

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» (госконтракт № 16.552.11.7049 от 29.07.2011 г.).

Л и т е р а т у р а

1. **ISO/TR 14999-1:2005.** Optics and photonics. Interferometric measurement of optical elements and optical

systems. Part 1: Terms, definitions and fundamental relationships.

2. **ISO/TR 14999-2:2005.** Optics and photonics. Interferometric measurement of optical elements and optical systems. Part 2: Measurement and evaluation techniques.

3. **ISO/TR 14999-3:2005.** Optics and photonics. Interferometric measurement of optical elements and optical systems. Part 3: Calibration and validation of interferometric test equipment and measurements.

Дата принятия 02.05.2012 г.

543.46

Измерение радиуса кривизны и децентровки подложек лазерных зеркал на компьютерном интерференционном профилометре

Г. Н. ВИШНЯКОВ*, И. Ю. ЦЕЛЬМИНА**

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

**Раменский приборостроительный завод, Раменское, Россия

Рассмотрена методика измерения радиуса кривизны и децентровки подложек лазерных зеркал с использованием компьютерного интерференционного профилометра ПИК-30.

Ключевые слова: интерферометр Майкельсона, метод фазовых шагов, лазерное зеркало, радиус кривизны.

The method of measuring of curvature radius and decentering of laser mirrors base plates by interferometric computer profilometer PIK-30 is considered.

Key words: Michelson interferometer, phase steps method, laser mirror, curvature radius.

Оптический контроль — важная составляющая производства оптических изделий [1]. Наиболее востребованы измерения отклонений измеряемой оптической поверхности от плоскости или сферы. Например, совершенствование лазерных гироскопов ведет к повышению требований по точности изготовления зеркал резонатора кольцевого лазера. Специфика таких зеркал заключается в большом радиусе кривизны 2 — 10 м при небольшом размере (диаметр 10 — 30 мм). Важными контролируемыми параметрами зеркал являются радиус кривизны отражающей поверхности (обычно сферы) и децентровка, т. е. величина отклонения центра кривизны отражающей поверхности относительно центра самого зеркала.

Ранее для оптического контроля использовались интерференционные приборы визуального типа, например, отечественные интерферометры серии ИТ-40, ИТ-70, ИТ-100, ИТ-200, построенные по схеме Физо [2]. Данный тип интерферометров не был автоматизирован, поэтому точность измерения не превышала $\lambda/10$, где λ — длина волны используемого излучения. В последнее время появились отечественные интерферометры с цифровой расшифровкой интерферограмм — приборы, которые по одной или нескольким интерферограммам позволяют автоматически восстановить

топограмму измеряемой поверхности. Так автоматизированный интерферометр ИКД-110 (ООО «МТПК-ЛОМО», С.-Петербург) применяется для производственного контроля плоских и сферических деталей. Однако в данном приборе для автоматической расшифровки интерферограмм используется метод скелетизации, т. е. поиск центра полос с последующей интерполяцией, который ограничен по точности вычисления фазы величиной $\lambda/50$. В другом отечественном интерферометре ФТИ-100 (ЗАО «Дифракция», Новосибирск) для автоматической расшифровки интерферограмм широко используется более современный метод фазового сдвига [3]. В результате точность реконструкции фазы возрастает до $\lambda/100$. Современные импортные интерференционные приборы, например, фирмы ZYGO, все оснащены автоматическими системами расшифровки интерферограмм, поэтому обладают высокой точностью измерений, но, к сожалению, достаточно дороги.

Все это послужило поводом к разработке нового интерферометра, удовлетворяющего следующим требованиям: высокой точности измерения (более $\lambda/100$) параметров оптических элементов диаметром до 30 мм; автоматизации измерений; низкой чувствительностью к вибрациям; простым и легким в эксплуатации программным обеспечением; малыми габаритами.

После анализа возможных схем остановились на схеме интерферометра Майкельсона с механическим фазовым сдвигом для автоматической расшифровки интерферограмм. Такой прибор — профилометр интерференционный компьютерный ПИК-30 был разработан во ВНИИОФИ и внесен в Госреестр средств измерений под № 30003-08.

Настоящая статья посвящена описанию методики измерения радиуса кривизны и децентровки подложек лазерных зеркал на ПИК-30. Приведен порядок операций, обеспечивающих измерение радиуса кривизны оптической поверхности и ее децентровку относительно центра самой подложки интерференционным методом с использованием ПИК-30. Диаметр измеряемых подложек лазерных зеркал не превышает 30 мм, коэффициент отражения не менее 4 %.

Метод применим к сферам радиусом, превышающим несколько метров. В этом случае эталонной поверхностью может служить плоское зеркало, и интерференционная картина при правильной юстировке представляет собой совокупность концентрических колец.

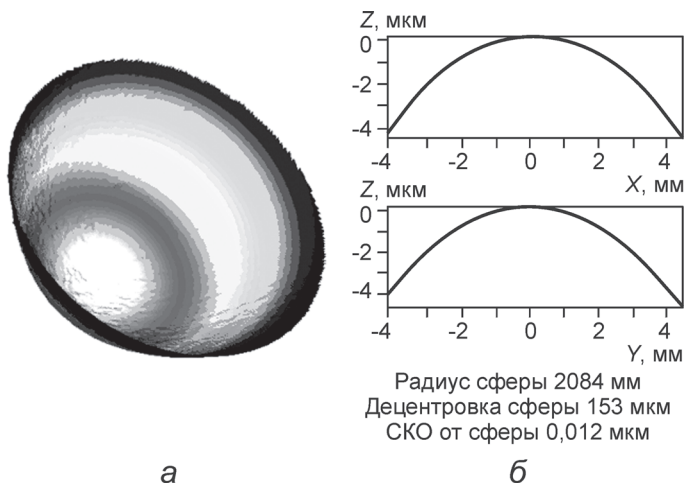


Рис. 1. Аксонометрическое изображение профиля поверхности сферического зеркала в псевдоцветах (а); центральные сечения (б)

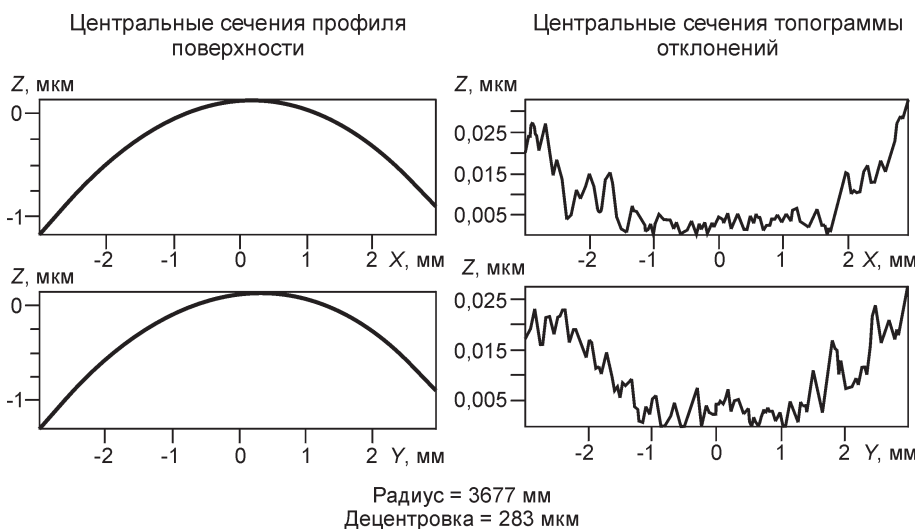


Рис. 2. Результаты измерений радиуса кривизны (3677 мм) и децентровки (285 мкм)

Расшифровка интерферограмм проводится методом фазовых шагов. В результате восстанавливается двумерная карта разности фаз $\varphi(x, y)$ между объектной и опорной волнами. Искомая разность высот $z(x, y)$ профиля исследуемой поверхности (топограмма) вычисляется по формуле

$$z(x, y) = \lambda \varphi(x, y) / (4\pi).$$

Измеренная топограмма поверхности подложки лазерного зеркала аппроксимируется сферической поверхностью по методу минимизации среднего квадратического отклонения (СКО). У полученной сферической поверхности вычисляют радиус кривизны R и центр кривизны — координаты точки с максимальным значением высоты z . По видеоизображению подложки лазерного зеркала находят координаты геометрического центра подложки. Децентровку d вычисляют как расстояние между геометрическим центром подложки лазерного зеркала и центром кривизны его сферической поверхности.

В качестве дополнительных параметров вычисляют предельное отклонение измеренной топограммы от сферической поверхности ΔZ_{max} и СКО от сферической поверхности σ .

В качестве характеристик погрешности измерений приняты границы пределов допускаемой погрешности измерений радиуса кривизны 50 мм и децентровки 0,1 мм; диапазоны измерений радиуса кривизны 2000 — 7000 мм и децентровки 0,1 — 5,0 мм.

Основное средство измерений — ПИК-30, вспомогательное оборудование и расходные материалы: плоскопараллельная пластина из набора ПМ-15 [4]; ложемент; промывочная система; термометр; иммерсионная жидкость; кисть художественная; вата; нефрас; деионизованная вода.

Перед измерениями проводят подготовку исследуемого объекта. Это вызвано тем, что измеряемые объекты изготовлены из прозрачного оптического материала (стекла, ситалла) и поверхности полированные. Поэтому при освещении такого объекта плоским пучком лазерного излучения возникают дополнительные отражения от нижней поверхности, что ведет к паразитным интерференционным полосам.

Для устранения этих полос необходимо на плоские участки измеряемой подложки зеркала (объекта), противоположные поверхности измерения, нанести равномерным тонким слоем иммерсионную жидкость.

Для калибровки профилометра используют прецизионную супергладкую плоскую пластину Zugo 1776-666-03 из карбида кремния, имеющую высокую плоскостность и шероховатость в нанодиапазоне ($PV = 0,5 \text{ нм}$, $\text{СКО} = 0,083 \text{ нм}$) или плоскопараллельные стеклянные пластины ПМ-15 с неплоскостностью измерительных плоскостей 0,07 μm . Для этого вначале записывается профиль поверхности (файл ошибки) пластины, несущий в себе фазовые aberrации оптической системы, который затем вычитается из результатов измерений.

На рис. 1 приведен пример аксонометрического изображения топограммы поверхности сферического зеркала в псевдоцветах, его центральные сечения, а на рис. 2 — форма протокола измерений параметров подложки лазерного зеркала.

Обработка результатов измерений проводится в соответствии с [5, 6] и включает следующие операции.

Определение пределов допускаемой абсолютной погрешности измерения R и d . Поскольку эта операция аналогична для обоих параметров подложек лазерных зеркал, далее будем использовать одно обозначение R .

Вначале необходимо найти среднее арифметическое значение $\bar{R}$ по измеренным значениям параметров подложек лазерных зеркал R_i по формуле

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i,$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ — номер измерения, $N = 10$ — количество измерений.

Далее вычисляют СКО среднего арифметического по формуле

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\bar{R} - R_i)^2}{N(N-1)}}.$$

Определяют доверительную границу случайной погрешности результата измерений с доверительной вероятностью 0,95 по формуле

$$\varepsilon = 2S.$$

Вычисляют значение доверительной границы неисклученной систематической погрешности (НСП) результата измерения по формуле

$$\theta = 1,1\Delta_{\text{ПМК}},$$

где $\Delta_{\text{ПМК}}$ — предел допускаемой абсолютной погрешности измерений ПИК-30, указанный в паспорте.

Вычисляют отношение θ/S :

если $\theta/S < 0,8$, то НСП пренебрегают и принимают в качестве погрешности результата измерения доверительную границу случайной погрешности ε ;

если $\theta/S > 8$, то СКО пренебрегают и принимают в качестве погрешности результата измерения доверительную границу НСП θ ;

если $0,8 \leq \theta/S \leq 8$, то доверительную границу погрешности результата измерений Δ для доверительной вероятности 0,95 вычисляют по формуле

$$\Delta = 0,76(\theta + \varepsilon).$$

Результат измерения параметров подложек лазерных зеркал представляют в виде $\bar{R} \pm \Delta$ при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 16.552.11.7049 от 29 июля 2011 г.).

Л и т е р а т у р а

1. **Оптический** производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985.
2. **Кривовяз Л. М., Пуряев Д. Т., Знаменская М. А.** Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974.
3. **Creath K.** Phase measurement interferometry techniques // Progress Opt. 1988. V. 26. P. 349—393.
4. **ГОСТ 1121—75.** Пластины плоскопараллельные стеклянные. Наборы. Технические условия.
5. **Р 50.2.038—2004.** ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений.
6. **ГОСТ 8.207—76.** ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

Дата принятия 02.05.2012 г.