разложении в конечные ряды // ТИИЭР. 1983. Т. 71. № 3. С. 148 – 160.

Дата принятия 02.05.2011 г.