

НОВЫЕ СПОСОБЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

NEW METHODS FOR PRECISE MEASURING OF REFLECTION FACTOR

С. Ю. Головкин, В. Н. Деркач, В. Ю. Добикова, В. О. Лащук, Д. В. Сизмин, В. А. Щеников
S. Yu. Golovkin, V. N. Derkach, V. Yu. Dobikova, V. O. Laschuk, D. V. Sizmin, V. A. Schenikov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ИЛФИ, г. Саров

FSUE «RFNC-VNIIEF», ILFI, Sarov

Разработаны способы измерений коэффициентов отражения зеркальных покрытий оптических деталей, основанные на принципах многократного отражения излучения от измеряемой поверхности [1] и контроля величин регистрируемых сигналов [Заявка на патент RU 2017130739. Способ определения коэффициентов отражения или пропускания оптических деталей]. Проведены тестовые измерения образцов.

Предложенные способы измерений обеспечивают погрешность измерений коэффициента отражения $\leq 0,1\%$ и, при условии их применения совместно, $\leq 0,01\%$. Ведется работа по интеграции способов в состав стенда входного контроля оптических покрытий по коэффициенту отражения для национальной лазерной установки мегаджоульного уровня энергии.

The methods for measuring reflection factor have been developed. They are based on the multiple reflection of radiation from the measured surface [1] and the control of recorded signal values [Application for patent RU 2017130739. The method for determining reflection or transmission factors of optical parts]. The samples were measured when testing.

Suggested methods ensure the measurement error of the reflection factor $\leq 0,1\%$ and in case of combined methods application $\leq 0,01\%$. The integration work of methods in the measuring bench structure for the National laser facility with the megajoule energy level is in progress.

Введение

Мощные лазерные установки [2–4] имеют несколько тысяч крупногабаритных оптических компонентов. Одним из условий для достижения мощностных и энергетических параметров является выполнение требований к покрытиям оптических элементов. Поэтому задача аттестации покрытий по коэффициенту отражения на соответствие требованиям технических заданий актуальна и является частью процедур входного контроля оптических деталей.

Целями данной работы являлись разработка и испытание способов измерений, основанных на принципах контроля величин регистрируемых сигналов и многократного отражения излучения от измеряемой поверхности с абсолютной погрешностью $\leq 0,1\%$.

Измерение неоднородности покрытия

Измерение неоднородности покрытия является важным с точки зрения входного контроля. По-

крытие аттестуется полноразмерным поляризованным пучком, размеры которого в поперечном сечении составляют (400×400) мм². Для формулировки требований к устройству схемы аттестации были проведены специальные расчетные исследования, которые показали, что неоднородность покрытия связана с локальным нарушением толщины слоя (слоев), что приводит к нарушению условия фазировки и изменению коэффициента отражения. Результаты одного из таких расчетов для случаев расстройки толщин слоев в пределах $\pm 2\%$ представлены на рис. 1.

Неоднородность более выражена при отстройке от расчетных условий (угол падения, длина волны излучения) и в p -поляризации. Таким образом, схему аттестации покрытий на предмет неоднородности можно делать стационарной и не производить ее подстройку под условия испытаний покрытия, согласно КД. Принципиальное устройство схемы измерений представлено на рис. 2, а, результат измерения неоднородности одного из зеркал, полученный при проведении измерений по представленной схеме, – на рис. 2, б.

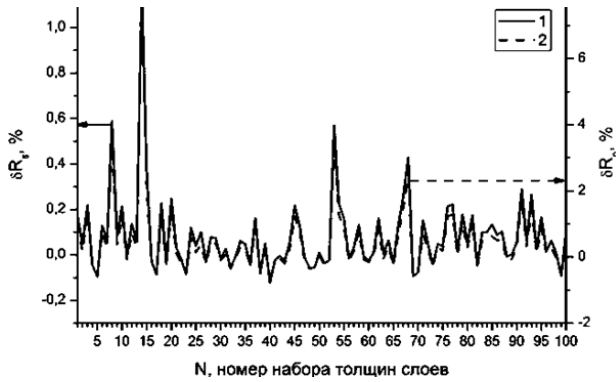


Рис. 1. Относительное изменение коэффициента отражения покрытия для нерасчетного угла падения излучения (30°): 1 – s-поляризация, 2 – p-поляризация

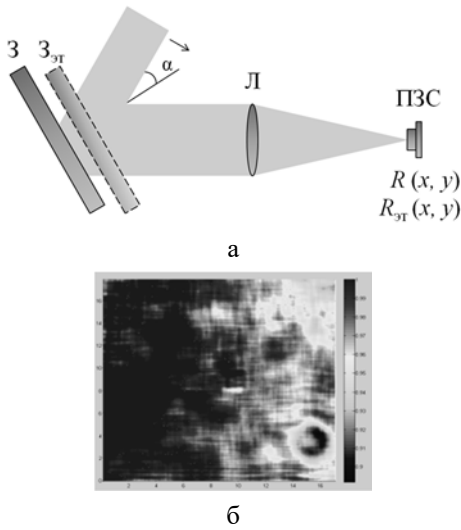


Рис. 2. Схема измерения неоднородности покрытия (а) и 2D распределение коэффициента отражения для одного из тестируемых зеркал (б): Z и $Z_{эт}$ – измеряемое и эталонное зеркала, Л – линза, ПЗС – прибор с зарядовой связью

Традиционные способы измерений

После получения карты покрытия с 2D распределением коэффициента отражения переходим к непосредственному измерению коэффициента отражения в прицельных координатах. Один из способов измерений зеркала представлен на рис. 3.

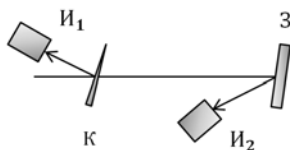


Рис. 3. Способ измерения коэффициента отражения Z – измеряемое зеркало; I_1 – канал регистрации для контроля потока излучения, поступающего в схему; I_2 – для контроля потока излучения, отраженного от измеряемого элемента; К – светоделительный клин

Коэффициент отражения зеркала, измеряемого по представленной схеме, определяется выражением: $R = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}$.

Погрешность измерения определяется сложением погрешностей измерения мощностей сигналов и не может быть уменьшена (или исключена) статистически.

При характерных значения относительной погрешности измерения регистрирующих приборов $|\delta P_1| = |\delta P_2| = 3\%$; $\delta R = |\delta P_1| + |\delta P_2| = 6\%$.

Контроль погрешности измерений

Перспективным для проведения измерений коэффициентов отражения с высокой точностью представляется способ, принципиальная схема которого представлена на рис. 4.

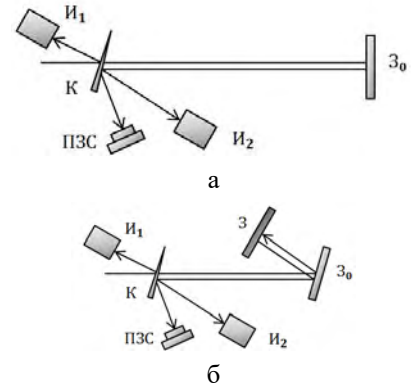


Рис. 4. Схема измерений с двукратным отражением излучения

На первом этапе (рис. 4, а) измерения осуществляют без аттестуемой детали. На втором этапе, в соответствии с рис. 4, б, в тракт под нужным углом помещается измеряемая деталь Z , а вспомогательное зеркало Z_0 переносится с сохранением оптического пути и угловой ориентации по отношению к падающему излучению так, чтобы зеркало Z отражало излучение дважды.

Коэффициент отражения измеряемого зеркала определяется выражением:

$$R = \sqrt{\frac{P'_2}{P_2} \cdot \frac{P_1}{P'_1}}$$

где P_1 и P_2 – мощности измеряемых сигналов в первом и втором каналах регистрации на этапе без измеряемого элемента, P'_1 и P'_2 – на этапе с измеряемым элементом.

В приближении малого изменения сигналов в процессе измерений погрешность нахождения коэффициента отражения можно свести к виду:

$$\delta R_i = \delta P \left| \frac{\Delta_1}{P_1} + \frac{\Delta_2}{P_2} \right|,$$

где δP – погрешность измерения мощности, $\frac{\Delta_1}{P_1}$ и $\frac{\Delta_2}{P_2}$ – относительное изменение регистрируемых сигналов на разных этапах измерения.

Ключевым моментом для реализации данного подхода является исключение систематической погрешности измерения каждого сигнала. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы изменение сигналов между этапами было минимальным, например, $\Delta_1/P_1 \leq 10^{-2}$, $\Delta_2/P_2 \leq 10^{-2}$ (для $R \geq 99\%$). При этом можно ожидать снижения погрешности измерения глухих зеркал до 0,1 %.

Другим важным условием является обеспечение однозначности попадания излучения на регистратор при изменении и переюстировке схемы на разных этапах, для чего в схему измерения вводится ПЗС-камера. Это связано с неоднородно-

стью чувствительности приемного элемента в поперечном сечении.

На рис. 5 и 6 представлены результаты измерений переходной характеристики и неоднородности чувствительности приемного элемента.

Вопрос стабилизации мощности источника излучения важен с той точки зрения, что оцифровка сигналов в разных каналах измерения не является одновременной. В результате погрешность измерения определяется интегральными характеристиками накапливаемых сигналов. На рис. 7 представлены данные по отличию сигнала, измеряемого на основании выборки из 100 отсчетов, от «истинного» сигнала при разных средних квадратических отклонениях мощности принимаемого излучения.

Как видно из рис. 7, для устранения зависимости измерений от флуктуации мощности достаточно ее стабилизация на уровне 10^{-5} .

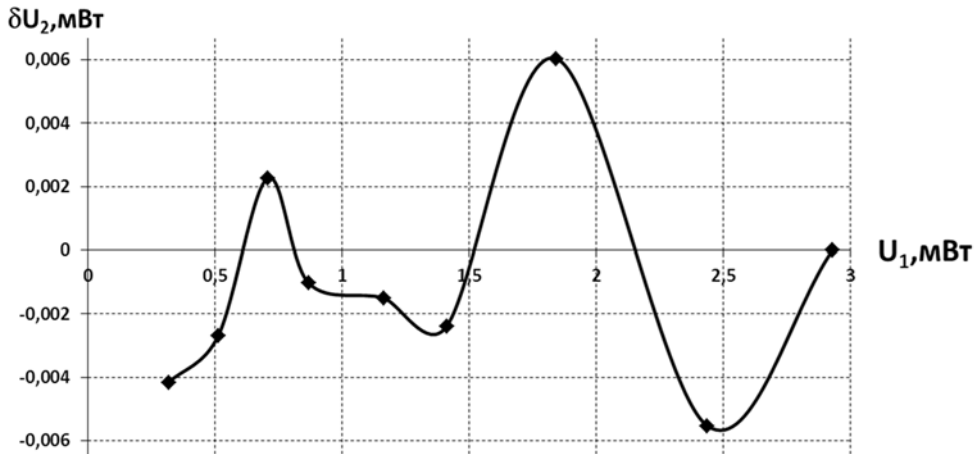


Рис. 5. Передаточная функция датчика ОРНІR PD300-1W на длине волны 527 нм относительно линейной аппроксимации на шкале измерения до 3 мВт

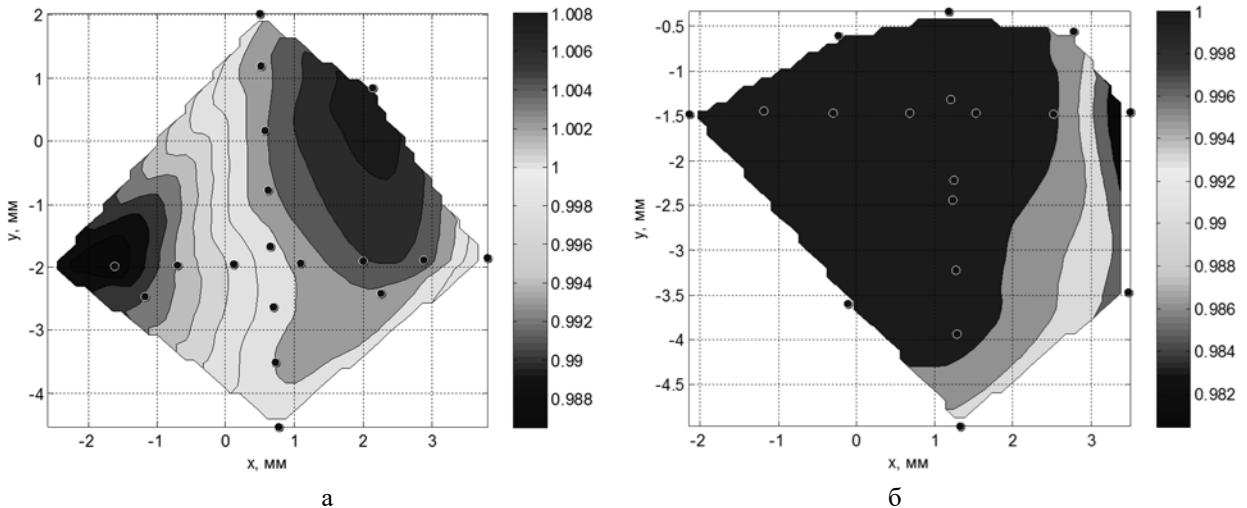


Рис. 6. Зависимость значения нормированного сигнала от поперечного попадания пучка на приемную площадку прибора для пучков размерами 1,1 мм (а) и 2,26 мм (б)

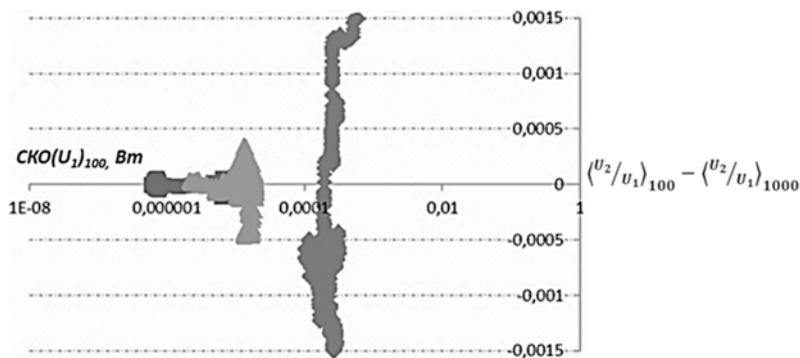


Рис. 7. Зависимость дисперсии результатов измерения нормированного сигнала от флуктуации мощности: черные точки – $\lambda = 527$ нм, шкала 3 мВт, $\langle U_1 \rangle_{N_m} \cong 2,743$ мВт, $\langle U_2 \rangle_{N_m} \cong 2,310$ мВт; серые – $\lambda = 1054$ нм, шкала 3 мВт, $\langle U_1 \rangle_{N_m} \cong 2,852$ мВт, $\langle U_2 \rangle_{N_m} \cong 2,386$ мВт; темно-серые – $\lambda = 1054$ нм, шкала 30 мВт, $\langle U_1 \rangle_{N_m} \cong 28,51$ мВт, $\langle U_2 \rangle_{N_m} \cong 13,36$ мВт

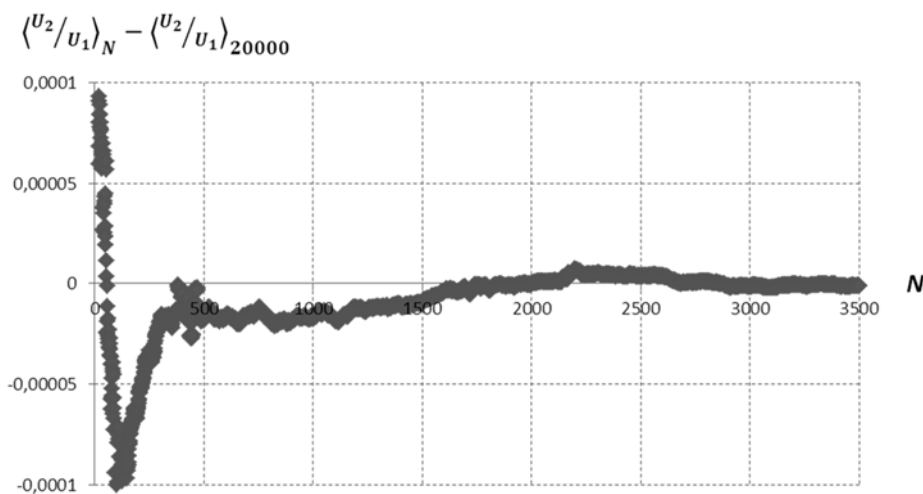


Рис. 8. Зависимость изменения нормированной мощности от количества отсчетов: длина волны 0,527 мкм, $\langle U_1 \rangle_{1000} = 2,7293$ мВт, $\langle U_2 \rangle_{1000} = 2,2281$ мВт

На рис. 8 представлена зависимость изменения нормированной мощности от количества отсчетов.

Из рис. 8 видно, что для устранения зависимости результатов измерения от флуктуации мощности достаточно стабилизация на уровне 10^{-5} при количестве отсчетов $2 \cdot 10^2$.

Введение эталонной оптической детали

Как было показано в предыдущей главе данной работы, подход с контролем величин сигналов возможно реализовать только при условии слабого изменения сигналов при переходе на второй этап измерения, т. е. для глухих зеркал. Следовательно, чтобы унифицировать способ измерений для широкого спектра зеркальных покрытий, необходимо на этапе без аттестуемой детали ввести оптический эталонный элемент Φ , пропускание которого

равно потерям за счет двукратного отражения от измеряемой детали, как это представлено на рис. 9.

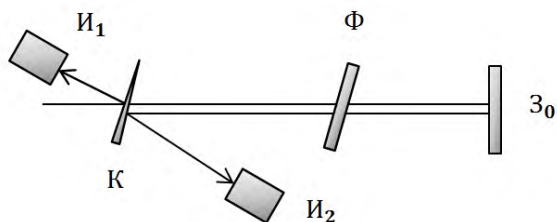


Рис. 9. Схема измерения с контролем величин регистрируемых сигналов

В качестве эталона может быть использован элемент с хорошо известными характеристиками, например, кварц. Выбор материала эталона обоснован тем, что потери за счет поглощения в нем пренебрежимо малы и потери в мощности излучения можно соотнести с Френелевским отражением. При этом двойное прохождение пучка через

эталон обусловлено стремлением сохранить ориентацию пучка на приемной площадке регистрирующего прибора. Управление величиной оптических потерь осуществляется с использованием угловой ориентации элемента Φ .

Многократное отражение излучения

Другой вариант схемы измерения коэффициентов отражения с повышенной точностью – это схема, при которой лазерное излучение отражается от исследуемой детали многократно. Отметим, что такой способ измерения, с одной стороны уменьшает ошибку измерения, с другой стороны, проводит усреднение измеряемой величины по апертуре исследуемой детали.

Существующий способ [5] обладает существенными недостатками, такими как сложность технической реализации, невысокая точность измерений и низкая производительность – 2 детали за 4 этапа.

В ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ предложен иной способ измерения коэффициентов отражения. При этом также используется схема действий с последовательной заменой исследуемых зеркал, но с другим алгоритмом, предполагающим большую производительность и точность измерений. Принципиальная схема такого испытания представлена на рис. 10.

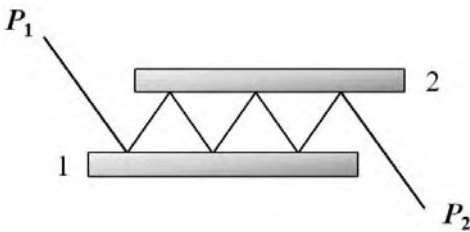


Рис. 10. Многократное отражение при прохождении затора из двух деталей

Измерения проводятся по одинаковой схеме с последовательной заменой зеркал:

- этап 1: образцы 1 и 2;
- этап 2: образцы 2 и 3;
- этап 3: образцы 1 и 3.

На каждом из этапов излучение отражается от каждого из покрытий n раз. При этом осуществляется регистрация падения мощности в результате многократного отражения.

Коэффициент отражения выражается следующим образом:

$$R_i = \sqrt[2n]{\frac{a_{ij} \cdot a_{ik}}{a_{jk}}}$$

где $i, j, k = 1, 2, 3$; $i \neq j \neq k$; n – количество отражений от одного зеркала; $a_{ij} = \frac{P_2}{P_1}$, $a_{ik} = \frac{P_2'}{P_1}$, $a_{jk} = \frac{P_2''}{P_1''}$ – величины падения мощности между комбинациями зеркал ij, ik, jk соответственно.

Выражение для относительной погрешности измерения коэффициента отражения любого из трех зеркал для случая $\delta a_{ij} \cong \delta a_{ik} \cong \delta a_{jk}$ можно представить в виде:

$$\delta R_i \cong \frac{3}{2n} |\delta a_{ij}|.$$

При погрешности измерения измерителя мощности 3 % и количестве отражений излучения от комбинации зеркал $n = 30$ имеем: $\delta R_i \cong 0,3$ %; при $n = 100$ $\delta R_i \cong 0,1$ %. Таким образом, с увеличением количества отражений излучения от комбинации зеркал погрешность измерения коэффициента отражения уменьшается.

Развитие метода в перспективе

Несмотря на то, что производительность предложенного выше способа с многократным отражением возросла и возможно уменьшать погрешность измерений, увеличивая количество отражений, систематическую погрешность устранить не удалось. Причиной этого является наличие 3-х этапов измерений, вследствие чего ошибки на двух этапах взаимоисключаются, а на одном этапе остается. Решение данной проблемы может заключаться в организации измерений с четным количеством этапов. А если схему дополнить контролем величин сигналов, то возможно снизить абсолютную погрешность измерений до 0,01 %.

Поэтому для дальнейшего развития способа измерения предложена 4-этапная схема с количеством зеркал три, два из которых являются измеряемыми, одно – вспомогательным.

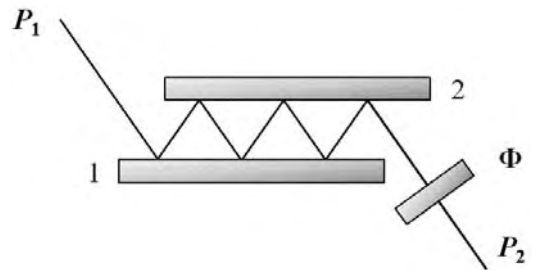


Рис. 11. Перспективная схема измерений коэффициента отражения

На рис. 11 показан один из этапов измерений. На каждом этапе в схему вносится элемент Φ с селективным пропусканием. Тогда величина из-

менения мощности, вызванная потерями при многократном отражении от зеркал, установленных в комбинацию, на всех этапах будет одной и той же.

Экспериментальные данные

В ходе экспериментальных исследований проведены серии из 5 независимых измерений по схемам с контролем величин сигналов и многократным отражением излучения. В качестве исследуемых были выбраны 3 плоские оптические детали с зеркальными покрытиями, которые не имеют видимых дефектов и эксплуатируются продолжительное время. Геометрические параметры элементов: диаметр $\varnothing = 100$ мм, толщина $l = 10$ мм. Угол падения излучения на измеряемые зеркала составлял 45° , длина волны лазерного излучения – 527 нм, тип поляризации – *p*. Диапазон мощности измеряемых сигналов (200–300) мкВт, количество отсчетов 100.

В качестве эталонного элемента в схеме с контролем величин регистрируемых сигналов выбран образец синтетического кварца, изготовленный из материала Suprasil 1, диаметром 75 мм, толщиной 12,9 мм.

В схеме с многократным отражением количество отражений от деталей составляло 30.

Результаты измерений коэффициента отражения оптических деталей 1, 2, 3 по схеме с многократным отражением представлены на рис. 12, а; оптической детали 2 по схеме с контролем величин сигналов – на рис. 12, б. Пунктирные линии – средние значения коэффициента отражения, вертикальные – погрешности измерений.

Из рис. 12 видно, что отклонения результатов измерений от среднего значения по схеме с многократным отражением излучения не превышают 0,3 %, по схеме с контролем величин сигналов не превышают теоретически рассчитанную погрешность 0,1 %.

Дополнительно измерения детали 2 были продублированы на спектрофотометре Photon RT с относительной погрешностью прибора по паспорту 0,5 %.

Для сравнения на рис. 13 представлены результаты измерений детали 2 тремя способами.

Из рис. 13 видно, что наиболее вероятное значение коэффициента отражения детали 2 лежит на отрезке [99,450; 99,595].

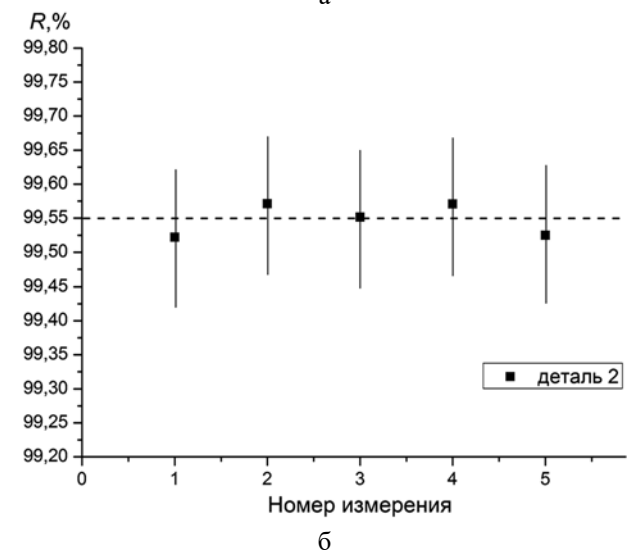
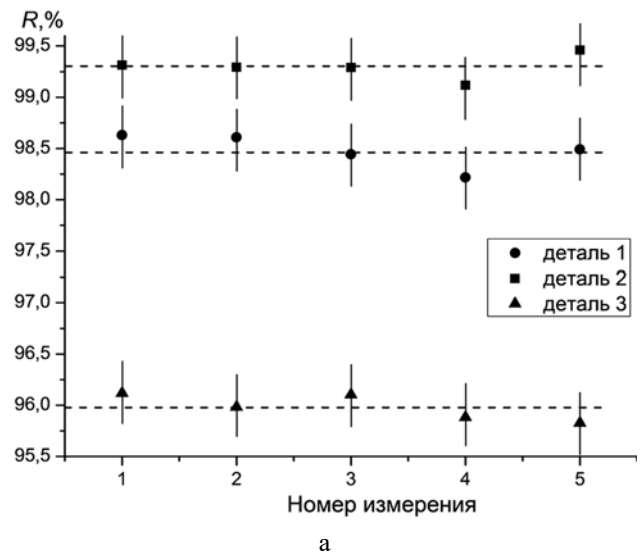


Рис. 12. Результаты измерений по схемам с многократным отражением излучения (а) и с контролем величин регистрируемых сигналов (б)

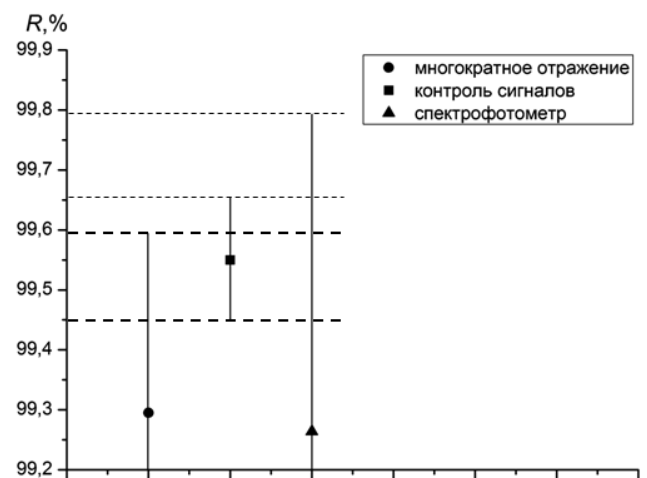


Рис. 13. Анализ результатов измерений коэффициента отражения детали 2

Заключение

Разработаны способы измерения коэффициентов отражения зеркал с абсолютной погрешностью $\leq 0,1\%$.

Определено устройство системы аттестации неоднородности покрытий.

Проведены испытания способов измерения на свидетелях оптических деталей. Отклонения результатов измерений от среднего значения по схеме с контролем величин сигналов составили $\leq 0,1\%$; по схеме с многократным отражением излучения – $\leq 0,3\%$.

Предложен 4-этапный способ измерений, сочетающий принципы многократного отражения излучения и контроля величин регистрируемых сигналов, что в перспективе позволит повысить класс точности еще примерно на порядок.

Список литературы

1. Головкин С. Ю., Деркач В. Н., Добикова В. Ю. и др. Способ определения коэффициентов отражения зеркал. Патент RU 2643216, опубликован 31.01.2018, бюллетень № 4.

2. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И. и др. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс // Квантовая Электроника. 2005. Т. 35, № 4. С. 299–301.

3. LNL. ICF Quarterly Report. Special Issue: National Ignition Facility // Virginia: Springfield. 1997. Vol. 7, N 3.

4. Andre M. L. Status of the LMJ project // Proceedings of Second Annual International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion. 1997. Vol. 3047, N 38.

5. Павлюков А. К., Курт В. И. Способ измерения коэффициентов отражения зеркал. Патент RU 2467309, опубликован 20.11.2012, бюллетень № 20.