

ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СЕЛЕКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Л. С. Корниенко и Б. Г. Скуйбин

Рассмотрен метод измерения малых коэффициентов суммарных потерь оптического резонатора, основанный на измерении затухания короткого светового моноимпульса, инжектированного в резонатор, при его многократном отражении от зеркал резонатора. Абсолютная точность метода линейно зависит от коэффициенты отражения зеркал, близкие к единице, малые остаточные коэффициенты отражения просветленных элементов, добротности резонатора, а также коэффициенты поглощения в средах, заполняющих резонатор.

В современной экспериментальной технике актуальную задачу представляет прецизионное измерение коэффициентов отражения диэлектрических зеркал, близких к единице, остаточных коэффициентов потерь просветленных оптических элементов, добротности оптических резонаторов, а также коэффициентов селективного поглощения различных сред. Требуемая точность измерения этих коэффициентов в настоящее время превышает 10^{-3} . Серийно же выпускаемые измерительные приборы, как правило, не позволяют получать требуемую точность измерения.

В большинстве случаев измерение коэффициентов отражения оптических зеркал производится путем сравнения оптических сигналов, попадающих на фотоприемник непосредственно и после отражения от измеряемого зеркала [1]. Однако по мере увеличения коэффициента отражения этот метод становится все менее точным. В работах [2-4] рассмотрены методы, дающие точность измерения коэффициентов отражения зеркал R , близких к единице, порядка 10^{-3} . Более перспективными являются методы измерения коэффициентов отражения, в которых используются многократные отражения света от исследуемого зеркала, что позволяет уменьшить ошибку измерения по сравнению с методами, использующими однократное отражение света. В работах [5-7] описаны такие методы измерения, дающие точность порядка 10^{-3} - 10^{-4} .

Однако следует указать, что современная техника напыления зеркал не позволяет получить одинакового коэффициента отражения по всей плоскости зеркала. Методы, изложенные в работах [5-7], позволяют измерить только интегральный коэффициент отражения различных локальных участков зеркала. При отражении луча на краях зеркала в большей степени сказываются дифракционные потери. В последнем методе угол отражения луча изменяется, что ограничивает точность измерения величины R . Этот метод позволяет измерять коэффициенты отражения только плоских зеркал. Указанными методами трудно измерить с высокой точностью малые оптические потери элементов и сред, помещенных внутри резонатора.

Дальше рассмотрен метод измерения (принципиальная схема измерительной установки изображена на рис. 1) эффективного коэффициента отражения элементов резонатора R , добротности резонатора Q и потерь резонатора α , связанных с R соотношением $\alpha = 1 - R$ и включающих

в себя потери α_1 и α_2 на зеркалах 1 и 2 резонатора, потери α_3 на двойной проход светом оптического элемента 3, помещенного внутри резонатора, а также потери α_4 на двойной проход среды, заполняющей резонатор. Число Френеля для такого резонатора должно быть достаточно большим, чтобы можно было пренебречь дифракционными потерями.

Сущность рассматриваемого метода заключается в следующем. В оптический резонатор длиной L инжектируется вдоль оптической оси световой импульс длительностью τ , такой, что $\tau < 2L/c$, где c — скорость света. В данном случае на выходе из резонатора возникает затухающая последовательность импульсов с периодом $T=2L/c$, причем скорость затухания описывается соотношением $A_n=A_0R^n$, где A_n и A_0 — амплитуды n -го и первого импульсов соответственно, n — число импульсов.

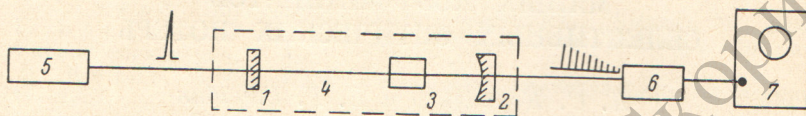


Рис. 1. Принципиальная схема измерительной установки.

1, 2 — зеркала резонатора, 3 — оптический элемент, 4 — среда, заполняющая резонатор, 5 — зондирующий лазер, 6 — фотоприемник, 7 — осциллограф.

В этом случае эффективный коэффициент отражения можно определить из соотношения

$$R = (A_n/A_0)^{1/n}. \quad (1)$$

При малых значениях α ($\alpha \ll 1$) соотношение (1) принимает вид

$$\alpha = \frac{1}{n} \ln A_n/A_0, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4. \quad (3)$$

Добротность резонатора Q можно определить в этом случае из соотношения

$$Q = 2\pi \frac{L}{\lambda} \frac{n}{\ln A_0/A_n},$$

где λ — длина волны излучения, а n , A_0 , A_n , L — измеряемые величины. Нетрудно показать, что при $\alpha \ll 1$ абсолютная ошибка $|\Delta\alpha|$ следующим образом зависит от величины потерь α :

$$|\Delta\alpha| = \alpha \frac{|\Delta A_0/A_0| + |\Delta A_n/A_n|}{\ln |A_0/A_n|},$$

где величины ошибок $|\Delta A_0/A_0|$, $|\Delta A_n/A_n|$ определяются параметрами измерительного устройства. Величина $k \equiv A_0/A_n$ выбирается в зависимости от требуемой точности измерений в пределах линейного диапазона измерительного устройства. При фиксированном k величина

$$B = \frac{|\Delta A_0/A_0| + |\Delta A_n/A_n|}{|\ln A_0/A_n|}$$

является константой.

В этом случае соотношения для определения абсолютной и относительной ошибок принимают следующий вид:

$$|\Delta\alpha| = \alpha B, \quad |\Delta\alpha/\alpha| = B.$$

В реальном измерительном устройстве константа B может иметь значение порядка 0.01. Для этого случая зависимость $|\Delta\alpha| = f(\alpha)$ представлена на рис. 2.

Рассмотрим несколько частных случаев, в которых потери резонатора α определяются различными комбинациями потерь α_i (где $i=1, 2, 3, 4$) отдельных элементов резонатора.

1. Пусть резонатор состоит из зеркал 1 и 2 с коэффициентами потерь α_1 и α_2 . Если оптические элементы внутри резонатора отсутствуют ($\alpha_3=0$), а потерями среды, заполняющей резонатор, можно пренебречь ($\alpha_4=0$), то в этом случае суммарные потери резонатора α равны: $\alpha=\alpha_a\equiv\alpha_1+\alpha_2$. Измеряя A_0 , A_n и n , из (2) находим α_a . Если зеркало 1 является эталонным с известным коэффициентом потерь α_1 , то $\alpha_2=\alpha_a/\alpha_1$.

2. Если в резонаторе с известным эффективным коэффициентом потерь α_a поместили оптический элемент с неизвестными потерями α_3 , то в этом случае $\alpha=\alpha_b\equiv\alpha_a+\alpha_3$. Измерив α_b , можно найти $\alpha_3=\alpha_b-\alpha_a$. Потери на однократный проход светом оптического элемента равны $\alpha_3/2$.

3. Допустим теперь, что резонатор с известным α_a заполнен средой с неизвестными потерями α_4 , а оптический элемент внутри резонатора отсутствует. В этом случае $\alpha=\alpha_c\equiv\alpha_a+\alpha_4$. Аналогично предыдущему случаю $\alpha_4=\alpha_c-\alpha_a$. Очевидно, что потери на единицу длины при $\alpha_4\ll 1$ равны $\alpha_4/2L$, где L — длина резонатора.

Рассмотрим теперь один из способов измерения коэффициентов отражения зеркал в отсутствие эталонного зеркала. Этот способ заключается в последовательном измерении потерь α_a резонатора, образованного парой зеркал, которая выбирается из трех зеркал в трех различных сочетаниях. Пусть $\alpha_{(1)}$, $\alpha_{(2)}$, $\alpha_{(3)}$ — неизвестные коэффициенты потерь этих трех зеркал, причем $\alpha_{(i)}\ll 1$. Осуществив измерения трех величин потерь $\alpha_{12}=\alpha_{(1)}+\alpha_{(2)}$, $\alpha_{23}=\alpha_{(2)}+\alpha_{(3)}$ и $\alpha_{31}=\alpha_{(3)}+\alpha_{(1)}$, легко получить величины: $\alpha_{(1)}=(\alpha_{31}-\alpha_{23}+\alpha_{12})/2$, $\alpha_{(2)}=(\alpha_{23}-\alpha_{31}+\alpha_{12})/2$, $\alpha_{(3)}=(\alpha_{23}-\alpha_{12}+\alpha_{31})/2$.

Рассмотренный метод позволяет при наличии зеркал с высокими коэффициентами отражения измерять малые коэффициенты селективного поглощения различных сред, заполняющих резонатор. В реальном случае значения $R_{1,2}$ достигают величин порядка 0.995, а константа $B=0.01$. Суммарные потери α порядка 10^{-2} , следовательно, могут быть измерены с абсолютной точностью $|\Delta\alpha|=10^{-4}$. Такая точность позволяет измерить потери на проход в среде $\alpha_4=10^{-3}$ с относительной точностью $|\Delta\alpha/\alpha_4|=0.1$. При указанных выше значениях $R_{1,2}$ и B рассмотренный метод позволяет регистрировать потери на единицу длины порядка $2\cdot 10^{-6}$ (при $L=250$ см).

В заключение отметим, что метод нечувствителен к нестабильности амплитуды инжектируемого моноимпульса, поскольку производятся относительные измерения.

Литература

- [1] С. Таланский. Спектроскопия высокой разрешающей силы, 391. ИЛ, М., 1955.
- [2] А. В. Мельников. Прикладная спектроскопия, 6, 821, 1967.
- [3] R. A. Raappanen. Proc. IRE, 50, 2115, 1962.
- [4] A. J. Rack, Biazzo. Bur. Std. Journ. Res. (US), 43, 1563, 1964.
- [5] А. А. Авдеевко, В. М. Акопов, Л. Н. Крамаренко, Ю. В. Набойкин, И. Н. Шкляревский. Опт. и спектр., 16, 712, 1964.
- [6] D. R. Herriott, H. J. Shulte. Appl. Opt., 4, 883, 1965.
- [7] D. Kelsall. Appl. Opt., 9, 85, 1970.

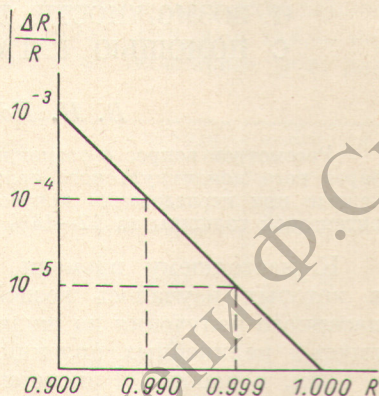


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки измерения эффективного коэффициента отражения зеркал от величины этого коэффициента.