

Прецизионные методы измерения коэффициента отражения зеркальных покрытий

© С.А. Бельков, В.Н. Деркач, С.Ю. Головкин, А.С. Губкин[✉], В.Ю. Добикова, В.О. Лацук, Д.В. Сизмин, В.А. Щеников

Российский Федеральный Ядерный Центр — ВНИИЭФ,
607188 Саров, Нижегородская обл., Россия

[✉] e-mail: oefimova@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 29.09.2020 г.

В окончательной редакции 28.12.2020 г.

Принята к публикации 10.05.2021 г.

Рассмотрены методы определения коэффициентов отражения зеркальных покрытий оптических деталей, основанные на многократном отражении излучения от измеряемой поверхности и контроле величин регистрируемых сигналов, обеспечивающие абсолютную погрешность измерения $< 0.1\%$. Проведена их экспериментальная аттестация, подтвердившая высокую точность таких измерений.

Ключевые слова: коэффициент отражения, мощные лазерные установки, погрешность измерения.

DOI: 10.21883/OS.2021.09.51349.246-21

Введение

Одним из важных требований к конструктивным элементам современных лазерных установок является высокая однородность покрытий оптических элементов и соответствие их коэффициента отражения или пропускания заданным параметрам. В ряде случаев, когда количество отражающих и просветляющих покрытий является большим, невысокое качество изготовления покрытий может приводить к существенным и некомпенсируемым потерям в энергии и мощности излучения, появлению амплитудной и фазовой модуляции пучка. Для установок с большим количеством каналов [1–3] этот фактор может также вызывать дисбаланс энергетических параметров, для устранения которого потребуется создание сложного адаптивного управления.

В этой связи разработка „быстрых“ и высокоточных инструментов аттестации покрытий по коэффициенту отражения является актуальной. В данной работе рассматриваются только методы измерения коэффициента отражения, однако эти же методы могут быть адаптированы и для измерения пропускания.

Обычно для повышения точности измерения коэффициентов отражения используют многократные отражения от образца [4,5], чаще всего используется схема с двукратным отражением как наиболее простая. Исторически первым вариантом схемы с двукратным отражением были так называемая VW-схема [6,7] и ее аналоги [8]. Общим недостатком таких схем является то, что 2 отражения, используемые для измерения коэффициента отражения не равнозначны: в случае VW-схемы пучок отражается от разных точек образца, а в другом варианте два пучка приходят в одну точку, но под разными углами. Впоследствии вместо VW-схемы была предложена IV-схема, которая лишена указанных недостатков [9].

Запатентованные авторами работы методы [10,11] являются дальнейшим развитием IV схемы и схемы с многократным (более 2 раз) количеством отражений. Отличие от ранее используемых методов заключается в том, что для повышения точности измерений предлагается выравнять величину сигналов на разных этапах измерения, тем самым избавляясь от систематической ошибки, связанной с нелинейностью передаточных характеристик измерительных приборов.

Измерение коэффициента отражения с контролем величин измеряемых сигналов

Поскольку коэффициент отражения диэлектрических покрытий зависит от угла падения излучения, а также от того, как излучение поляризовано, в контексте измерений имеет смысл говорить лишь о коэффициенте отражения для конкретного угла и для одного из двух направлений поляризации. Поэтому здесь и далее под абсолютным значением коэффициента отражения понимается именно коэффициент отражения, характеризующий деталь при заданном угле падения и направлении поляризации, выраженный в абсолютных единицах.

Принципиальная схема измерения коэффициентов отражения, используемая авторами работы [10], представлена на рис. 1. Схема включает в себя измеряемое и вспомогательное зеркала, а процедура измерения состоит из двух этапов. На первом (рис. 1, *a*) измерение осуществляют без измеряемой детали. На втором, в соответствии с рис. 1, *b*, в тракт помещается исследуемая деталь, а вспомогательное зеркало перемещается в новое положение, но при этом размещается таким образом, чтобы длина оптического пути от первого клина до измерителя D_2 оставалась неизменной. В обоих

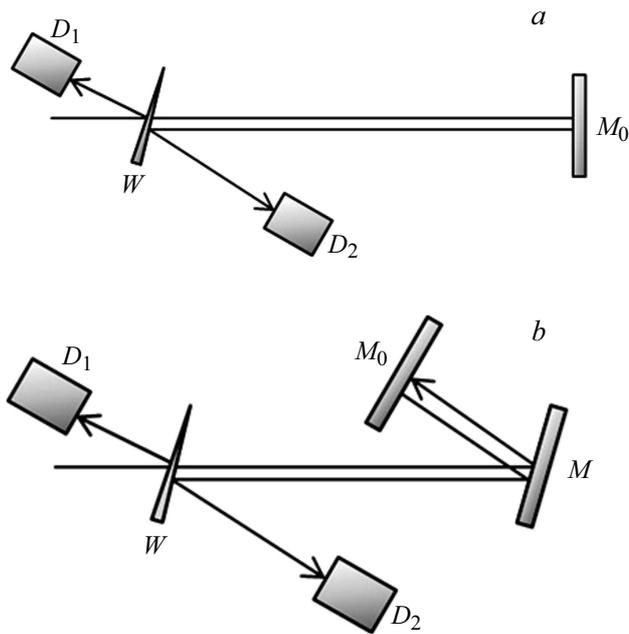


Рис. 1. Схема измерений с двукратным отражением излучения без образца (а) и с образцом (б): M_0 — вспомогательное зеркало, W — светоделительный клин, M — измеряемое зеркало, D_1 — измерительный канал для регистрации излучения, падающего на измеряемое зеркало, D_2 — измерительный канал для регистрации излучения, отраженного от измеряемого зеркала.

случаях вспомогательное зеркало располагается нормально по отношению к падающему излучению, за счет этого коэффициент отражения данного зеркала не изменяется при переходе от первого этапа измерения к второму. В результате точность измерений не зависит от характеристик вспомогательного зеркала. Измерения, выполняемые на первом и на втором этапах, отличаются тем, что во втором случае излучение дважды отражается от измеряемой детали, коэффициент отражения детали составляет:

$$R = \sqrt{\frac{P_1 P_2}{P_2' P_1'}}, \quad (1)$$

где P_1 и P_2 — величины сигналов в первом и втором каналах регистрации на первом, P_1' и P_2' — втором этапе измерений.

Представим выражение для погрешности измерений в виде формулы с отдельным вкладом систематической и случайной составляющей:

$$\delta R = \delta R_r + \delta R_s = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta P_{1s} + \Delta P_{1r}}{P_1} - \frac{\Delta P'_{1s} + \Delta P'_{1r}}{P'_1} + \frac{\Delta P_{2s} + \Delta P_{2r}}{P_2} - \frac{\Delta P'_{2s} + \Delta P'_{2r}}{P'_2} \right), \quad (2)$$

где символы s и r в индексах относятся к слагаемым погрешности систематического и случайного типа.

К систематической следует отнести погрешность, связанную с изменением передаточной функции измери-

тельного прибора при изменении величины регистрируемого сигнала. Выделим несколько независимых источников случайной погрешности и перечислим здесь основные. Это ограниченный набор статистики измерений в условиях переменной мощности цифруемого сигнала и неточность юстировки схемы регистрации второго из каналов на разных этапах измерений, выражающаяся в изменении размера пучка и области попадания на приемную площадку прибора, а также изменение коэффициента отражения вспомогательного зеркала. Способы уменьшения погрешностей разного типа требуют проведения различных мероприятий и будут далее рассматриваться нами в отдельности.

Измерения в двух измерительных каналах проводились с частотой около 10 Hz поочередно, т. е. второй датчик запускается через 0.1 s после первого, еще через 0.1 s снова запускается первый и т. д. Характерная мощность лазера, используемого для проведения измерений, устанавливалась в диапазоне от 200 до 300 mW.

Поскольку мощность лазера может меняться во время измерения, описанный выше алгоритм работы датчиков приводит к тому, что величина P_2/P_1 определяется с некоторой погрешностью ϵ_1 . Для уменьшения данной погрешности использовались усредненные на большом временном интервале значения сигналов $\langle P_1 \rangle$ и $\langle P_2 \rangle$. Считалось, что сигнал, усредненный по интервалу измерений в $N_0 = 2 \cdot 10^4$ отсчетов, является точным. Количество отсчетов N , при котором выполняется условие:

$$\left| \left\langle \frac{P_2}{P_1} \right\rangle_N - \left\langle \frac{P_2}{P_1} \right\rangle_{N_0} \right| \leq \epsilon_1, \quad (3)$$

было определено экспериментально. Измерения проводились по схеме, представленной на рис. 1, а, в результате было получено, что требование $\epsilon_1 \leq 2 \cdot 10^{-4}$ выполняется для $N = 100$ при условии стабилизации сигнала источника излучения на уровне СКО $(P_1) < 10^{-5}$ W. В последующем изложении всегда будем понимать, что определенные выше требования к проведению измерений выполнялись.

Другим источником случайной ошибки является переюстировка схемы при переходе с этапа на этап. Для однозначности юстировки измерительных схем в них внесены светоделительные элементы, отводящие часть излучения в каналах регистрации на камеры, фиксирующие стабильность трассировки излучения. Была проведена серия из $M = 10$ независимых измерений величины $\langle \frac{P_2}{P_1} \rangle_N$ по схеме, представленной на рис. 1, б, перед каждым измерением проводилась процедура повторной юстировки вспомогательного зеркала. Получено, что максимальное отклонение от среднего по серии измерений составляет $\approx 0.05\%$. Полученный результат включает в себя оба источника случайной ошибки и может служить оценкой ее полной величины. Оценим далее полную величину погрешности измерения коэффициента отражения δR_r , обусловленную случайной ошибкой измерения $\langle \frac{P_2}{P_1} \rangle$. Из (2) следует

$$\delta R_r = \frac{1}{2} \left(\left| \delta \left(\frac{P_1}{P_2} \right)_r \right| + \left| \delta \left(\frac{P'_1}{P'_2} \right)_r \right| \right) \leq 5 \cdot 10^{-4}. \quad (4)$$

Рассмотрим далее прием, примененный нами для ограничения систематической составляющей погрешности измерения и базирующийся на выбранной 2-этапной процедуре измерения.

Предположим, что изменение сигнала между этапами измерения является малой величиной в обоих измерительных каналах: $P'_1 = P_1 + \varphi_1$, где $|\frac{\varphi_1}{P_1}| \ll 1$ и $P'_2 = P_2 + \varphi_2$, где $|\frac{\varphi_2}{P_2}| \ll 1$. На практике это означает, что источник излучения работает стабильно, а изменения в пропускании схемы второго измерительного канала не существенны, т.е. измеряемое зеркало имеет коэффициент отражения близкий к ста процентам. Тогда, можно ожидать, что систематические погрешности измерений „примерно равных“ сигналов в каждом из каналов на разных этапах отличаются незначительно, т.е. $\Delta P_{1s} \cong \Delta P'_{1s}$ и $\Delta P_{2s} \cong \Delta P'_{2s}$. Это позволяет учесть знак погрешности в выражении (2) и свести систематическую составляющую погрешности коэффициента отражения к виду

$$\begin{aligned} \delta R_s &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta P_{1s}}{P_1} - \frac{\Delta P'_{1s}}{P'_1} + \frac{\Delta P'_{2s}}{P'_2} - \frac{\Delta P_{2s}}{P_2} \right) \\ &\cong \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta P_{1s}}{P_1} - \frac{\Delta P_{1s}(P_1 - \varphi_1)}{P_1^2} + \frac{\Delta P_{2s}(P_2 - \varphi_2)}{P_2^2} - \frac{\Delta P_{2s}}{P_2} \right) \\ &\cong \frac{1}{2} \left\{ \left| \frac{\Delta P_{1s}}{P_1} \right| \left| \frac{\varphi_1}{P_1} \right| + \left| \frac{\Delta P_{2s}}{P_2} \right| \left| \frac{\varphi_2}{P_2} \right| \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\frac{\Delta P_{1s}}{P_1}$ и $\frac{\Delta P_{2s}}{P_2}$ — погрешности систематических измерений в обоих каналах.

Из выражения (5) получается, что при

$$\frac{\Delta P_{1s}}{P_1} \cong \frac{\Delta P_{2s}}{P_2} \leq 3 \cdot 10^{-2}$$

и

$$\left| \frac{\varphi_1}{P_1} \right| \cong \left| \frac{\varphi_2}{P_2} \right| < 10^{-2}$$

систематическая ошибка измерения коэффициента отражения $\delta R_s < 3 \cdot 10^{-4}$.

Таким образом, с учетом определенного выше регламента и комплекса мер, направленных на увеличение точности измерений, показано, что суммарная погрешность определения коэффициента отражения составляет величину, меньшую 10^{-3} .

При выводе (5) использовалось приближение, ограничивающее область применения методики измерения случаем аттестации зеркал с коэффициентом отражения, близким к ста процентам. Для расширения возможностей применяемого метода предложено вместо схемы на рис. 1, а использовать схему, представленную на рис. 2. Стабильность сигнала в канале D_2 в случае испытания зеркал с меньшим коэффициентом отражения может быть достигнута за счет применения дополнительного элемента E , вводимого в схему на первом этапе и обеспечивающего равенство потерь на двух этапах измерения.

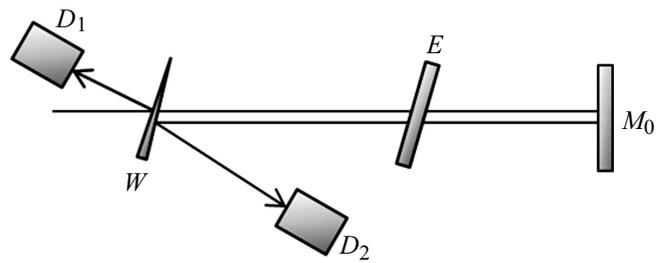


Рис. 2. Схема измерения с контролем величин регистрируемых сигналов. E — эталонный элемент, остальные обозначения те же, что и на рис. 1.

В качестве элемента E может быть использован эталон с хорошо известным показателем преломления и малыми коэффициентами поглощения и деполяризации, например, синтетический кварц с высоким показателем однородности материала. При таком выборе потери в мощности излучения определяются преимущественно френелевским отражением и регулируются за счет изменения угловой ориентации элемента, определяемой с высокой точностью. Двойное прохождение пучка через эталон обусловлено стремлением компенсировать поперечное смещение пучка при прохождении через элемент E и обеспечить сохранение положения пучка на приемной площадке прибора в измерительном канале D_2 на разных этапах аттестации.

Коэффициент отражения определяется вместо (1) по формуле

$$R = T \sqrt{\frac{P'_2 P_1}{P_2 P'_1}}, \quad (6)$$

где T — коэффициент пропускания элемента E за один проход излучения. В этом случае относительная погрешность измерения коэффициента отражения примет вид

$$\delta R \leq \frac{1}{2} |\delta P| \left\{ \left| \frac{\varphi_1}{P_1} \right| + \left| \frac{\varphi_2}{P_2} \right| \right\} + \delta T. \quad (7)$$

Полученное выражение отличается от (2) слагаемым δT . Проведем здесь оценку погрешности, вызванной этой добавкой. Пусть коэффициент отражения исследуемой детали $R = 95\%$. Для обеспечения равенства потерь на этапах измерений эталон должен быть расположен под углом $\varphi \approx 25.7^\circ$ к p -поляризованному излучению. Так как зависимость коэффициента отражения эталона от угла $R_E(\varphi)$ известна, можно оценить величину погрешности, связанную с погрешностью ориентации для заданного угла. Угол падения на эталон определяется по теореме косинусов через величину базовых расстояний L_i , формирующих треугольник с вершиной на эталонной детали. Для наших экспериментов характерна погрешность измерений $\delta L_i < 0.05\%$, что, в свою очередь, определяет погрешности измерения угла и пропускания эталона как $\Delta \varphi \approx 5 \cdot 10^4 \text{ rad}$ и $\delta T \approx 0.004\%$ соответственно. Полученное в результате оценки значение δT на порядок меньше, чем погрешность в схеме

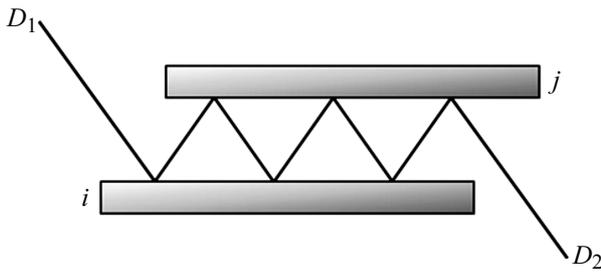


Рис. 3. Многократное отражение при прохождении зазора из двух деталей.

измерений без элемента E , и вносимая добавка не приводит к существенному увеличению погрешности δR . Следовательно, можно утверждать, что использование эталонного элемента позволяет расширить диапазон измеряемых значений коэффициента отражения, сохранив при этом высокую точность.

Измерение коэффициента отражения с многократным отражением излучения

Рассмотрим далее другой вариант определения коэффициентов отражения с повышенной (относительно стандартных методов) точностью измерений — это способ, при котором лазерное излучение отражается от исследуемой детали многократно. Такой способ уменьшает погрешность измерения, в то же время усредняя измеряемую величину по апертуре исследуемой детали. Ранее авторами работы был предложен новый способ [11] на основе многократного отражения излучения от тестируемой детали, обеспечивающий высокую точность измерений. Принципиальная схема таких измерений представлена на рис. 3.

Измерения проводятся по одинаковой оптической схеме с последовательной заменой зеркал:

- этап 1: образцы № 1 и № 2;
- этап 2: образцы № 3 и № 2;
- этап 3: образцы № 3 и № 1.

На каждом этапе излучение отражается от каждого из покрытий n раз, при этом осуществляется регистрация падения величины сигнала в результате многократного отражения.

Коэффициент отражения образца z выражается следующим образом:

$$R_z = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{i/2n} \left(\frac{P'_1}{P'_2}\right)^{j/2n} \left(\frac{P''_2}{P''_1}\right)^{k/2n}, \quad (8)$$

где P_1 и P_2 — мощности измеряемых сигналов в первом и втором каналах регистрации, количество штрихов соответствует этапу измерений, а i, j, k — параметры, определяющие вид выражения для каждого образца. Для первого образца $\{i, j, k\} = (1, 1, 1)$, для второго — $(1, -1, -1)$ и для третьего — $(-1, -1, 1)$.

Выражение для относительной погрешности измерения коэффициента отражения первого зеркала можно представить в виде

$$\delta R_1 \cong \frac{1}{2n} \left(-\frac{\Delta P_1}{P_1} + \frac{\Delta P'_1}{P'_1} - \frac{\Delta P''_1}{P''_1} + \frac{\Delta P_2}{P_2} - \frac{\Delta P'_2}{P'_2} + \frac{\Delta P''_2}{P''_2} \right). \quad (9)$$

Для случая $|\delta P_1| \cong |\delta P'_1| \cong |\delta P''_1|$ и $|\delta P_2| \cong |\delta P'_2| \cong |\delta P''_2|$ для любого из трех зеркал выражение (9) можно представить в виде

$$\delta R_i \cong \frac{3}{2n} (|\delta P_1| + |\delta P_2|). \quad (10)$$

При погрешности измерения сигналов 3% и количестве отражений $n=100$ погрешность измерения составит $\delta R_i \cong 0.1\%$. Отличительной чертой данного метода (относительно основанного на контроле величин измеряемых сигналов) является интегральный характер измерений.

Экспериментальные данные

С целью экспериментальной проверки предлагаемых методик были проведены 3 серии из 5 независимых измерений по двум предложенным схемам (рис. 2, 3). В качестве исследуемой была выбрана плоская оптическая деталь с зеркальным покрытием. Геометрические параметры детали: диаметр 100 mm, толщина 10 mm. Угол падения излучения, для которого нанесено покрытие, составлял 45° . Длина волны лазерного излучения — 527 nm, тип поляризации — p . Измерения проводились именно в тех условиях, на которые рассчитано диэлектрическое покрытие образца. Однако схема экспериментального стенда позволяет установить произвольный угол падения излучения и выбрать любое направление поляризации, так как деталь располагается на поворотном столике, а перед измерительной схемой установлена призма-поляризатор. При проведении измерений погрешность установки угла измеряемой детали не превышала $5'$, а изменение коэффициента отражения, вызванное неточностью установки детали, считалось пренебрежимо малым.

В качестве эталонного элемента в схеме с контролем величин регистрируемых сигналов использовался образец синтетического кварца, изготовленный из материала Suprasil 1, диаметром 75 mm, толщиной 12.9 mm. Результаты многократных измерений коэффициента отражения с использованием эталонного элемента представлены на рис. 4, а. Штриховая линия — усредненное по серии значение, вертикальные — погрешности измерений. В измерении обеспечена погрешность $< 0.1\%$, максимальное отклонение измеренной величины от среднего значения для данной серии составляет менее 0.05%.

Следующая серия измерений проводилась по схеме с многократным отражением, дополнительно использовались еще 2 зеркала, количество отражений от деталей составляло 30. Для такого количества отражений

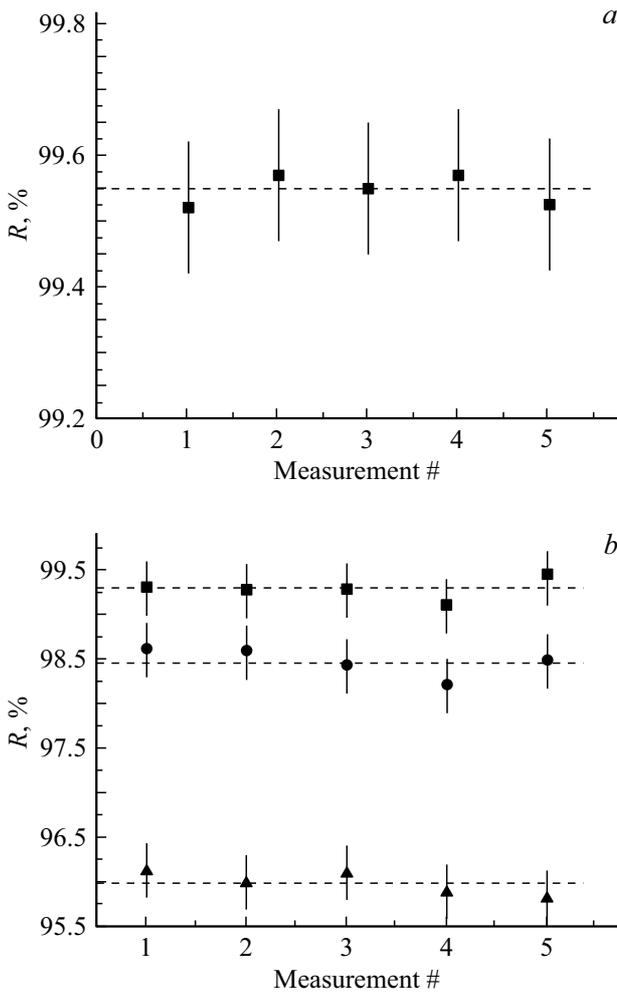


Рис. 4. Результаты измерений по схемам с контролем величин регистрируемых сигналов (а) и с многократным отражением излучения (b). Квадратные маркеры — результаты измерений детали № 1, круглые — детали № 2, треугольные — детали № 3.

относительная погрешность измерения коэффициента отражения, рассчитанная по формуле (10), составляет $\approx 0.3\%$. Результаты измерений коэффициента отражения всех трех оптических деталей по схеме с многократным отражением представлены на рис. 4, b. Максимальное отклонение результатов измерения от соответствующего среднего значения для данной серии составляет около 0.2%.

Отметим также, что разница в установленной величине коэффициента отражения, определенной двумя представленными способами, составляет $\approx 0.2\%$. Полученная разница объясняется тем, что способ, использующий многократные отражения, измеряет среднее значение коэффициента отражения по апертуре детали, а также в целом более чувствителен к точности юстировки.

Дополнительно измерения были продублированы на спектрофотометре PhotonRT с паспортной относительной погрешностью 0.5%. Значения максимального откло-

нения, полученные разными методами, не превышают тех величин погрешности, которые были получены ранее в результате оценки.

Заключение

Рассмотрены различные способы измерения коэффициентов отражения зеркал с погрешностью $\leq 0.1\%$, основанные на принципах:

- контроля величин регистрируемых сигналов;
- многократного отражения излучения от исследуемой поверхности.

Проведены испытания данных способов измерений на оптических деталях с малой световой апертурой. Получена погрешность измерений коэффициентов отражения $< 0.1\%$ по схеме с контролем величин сигналов и $< 0.3\%$ по схеме с многократным отражением излучения. Повторяемость результатов измерений составила соответственно $\leq 0.05\%$ и $\leq 0.2\%$.

Дальнейшее снижение погрешности измерений возможно в случае объединения предложенных способов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Гаранин С.Г., Зарецкий А.И., Илькаев Р.И. и др. // Квант. электрон. 2005. Т. 35. С. 299.
- [2] Haynam C.A., Wegner P.J. et al. // Appl. Opt. 2007. V. 46. P. 3276.
- [3] Nicolas O., Le Garrec B.J. // J. Phys.: Conf. Ser. 2008. V. 112. 032019.
- [4] Павлюков А.К., Курт В.И. Патент РФ № 2467309, 2012.
- [5] Левин Б.М. Авт. свид. № 151063, 1962.
- [6] Bennet H.E., Koehler W.F. // J. Opt. Soc. Am. 1960. V. 50. P. 1.
- [7] Archard M.A. // Workshop on Optical Property Measurement Techniques, Ispra, Italy 27–29 October 1987. Commission of the European Communities, May. 1988. 73.
- [8] Волков В.Н., Порозов В.А. Авт. свид. № 411356, 1974.
- [9] van Nijnatten P.A., de Wolf J.M.C., Schoofs I.J.E. // Directional reflection measurements on highly reflecting coatings, 7th International Conference on Coatings on Glass, Eindhoven, 2008.
- [10] Головкин С.Ю. и др. Патент РФ № 2660398, 2018.
- [11] Головкин С.Ю. и др. Патент РФ № 2643216, 2018.