

## キャビティ・リングダウン法による反射率/透過率測定

### [概要]

レーザ用ミラーでは、極めて高い反射率が要求される場合があるが、分光光度計による反射率測定では測定ノイズや測定系のアライメントずれ等の影響により、±0.1%程度の誤差が避けられず、例えば反射率 99.9%以上のレーザミラーを評価することは不可能である。

このような高反射ミラーを評価する手法としては、AMサイドバンド法や伝達関数法、キャビティ・リングダウン法等がある<sup>[1-2]</sup>。本稿では当社で用いられているキャビティ・リングダウン法について紹介する。

### [キーワード]

キャビティ・リングダウン、減衰時間法、超高反射ミラー

### [はじめに]

近年、CMP による超平滑研磨技術とイオンビームスパッタ(IBS)による高精度成膜技術により、光損失の極めて小さい光学部品が得られるようになってきた。当社においても、可視・近赤外光に対して 99.999%以上の反射率を持つ超高反射ミラーや透過率が 99.99%以上の超低損失ウインドウが生産されているが、これらの製品は通常の分光光度計等ではノイズやアライメント誤差により、正確に測定することは不可能である。

このような超低損失光学素子の評価方法として、AMサイドバンド法や伝達関数法、キャビティ・リングダウン法等の手法が提案されているが、AMサイドバンド法や伝達関数法は、光源として極めてスペクトル幅の狭い、縦単一モードCWレーザを用いるため、様々な波長の光源を得ることはコスト的に極めて困難である。

これに対し、キャビティ・リングダウン法は、数 ns から数十 ns のパルス光源を用いる為、OPO 等による波長変換が比較的容易であり、汎用性の高い評価系を構成することが可能であり、当社ではキャビティ・リングダウン法を採用している。

### [測定原理]

僅かに光を透過する2枚の高反射ミラーによって構成された光キャビティの一方のミラーからパルスレーザを打ち込むと、透過した光パルスは2枚のミラーで反射を繰り返すことで、キャビティ内部に閉じ込められる。キャビティに閉じ込められた光パルスはキャビティの損失(ミラーの透過、散乱、吸収の他、キャビティの回折損、キャビティを満たす媒質の散乱と吸収)により次第に減衰する。ここで、もう一方のミラーの後方に光検出器を設け、キャビティからの漏れ光

の減衰時間(緩和時間)をモニターすればキャビティの損失を求めることが可能である。

リファレンスとして空のキャビティ損失を求めておき(図1)、被検ミラーで折り返した場合のキャビティ損失(図2)と比較すれば光学素子の反射率を算出することが出来る。また、キャビティ内にウインドウなどの透過素子を挿入すれば、透過率測定も可能である。(図3)

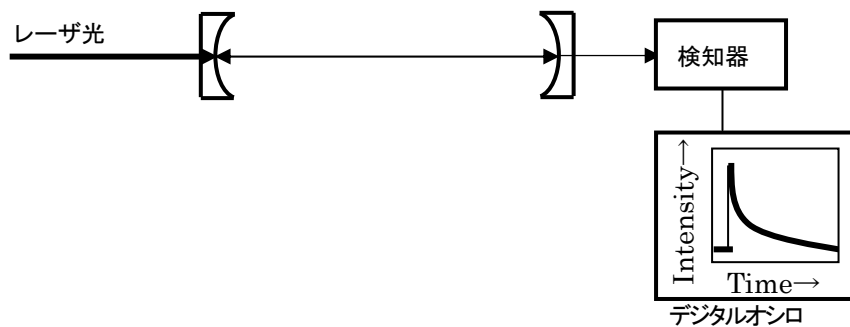


図1. リファレンスの測定

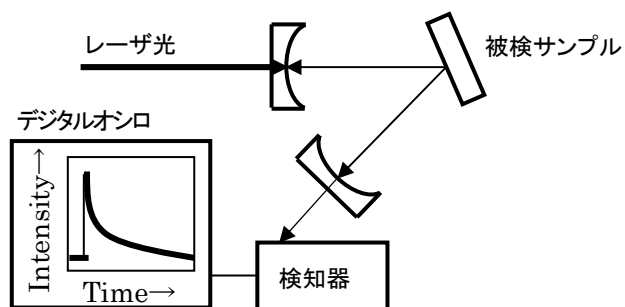


図2. 被検ミラーの反射率測定

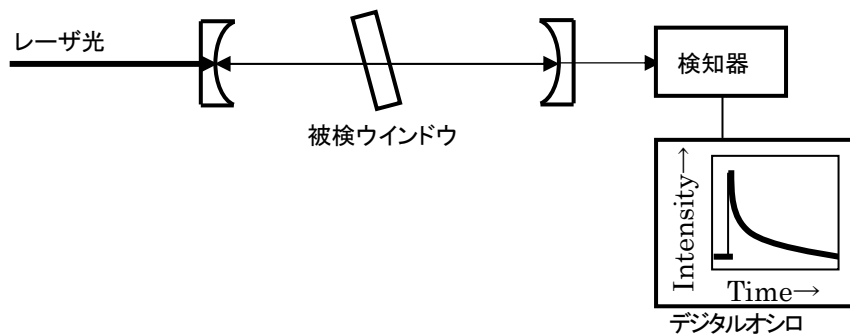


図3. ウインドウの透過率測定

実際にキャビティ内の光パルスの減衰とキャビティ損失の関係を以下において求めてみる。

光パルスがキャビティ内を 1 往復する際の損失を  $L$  とすれば、 $n$  回往復した後の光パルスの強度( $I$ )は、次式で表わされる。

$$I = I_0 \times (1 - L)^n \quad (I_0: \text{光パルス強度の初期値})$$

両辺の対数を取ると、

$$\ln(I) = \ln(I_0) + n \times \ln(1 - L) \cdots (1)$$

また、損失  $L$  が十分に小さく、 $L \ll 1$  と見なせる場合には、一次近似

$$\ln(1 - L) \approx -L$$

を(1)に代入すれば、次式が得られる。

$$I \approx I_0 \times \exp(-n \times L) \cdots (2)$$

一方、キャビティ長を  $l$  とし、光速度を  $c$  とすると、キャビティ内の光パルスは単位時間当たり  $c/2l$  回往復するので、時間  $t$  の間に往復する回数  $n$  は、

$$n = ct/2l$$

で与えられる。これを(2)に代入すれば、内部パワーの減衰を示す式として次式を得る。

$$I \approx I_0 \times \exp\left(-\frac{cL}{2l}t\right)$$

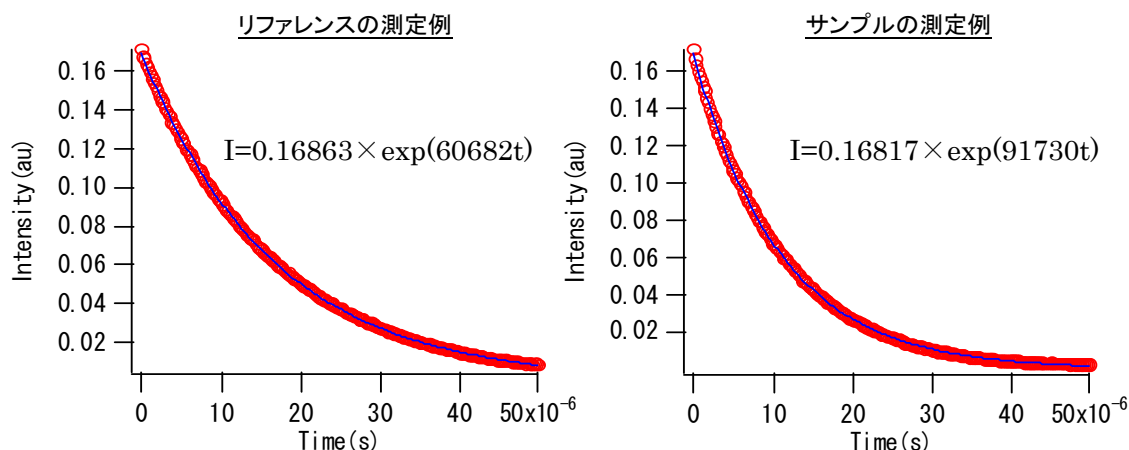
よって、実際に測定されたデータを指数関数でフィッティングし、時刻  $t$  の係数を  $-(c/2l)$  で除すれば、キャビティ損失  $L$  が得られる。

空のキャビティ損失を  $L_0$ 、被検サンプルを挿入した時のキャビティ損失を  $L$  とすると被検サンプルによる損失は  $(L - L_0)$  となるが、光がキャビティを 1 往復する場合、被検サンプルを 2 回反射(又は透過)することから、被検サンプルの反射率( $R$ )/透過率( $T$ )は、以下ようになる。

$$R = 1 - \frac{L - L_0}{2}$$

#### [測定例]

例として、532nm 反射の被検ミラーの測定結果を以下に示す。ただし、この時のキャビティ長は 0.6m、被検ミラーへの光線入射角は  $12^\circ$ 、偏光は P 偏光であった。



共振器長 0.6[m]と、光速  $c:3 \times 10^8$ [m]から、 $-(c/2l) = 2.5 \times 10^8$ となり、キャビティの損失と反射率は以下のように求められる。

リファレンスの損失( $L_0$ )	$60682/(2.5 \times 10^8) = 243\text{ppm}$
被検ミラー測定時の損失( $L$ )	$91730/(2.5 \times 10^8) = 367\text{ppm}$
被検ミラーの反射率( $R$ )	$1-(L-L_0)/2 = 99.9938\%$

[まとめ]

超高反射ミラーの反射率評価として、当社で実施されているキャビティ・リングダウン法について、測定原理と実施例について簡単に紹介した。

現在、測定可能な波長範囲は 350~1700nm、キャビティ損失の測定再現性は約 2%である。ただし、測定系が自動化されておらず、時間(コスト)が掛かる為、反射率保証値が 99.95%以上のハイエンドな製品に限定して本測定を実施しているのが現状である。したがって、今後は自動化により測定コストを下げ、より多くの製品に高精度なデータを提供すると共に、波長範囲を拡張し、紫外域や中赤外域での超高反射ミラーの開発に役立てたいと考えている。

[参考文献]

- [1] G. Rempe, R. J. Thompson, H. J. Kimble, R. Lalezari: Opt. Lett. 17, 363(1992)
- [2] A.Ueda et al.: Optical Review Vol.3 (1996) No.5 p.369-372