

УДК 535.247

# Переносной измеритель шероховатости зеркальной поверхности

© 2019 г. Э. В. Кувалдин, канд. техн. наук

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

E-mail: ekuvaldin@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.02.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-05-78-81

Разработан переносной бесконтактный прибор для определения среднеквадратической высоты микронеровностей поверхности зеркал по светорассеянию. Прибор измеряет диффузную и зеркальную составляющие коэффициента отражения образца. Минимальная измеряемая высота микронеровностей составляет 2 нм. Масса оптического блока прибора — менее 1 кг.

**Ключевые слова:** измерения, коэффициент зеркального отражения, шероховатость, диффузная компонента.

**Код OCIS:** 120.0120

## ВВЕДЕНИЕ

В статье рассмотрено измерение среднеквадратической высоты микронеровностей поверхности оптических деталей методом светорассеяния падающего потока поверхностью образца. В книге [1] описана установка для измерения диффузного и зеркального коэффициентов отражения гладкой поверхностью. К такой поверхности относятся зеркала и поверхности оптических и хорошо обработанных механических деталей. Для этих измерений использовалась стационарная установка с фотометрическим шаром, в которой источником излучения был лазер с излучением длиной волны 633 нм.

В оптической схеме установки световой пучок от источника проходит через входное отверстие в фотометрический шар и через выходное отверстие шара падает на исследуемый образец, помещенный вплотную к отверстию шара. Зеркально отраженный образцом свет либо выходит из шара через третье отверстие и гасится в ловушке, либо попадает в шар при введенной заглушке этого отверстия. В первом случае освещенность стенок шара создается только потоком, диффузно отраженным от образца, во втором — полным отраженным потоком. В обоих случаях потоки измеряют фотоприемником, установленным снаружи шара вплотную к его стенке.

По формуле для гладкой поверхности зеркал [1] можно вычислить среднеквадратическую высоту микронеровностей  $h_{mr}$  измеряемой поверхности,

если предварительно измерить коэффициент отражения зеркала  $\rho$

$$h_{mr} = \lambda / \pi \cos \Psi (\rho_d / \rho_o)^{1/2} = \lambda / \pi \cos \Psi (I_d / I_o \rho_o)^{1/2}. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны излучения источника, используемого в приборе,  $\Psi$  — угол падения пучка излучения от нормали к поверхности,  $\rho_d$  — коэффициент диффузного отражения,  $\rho_o$  — коэффициент зеркального отражения измеряемой поверхности,  $I_d$  — интенсивность диффузно отраженного потока,  $I_o$  — интенсивность зеркально отраженного потока.

В установке интенсивности потоков  $I_d$  и  $I_o$  измеряются отдельно. Отсчет в каждом измерительном канале пропорционален интенсивности измеряемого потока с коэффициентами  $k_1$  — для канала зеркального отражения и  $k_2$  — для канала диффузного отражения. При этом формула для определения среднеквадратической высоты микронеровностей  $h_{mr}$  примет вид

$$h_{mr} = \lambda (k_2 n_2 / \rho_o k_1 n_1)^{1/2} / \pi \cos \Psi, \quad (2)$$

где  $n_1$  — отсчет по шкале прибора в канале зеркального отражения и  $n_2$  — отсчет по шкале прибора в канале диффузного отражения. Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  определяются по результатам калибровки установки. Отношение этих сигналов пропорционально степени рассеяния светового потока поверхностью измеряемого образца. Эта величина в свою очередь пропорциональна высоте

микронеровностей на поверхности измеряемого образца. Образец фиксируется относительно отверстия в шаре. Угол возможного отклонения отраженного луча от требуемого не превышает  $1-2^\circ$ . Это определяет расходимость зеркально отраженного потока.

Для измерения коэффициента отражения образца  $\rho$  на этой же установке в ее составе имеется дополнительный фотоприемник, устанавливаемый вместо ловушки. Установка на протяжении многих лет использовалась для контроля качества зеркал, изготавливаемых в ГОИ им. С.И. Вавилова. Рассматриваемая установка построена по одноканальной схеме и поэтому в процессе работы требует механического перемещения заслонки в шаре для измерения диффузного и полного отраженного потоков.

### БЛОК-СХЕМА ПРИБОРА

По принципу работы этой стационарной установки разработан переносной прибор накладного типа с бесконтактным способом проверки высококачественных зеркал, у которых коэффициент отражения близок к единице, а его диффузная составляющая мала по сравнению с зеркальной. В приборе применен двухканальный метод измерения, в котором измерения диффузной и зеркальной составляющих происходят одновременно, и после этого вычисляется их отношение. Прибор состоит из осветителя, фотометрической полусферы с входным и выходным отверстиями и отверстием для образца и световой ловушки (рис. 1). В осветителе используется синий светодиод и линза, формирующая световой пучок, а также система диафрагм для устранения рассеянного света в приборе. В ловушке имеется входная диафрагма, ослабитель из стекла марки НС и фотоприемник опорного канала. Радиус этой входной диафрагмы определяет нижний предел диапазона углов рассеяния света от поверхности. По соображениям удобства юстировки он составляет обычно  $1-2^\circ$ .

Осветитель формирует узкий пучок света диаметром 6 мм, который зеркально отражается от образца и попадает в ловушку. Небольшая часть светового потока, прошедшая через светофильтр ловушки, попадает на фотоприемник опорного канала, сигнал с которого пропорционален зеркальной составляющей отраженного потока. Сигнал с фотоприемника, прислоненного к фотометрической полусфере, пропорционален диффузной составляющей отраженного от образца потока излучения. Применение полусферы вместо шара позволяет уменьшить габариты прибора и более удобно расположить его отдельные узлы. Прибор работает в импульсном режиме и не требует затемненного помещения. Результаты измерения могут передаваться в компьютер через USB порт.

Узел электронной обработки информации [2] (рис. 2) включает в себя формирователь 1 импульса запуска светодиода 2, фотоприемное устройство основного и опорного каналов 3, масштабные усилители 5, электронный блок микропроцессорной обработки информации 7 с выходом на внешний компьютер 8. В состав электронного блока микропроцессорной обработки информации входит PIC процессор, цифровой жидкокристаллический индикатор, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и аналоговый коммутатор на 2 входа, обеспечивающий поочередное измерение сигналов с выходов масштабных усилителей основного и опорного каналов. С целью увеличения отношения сигнала к шуму в масштабном усилителе приемного канала сужена полоса пропускания со стороны верхних и нижних частот. Это привело к интегрированию и дифференцированию электрического импульса на входе АЦП (рис. 3). Форма импульса искажена. Для измерения максимального значения в импульсе необходимо ввести задержку момента измерения относительно начала светового импульса. Задержка обеспечивается схемой управления в формирователе 1 (рис. 2). Сигнал на входе АЦП затянута относительно светового импульса. Измерение начинается после окончания светового импульса, что уменьшает электрические наводки на усилитель. Основные технические параметры и характеристики прибора приведены в таблице.

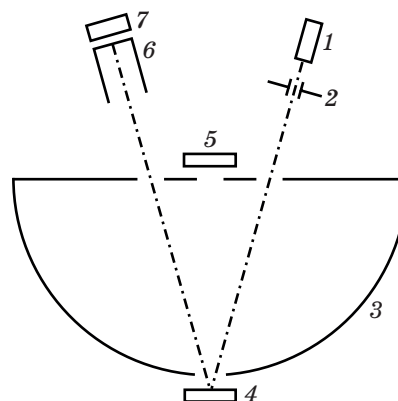


Рис. 1. Оптическая схема прибора. 1 — светодиодный излучатель, 2 — диафрагма, 3 — фотометрическая полусфера, 4 — исследуемый образец, 5 — приемник излучения, 6 — ловушка, 7 — приемник юстировочного канала.

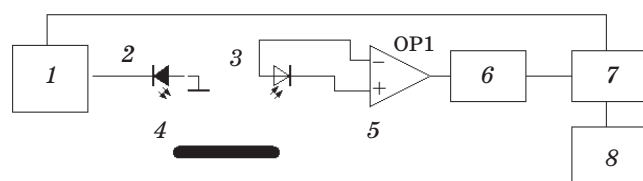
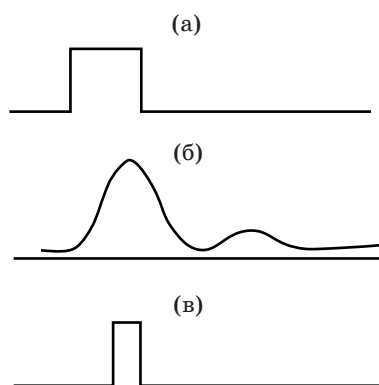


Рис. 2. Функциональная схема прибора. 1 — схема управления, 2 — излучающий светодиод, 3 — фотодиод, 4 — испытуемый образец, 5 — усилитель, 6 — АЦП, 7 — микропроцессор, 8 — компьютер.



**Рис. 3.** Формы импульсов напряжения источника питания светодиода (а), сигнала с фотоприемного устройства (б), формирователя импульса времени измерения (в).

### Характеристики прибора

Диапазон измерений коэффициента диффузно-го отражения	от 1 до $1 \times 10^{-4}$ с дискретностью отсчета $1 \times 10^{-4}$
Минимальная измеряемая высота микронеровностей, нм	2
Геометрия измерения	угол наблюдения и угол освещения $15^\circ$ расходимость пучка освещения не более 2
Скорость измерения, с	время индикации — 2, пауза между измерениями — 2
Пределы допускаемого значения относительной погрешности, %	при измерении коэффициента диффузного отражения $\pm 1$
Отсчет	цифровой, 3 значащие цифры
Источник излучения	светодиод синего свечения с длиной волны в максимуме 470 нм
Фотоприемник	кремниевый фотодиод, скорректированный под спектр источника излучения

### КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА

Прибор выполнен в двух блоках — оптический блок и блок регистрации и питания (рис. 4). Размеры оптического блока  $200 \times 110 \times 115$  мм, масса не более 1 кг. Блок регистрации и питания имеет размеры  $200 \times 125 \times 75$  мм, масса не более 1,5 кг. Питание осуществляется от встроенного аккумулятора напряжением 12 В и емкостью 1 А час. В комплекте прибора имеется зарядное устройство аккумуля-

лятора от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Блоки соединены между собой гибким кабелем диаметром 7 мм и длиной 1,3 м.

В случае измерения плоских образцов прибор устанавливается над измеряемым образцом на ножках. Длина соединительного кабеля и небольшая масса оптической части прибора позволяют его устанавливать в различные места над зеркалами диаметром до 2,5 м. Ножки в приборе съемные, что позволяет проводить измерение вогнутых образцов. Радиус кривизны образцов ограничен радиусом кривизны полусферы прибора, который соответствует 40 мм.

В процессе сборки прибора его юстировка проводилась в два этапа. На первом этапе подбиралось положение линзы осветителя для получения максимальной длины пучка лучей, укладываемых в диаметр 6–7 мм. При этом также подбирались расположение и размер диафрагмы, убирающей рассеянный свет. На втором этапе осветитель выставлялся относительно отверстия в шаре так, чтобы пятно было в центре отверстия на расстоянии от него в 3 мм, т.е. на поверхности измеряемого образца. Далее наклонами прибора выбиралось такое положение, чтобы отраженный от образца луч попадал в центр отверстия ловушки.

Настройка электрической схемы прибора заключалась помимо выставления рабочих режимов всех узлов прибора еще и в подборе времени задержки запуска АЦП относительно момента подачи напряжения на светодиод и длительности импульса излучения светодиода. Последняя составляет 2 мс при частоте повторения импульсов 5–7 Гц. Задержка начала измерения относительно подачи импульса на светодиод составляет 2 мс. Она необходима для получения установившегося режима измеряемого сигнала.

В процессе доводки прибора выяснилось, что нужно ограничить ток через светодиод до такого значения, при котором не происходит его деградация.



**Рис. 4.** Внешний вид прибора.

Это значение соответствует 200 мА в импульсе. Уменьшение тока относительно расчетного значения требует увеличения чувствительности приемного канала диффузного отражения для получения требуемого предела измерения. Испытания прибора проводились на имеющихся в распоряжении зеркалах высокого качества и на эталонных образцах механической обработки поверхностей (стальные пластины с выраженным направлением следа от режущего инструмента). В последнем случае явно различались результаты измерений при установке образца вдоль штрихов и поперек. Чувствительность прибора достаточна для измерения неровностей поверхности зеркал самого высокого качества.

При подготовке к работе включают прибор и направляют излучение источника, выходящее из входного отверстия прибора, в сторону мало освещенной части помещения так, чтобы выходящий световой пучок не попадал на посторонние предметы, находящиеся ближе 0,5 м от прибора. Снимают отсчет  $n_0$  во втором канале прибора, соответствующий нулевым показаниям прибора. Устанавливают прибор на подставку с эталонным образцом и убеждаются в том, что имеются показания в обоих каналах. При отсутствии показаний в канале зеркального отражения немного наклоняют прибор (примерно 1–3°) до появления показаний в первом канале. При выставленном положении прибора его калибруют, для чего изменяют чувствительность второго канала так, чтобы отсчет в нем соответствовал коэффициенту диффузного отражения эталонного образца, указанного в его сертификате. Конструктивно в приборе угол  $\Psi = 15^\circ$  и, соответственно,  $\cos\Psi = 0,94$ ,  $\lambda = 470$  нм. Подставляя эти значения в формулу (2) получаем  $h_{\text{mr}} = 160[(n_2 - n_0)/(n_1 - n_0)]^{1/2}$ . Поскольку у измеряемых хороших зеркал  $n_1$  близок к единице, формула принимает вид  $h_{\text{mr}} = 160(n_2 - n_0)^{1/2}$  (3). В последнем случае калибровку можно проводить только по эталонному образцу диффузного отражения, тогда среднеквадратическая высота микронеровностей измеряемых образцов зеркал будет вычисляться по формуле

$$h_{\text{mr}} = 160[(n_2 - n_0)/n_d]^{1/2}. \quad (4)$$

Здесь  $n_d$  — коэффициент диффузного отражения эталонного образца, указанный в его сертификате, и  $n_2$  — отсчет во втором канале прибора при измерении светорассеяния реальных зеркал,  $n_0$  — нулевой отсчет по прибору при отсутствии зеркала перед входным отверстием прибора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Топорец А.С.* Оптика шероховатой поверхности. М.: Машиностроение, 1988. 191 с.
2. *Кувалдин Э.В.* Дистанционный и контактный приборы диагностики состояния растений // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 11. С. 71–80.

## ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

Определение погрешности измерения осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 50.2.038-2004 (ГСИ). Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений).

Погрешность измерения среднеквадратической высоты микронеровностей включает следующие составляющие:

- неопределенность снятия отсчетов  $n_0$ ,  $n_2$  и  $n_d$  ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ),
- систематическую погрешность калибровки  $n_d$  ( $\delta$ ).

### Неопределенность снятия отсчетов

Неопределенность снятия отсчетов  $n_0$ ,  $n_2$  и  $n_d$  составляет  $\pm 1$  деление при общем числе делений 4096. Систематическая неисключенная погрешность калибровки эталонного белого образца  $\delta$  составляет  $\pm 0,5\%$  и  $\pm 1\%$  для черного или серого образцов.

### Оценивание погрешностей и неопределенностей

Результирующая неопределенность  $\Theta(0,95) = 1,1(\theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_3^2)^{1/2}$ . При подстановке приведенных выше значений получают  $\Theta = 0,03\%$ . Это приведенная к верхнему пределу относительная погрешность измерения. Она будет заметно влиять на результат измерения малых коэффициентов отражения. При результатах измерения, близких к верхнему пределу измерения, общую погрешность определяет систематическая неисключенная составляющая погрешности эталонного образца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений переносным прибором накладного типа с бесконтактным способом проверки высококачественных зеркал, у которых коэффициент отражения близок к единице и его диффузная составляющая мала по сравнению с зеркальной, сравнивались с измерениями механическим профилометром. Показания прибора были в два раза больше. Профилометр за несколько часов работы перемещается на 0,1 мм. Представленный в работе прибор сразу измеряет круг диаметром 6 мм, в который попадают отдельные точечные дефекты обработки поверхности образца, которые в значительной степени определяют результаты измерения методом светорассеяния. Профилометр не всегда попадает на эти дефекты. Этим можно объяснить расхождение результатов измерений.