

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

С. Ю. Головкин, В. Н. Деркач, В. Ю. Добицова, В. О. Лащук, Д. В. Сизмин, В. А. Щеников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Коэффициент отражения диэлектрических покрытий оптических деталей является важной характеристикой, определяющей возможность достижения предельных энергетических значений на выходе лазерной цепи. Особенно это принципиально для многопроходных лазерных систем, у которых реализация эксплуатационных характеристик возможна лишь при высокой эффективности работы всех узлов одновременно и избыточное количество транспортных потерь не всегда можно компенсировать величиной входного сигнала или коэффициентом усиления.

Для нахождения коэффициентов отражения оптических деталей в диапазоне от $<0,1\%$ до $>99,9\%$ с абсолютной погрешностью менее $0,1\%$ существует несколько видов измерительных схем. Целью данной работы являлось испытание схем измерений, основанных на принципах многократного отражения излучения от измеряемой поверхности и двукратного отражения излучения от измеряемой поверхности с контролем абсолютной величины погрешности измерения.

1 Устройство диэлектрических зеркальных покрытий

Диэлектрические зеркала обычно делают из слоев с чередующимися высокими n_H и низкими n_L показателями преломления толщиной в четверть длины волны, т.е. оптическая толщина составляет:

$$n_i h_i \cos(\theta) = \frac{\lambda_0}{4},$$

где h_i – геометрическая толщина слоя, θ – угол, отсчитываемый от нормали, распространения излучения в плоском диэлектрическом слое.

Такие зеркала называются четвертьволновыми. При такой конструкции все отраженные лучи складываются в фазе. Схема, поясняющая принцип сложения пучков, представлена на рис. 1: фаза «луча 0» при отражении от оптически более плотной среды в точке А меняется на π , фаза «луча 1» относительно точки А так же изменяется на π из-за двойного прохода по среде с четвертьволновой толщиной, изменение фазы «луча 2» при проходе через «среду 1» и «среду 2» и возвращении обратно меняется на 2π , и еще на π меняется при отражении от «среды 3».

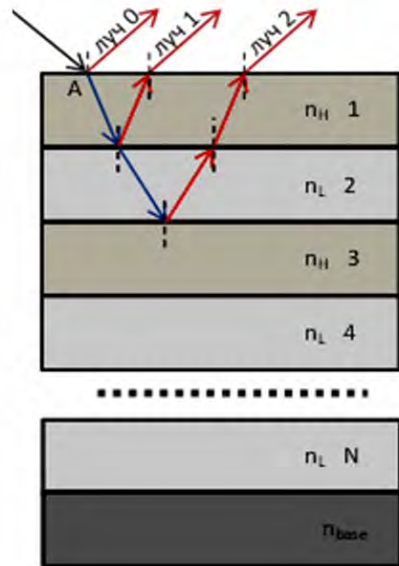


Рис. 1. Фазировка света при отражении от многослойного диэлектрического зеркала

Коэффициент отражения от каждого слоя ограничен законом Френеля [1] и для достижения высоких значений коэффициента отражения покрытия, кроме требования сфазированного сложения волн, необходимо нанесение большого количества слоев. Причем, в силу относительно меньшего номинала отражения для p -поляризации, для таких зеркал количество слоев должно быть больше.

Для определения коэффициентов отражения и пропускания диэлектрического покрытия используется метод характеристических матриц Абеде [2]. Суть метода заключается в следующем: каждому слою покрытия ставится в соответствие характеристическая матрица, связывающая электрические и магнитные поля на границах слоя. Характеристическая матрица всего покрытия M_Σ определяется произведением характеристических матриц отдельных слоев. Коэффициент отражения от слоистой среды, описываемой характеристической матрицей M_Σ , заключенной между двумя средами с коэффициентами преломления: n_0 – коэффициент преломления внешней среды и n_{base} – коэффициент преломления подложки, находится из условий непрерывности тангенциальных компонент векторов \vec{E} и \vec{H} на каждой из двух поверхностей раздела слоистой среды.

2. Схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий с многократным отражением излучения от исследуемой поверхности при прохождении зазора между двумя отражающими деталями

Принципиальная измерительная схема коэффициентов отражения зеркальных покрытий с многократным отражением от исследуемой детали приведена на рис. 2.

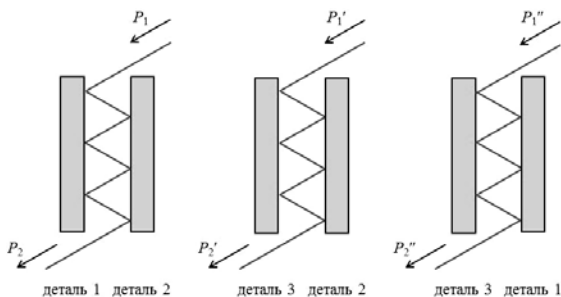


Рис. 2. Принципиальная схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий с многократным отражением излучения от исследуемой поверхности

В схеме измерения используются 3 элемента (зеркала): деталь 1 с коэффициентом отражения R_1 , деталь 2 с коэффициентом отражения R_2 и деталь 3 с коэффициентом отражения R_3 . Причем эти зеркала могут быть как с заранее известными коэффициентами отражения, так и нет. Измерения проводятся по одинаковой оптической схеме с последовательной заменой зеркал. Для упрощения дальнейших выкладок будем считать, что на всех этапах процедуры измерения количество отражений от каждого зеркала одинаково и составляет n . На рис.2 P_1, P_1', P_1'' – сигналы на входе, P_2, P_2', P_2'' – сигналы на выходе. На первом этапе измерения устанавливаются образцы с R_1 и R_2 , регистрируются сигналы P_1 и P_2 . Аналогично на втором этапе устанавливаются образцы с R_2 и R_3 , регистрируются сигналы P_1' и P_2' . И, наконец, на третьем этапе устанавливаются образцы с R_1 и R_3 и регистрируются сигналы P_1'' и P_2'' .

Результаты измерений выражаются следующим образом:

$$\frac{P_2}{P_1} = (R_1 \cdot R_2)^n, \quad \frac{P_2'}{P_1'} = (R_2 \cdot R_3)^n, \quad \frac{P_2''}{P_1''} = (R_1 \cdot R_3)^n. \quad (1)$$

Из выражений (1) определяем R_1, R_2, R_3 :

$$\begin{aligned} R_1 &= \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{2n}} \cdot \left(\frac{P_1'}{P_2'}\right)^{\frac{1}{2n}}, \\ R_2 &= \left(\frac{P_1''}{P_2''}\right)^{\frac{1}{2n}} \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{2n}}, \\ R_3 &= \left(\frac{P_1'}{P_2'}\right)^{\frac{1}{2n}} \cdot \left(\frac{P_1''}{P_2''}\right)^{\frac{1}{2n}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Оценка относительной погрешности измерения коэффициента отражения любого из трех зеркал δR_i по формулам (2) составляет:

$$\delta R_i = \frac{1}{2n} \left[\delta \left(\frac{P_1}{P_2} \right) + \delta \left(\frac{P_1'}{P_2'} \right) + \delta \left(\frac{P_1''}{P_2''} \right) \right].$$

$$\text{Выражение для случая } \delta \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = \delta \left(\frac{P_1'}{P_2'} \right) = \delta \left(\frac{P_1''}{P_2''} \right)$$

можно представить в виде:

$$\delta R_i \cong \frac{3}{2n} \cdot \left| \delta \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right| \text{ или } \delta R_i \cong \frac{3}{2n} \cdot (|\delta P_1| + |\delta P_2|). \quad (3)$$

Из формул (3) видно, что для уменьшения относительной погрешности измерения коэффициента отражения нужно увеличить число отражений n .

3. Схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий с контролем величин регистрируемых сигналов

Схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий оптических деталей с контролем величин регистрируемых сигналов представлена на рис. 3.

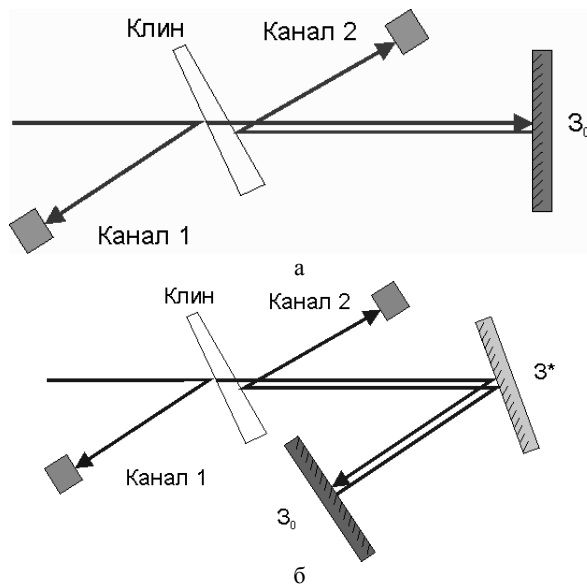


Рис. 3. Схема измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий с контролем величин регистрируемых сигналов

На первой стадии измерения (рис. 3,а) излучение отражается от вспомогательного зеркала Z_0 . На второй стадии измерения, в соответствии с рис. 3,б, в тракт помещается измеряемая деталь Z^* , а вспомогательное зеркало переносится в другую позицию. В таком схемном решении зеркало Z^* отражает излучение дважды. Отличие в результатах измерения (с измеряемым элементом и без него) объясняется величиной показателя отражения данной оптической детали.

Коэффициент отражения выражается следующим образом:

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

где P – мощность излучения на датчиках, индексы обозначают канал измерения, штрихом отмечены результаты измерений на втором этапе.

Относительная погрешность измерений при постоянной мощности излучения составит:

$$\delta R = \frac{1}{2} \cdot \left(\left| \delta \left(\frac{P_1}{P_1'} \right) \right| + \left| \delta \left(\frac{P_2}{P_2'} \right) \right| \right)$$

В приближении малого изменения сигналов в процессе измерений, погрешность нахождения R можно свести к виду:

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

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 перевод погрешности измерения

каждого сигнала из случайной в систематическую. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы изменение сигналов между этапами было минимальным, например: $\frac{\Delta_1}{P_1} \cong \frac{\Delta_2}{P_2} < 10^{-2}$. При этом можно

ожидать снижения погрешности измерения глухих зеркал до уровня десятой доли процента.

4. Измерение коэффициентов отражения зеркальных покрытий

Для испытания схем измерений коэффициентов отражения были выбраны три плоских оптических детали с зеркальными покрытиями – деталь 1, деталь 2 и деталь 3. Геометрические параметры – диаметр (\varnothing) и толщина (l) – детали 1: $\varnothing = 100$ мм и $l = 10$ мм; детали 2: $\varnothing = 100$ мм и $l = 10$ мм; детали 3: $\varnothing = 90$ мм и $l = 15$ мм. Отражательные способности элементов измерялись для угла падения излучения на исследуемые поверхности 45° . В измерительной схеме с многократным отражением излучения количество отражений от деталей составляло 30. Коэффициенты отражения измерялись при s - и p -поляризованном излучении. Дополнительно все измерения дублировались на спектрофотометре Photon RT. Результаты всех измерений представлены в таблице и на рис. 4 и 5.

Результаты измерений коэффициентов отражения ($\lambda=527$ нм)

Коэффициенты отражения	Многопроходная схема	Двухпроходная схема	Спектрофотометр
R_{1p}	98,479	99,162	99,278
R_{1s}	98,775	99,637	99,794
R_{2p}	99,295	99,451	99,264
R_{2s}	99,440	99,735	99,798
R_{3p}	95,982	95,185	95,235
R_{3s}	98,954	99,466	99,574

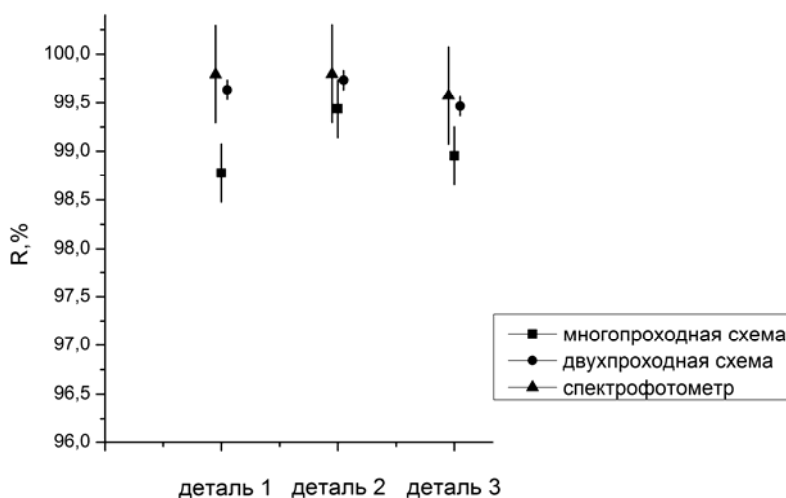


Рис. 4. Коэффициенты отражения зеркал, измеренные разными способами, при s -поляризованном излучении (вертикальные линии – погрешности измерений)

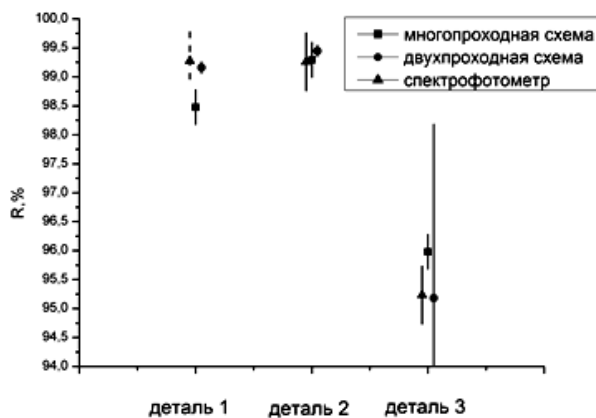


Рис. 5. Коэффициенты отражения зеркал, измеренные разными способами, при p -поляризованном излучении (вертикальные линии – погрешности измерений)

Из полученных результатов видно, что результаты измерений на спектрофотометре и по схеме с контролем величин регистрируемых сигналов практически совпадают. Результаты измерений по схеме с многократным отражением отличаются примерно на 1 % от результатов измерений двумя другими способами. Это может быть связано с тем, что при проведении таких измерений происходит интегрирование результата по большому количеству отражений (апертуре детали) в силу возможной неоднородности покрытия и (или) рассеяния на частицах пыли и дефектах покрытия.

5. Схема измерения коэффициентов отражения деталей при многократном отражении от них излучения с одновременным контролем величин сигналов в измерительных каналах

В настоящее время ведется сборка оптической схемы, сочетающей принципы многократного отражения и контроля величины абсолютной погрешности измерения. Такая схема измерения приведена на рис. 6.

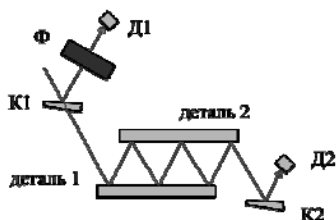


Рис.6. Схема измерения коэффициентов отражения деталей при многократном отражении от них излучения с одновременным контролем величины сигналов в измерительных каналах

Схема соответствует одному из этапов измерений при многократном отражении. Используются детали 1 и 2. Дополнительно в схему вносится элемент Φ , имеющий селективное пропускание T , причем $P_2 = P_1 \cdot T$. Тогда величина изменения мощности на каждом из этапов измерения, вызванная потерями при многократном отражении от зеркал, установленных

в комбинацию, в точности совпадает с величиной пропускания селективного фильтра. Погрешность измерения величины пропускания такого элемента и погрешность измерения величины изменения мощности, вызванной прохождением через комбинацию зеркал, определяются погрешностью соответствующих измерительных средств. При меньшей погрешности измерения коэффициента пропускания элемента этот факт определяет меньшую погрешность определения коэффициентов отражения измеряемых зеркал.

Заключение

В работе проведены испытания:

- схемы измерения коэффициентов отражения зеркальных покрытий оптических деталей, основанные на принципах многократного отражения излучения от измеряемой поверхности,
- схемы измерения коэффициентов двукратного отражения излучения от измеряемой поверхности с контролем абсолютной величины погрешности измерения.

В схеме с многократным отражением излучения коэффициенты отражения покрытий измерены с абсолютной погрешностью 0,3 %.

В схеме с двукратным отражением излучения и с контролем величин регистрируемых сигналов коэффициенты отражения покрытий измерены с абсолютной погрешностью 0,1 %. Дополнительно все измерения дублированы на спектрофотометре Photon RT с погрешностью измерения 0,5 %.

Показано, что оптическая схема, сочетающая принципы многократного отражения излучения и контроля величины абсолютной погрешности измерения, повышает точность измерения коэффициентов отражения.

Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.