

超高安定化レーザーによる超低損失光学薄膜の評価

上田 暁俊・植田 憲一

電気通信大学レーザー極限技術研究センター 〒182-0021 調布市調布ヶ丘 1-5-1

Measurement of Optical Parameters of Ultra-Low-Loss Coatings Using Ultrastabilized Lasers

Akitoshi UEDA and Ken-ichi UEDA

University of Electro Communications, Institute for Laser Science, 1-5-1, Choufugaoka, Choufu 182-0021

We measured optical characteristics of ultra low-loss and high reflectance mirrors for gravitational wave antenna. The highest quality mirrors achieved the total loss factor of 1.5 ppm. The stability of Fabry-Perot cavities composed of an aluminum tube spacer, combinations of a single mirror holder and a spacer, and double mirror holders was investigated by the frequency stability of the laser-diode pumped solid state laser locked to the cavities. The vibration noise of single and double mirror holders cavities was measured to be 20 dB and 60 dB worse than that of the aluminum spacer cavity, respectively. The reflectance of each mirror was evaluated by means of finesse measurement of total combination of three mirrors. Two-dimensional mappings of reflectance were measured for mirrors that were fabricated by the Kaufman-type and RF-type ion beam sputtering machine. The surface distribution of the mirror fabricated by the RF-type ion beam sputtering machine is slightly larger than the Kaufman-type.

1. はじめに

重力波天文学はその要求限界の厳しさから、現代科学の中でももっとも困難な技術要素を含む純粋科学研究であると考えられている。 $h=10^{-21}$ Hz $^{-1/2}$ の感度を要求する重力波検出用レーザー干渉計は、高出力レーザーを量子限界まで安定化すると同時に、干渉計そのものもきわめて厳しい要求をもっている。重力波アンテナには反射率99.99%以上、損失3 ppm以下、ミラー口径は100 mmという非常に厳しい要求がある。開発当初の最高性能は反射率99.9821%、損失158 ppm、共振器の透過効率にしてわずかに1.3%であり、損失を2桁以上低減する必要があった。しかし現在では、反射率99.9867%、損失1.5 ppmといった超高品質ミラーの開発に成功している。また、free electron laser (FEL)、単原子レーザー¹⁾、レーザー周波数安定化²⁾、quantum electro-dynamic experiments等の分野の研究が進むにつれ、超高品質ミラーの必要性は年々高まってきている。超高品質ミラーを使用するためにはミラーの性能を高精度に測定する必要があるが、そのためには周波数安定

化レーザーを光学パラメーター測定に応用する必要があった。なぜなら、超高品質ミラーで構成した共振器はレーザー発振器のスペクトル線幅よりはるかに狭い共振特性をもっているからである。そこで、筆者らはミラーの性能評価を行うための実験設備 (optical test facility) を構築し、国内外の光学メーカーに開放するとともに、ミラー使用環境の整備、ミラー性能維持のためのクリーニング設備 (光学支援実験室: 超純水超音波洗浄, スピンクリーナー, 真空加熱クリーニング, その他研磨設備等を含む) の開発を行っている。本稿では、ミラーの評価方法および注意すべき点、光学パラメーターの2次元面分布測定について報告する。

2. 光学薄膜評価 (超高品質ミラー)

2.1 共振器特性の測定法

作製されたミラーについて分離すべきパラメーターは、反射率 (R)、透過率 (T)、損失 (A) の3つである。これらの量を分離するためには、Fabry-Perot (F-P) 共振器を評価対象ミラーで構成し、そのフィネスと共振器の透過効率を測定することにより行う。これは、測定対象が反射率

E-mail: a_ueda@news2.ils.uec.ac.jp

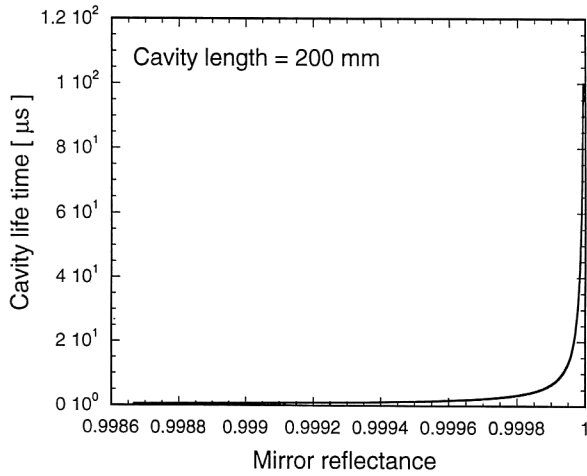


Fig. 1. A relation of cavity life time and mirror reflectance. Cavity length is 200 mm.

99.99%以上で、なおかつ損失が ppm 程度であり、これらの値を高精度に直接測定することは不可能なためである。共振器を組むと測定感度はフィネス倍だけ増幅され、それぞれのパラメータを高精度に分離することが可能となる。ただし、この場合共振器の安定度や光源の安定度が非常に重要となってくる。99.99%以上の反射率をもつミラーで共振器を構成した場合、その共振線幅は数十 kHz 以下であり、その共振器内光子寿命はマイクロ秒以上となる。したがって、使用するレーザーの線幅は十分に狭窄化されている必要があり、測定法によっては線幅を数 Hz まで狭窄化した光源を用い測定精度の向上に努めている。現在、測定時に構成している共振器の長さは 200 mm であり、これは共振器の安定性と光子寿命の2つより決めた長さである。共振器長を 200mm としたとき、反射率と共振器光子寿命の関係は Fig. 1 に示されるようになり、反射率が 99.99% 以上になったとき、その測定感度は急激に向上する。フィネスの測定法として、AM サイドバンド法、伝達関数測定法³⁾、リングダウン法⁴⁾の3種類を開発した。それぞれの測定法を Figs. 2(a), (b), (c) に示す。AM サイドバンド法は周波数マーカーとして、入射光に強度変調をかけ、同時にレーザーの発振周波数を掃引する。このとき得られる2つのサイドバンドのピークをマーカーとして、共振器の透過曲線から共振線幅を求めフィネスを決定する。この方法はレーザーの強度変化の影響を受けないが、使用するレーザーの線幅が共振器の線幅に比べ十分に狭窄化されている必要がある。また、超高フィネスの共振器の場合、その共振器内の光子寿命の影響により実際の共振線幅よりも広くなる。共振器伝達関数測定法は、共振器の最大透過周波数に Drever-Hall 法を用いてレーザー周波数を安定化し⁵⁾、その光に強度変調をかけ、強度変調の変調周波数を掃

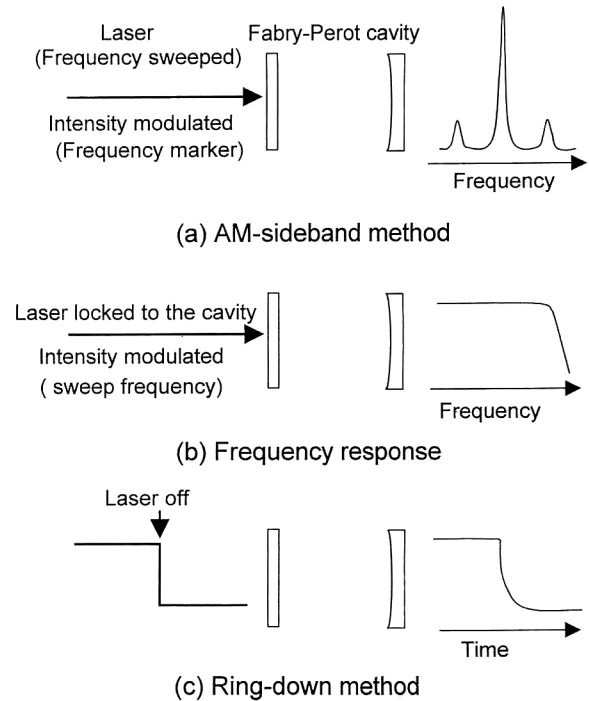


Fig. 2. (a) AM-sideband method, (b) frequency response function of Fabry-Perot cavity, (c) ring-down method.

引して共振器の透過伝達関数を求める。レーザーは常に、共振器の共振周波数にロックされているため、非常に高精度に共振線幅を求めることができる。現在、この測定の測定限界を与えているのは、fast fourier transform (FFT) アナライザの分解能である。共振器が不安定である場合は透過光強度が変化し、結果として正しい伝達関数が求められない。したがって共振器が十分に安定であることが必要である。リングダウン法は共振器内部に光が蓄積された状態のときに入射レーザーを切り、そのときの共振器出射光の減衰時間を観測する。この方法は観測時間がマイクロ秒程度であり、外乱の影響を受けにくい。しかしレーザーの遮断時間や検出器の応答速度が十分でない場合、得られる値は実際の性能より良くなる可能性がある。透過と損失の分離は共振器の透過効率より求める。透過効率は $P_{out}/P_{in} = T^2/(A+T)^2$ で与えられる。ここで P_{in} は共振器に入射している光パワー、 P_{out} は共振器を透過する光パワーである。したがって、共振時の光透過を測定すれば、損失と透過を分離することができる。しかし、最大透過パワーを得るためには、レーザーの周波数が十分に長い間共振点に止まっていなければならない。そのため、透過パワーを測定する場合は共振器にレーザーが安定化されている必要がある。特に高透過率、高反射率ミラーの場合、レーザー安定化時と非安定化時では、透過パワーにして 10% 程度の差を生ずる。

Table 1. Optical characteristics of the ultra-low-loss mirrors.

	AM sideband	Ring-down (single shot)	Frequency resp.
η		$97.69 \pm 1.09\%$	
τ_c	/	$4.81 \pm 0.30 \mu\text{s}$	/
$\Delta \nu_c$	30.7 kHz	$33.1 \pm 1.9 \text{ kHz}$	$30 \pm 2 \text{ kHz}$
\mathcal{F}	2.42×10^4	$(2.24 \pm 0.14) \times 10^4$	$(2.48 \pm 0.18) \times 10^4$
R	99.987%	$99.9860 \pm 0.0008\%$	$99.9873 \pm 0.0009\%$
T	128 ppm	$138.4 \pm 7.5 \text{ ppm}$	$125.4 \pm 8 \text{ ppm}$
A	1.5 ppm	$1.6 \mp 0.9 \text{ ppm}$	$1.5 \mp 0.8 \text{ ppm}$

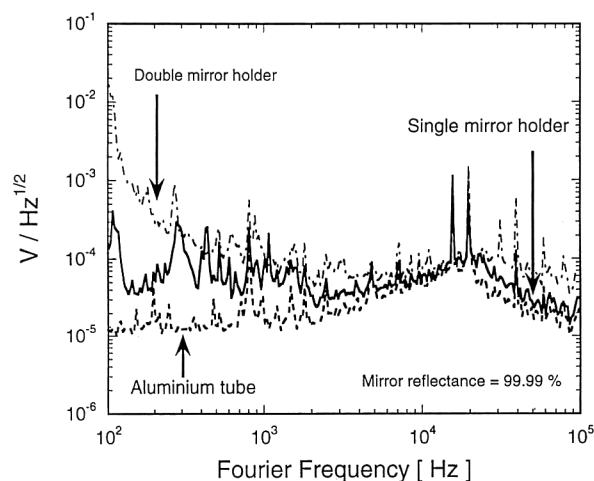


Fig. 3. Stability of the laser frequency. The laser is locked to three types of Fabry-Perot cavities using Drever-Hall technique.

2.2 イオンビームスパッターによる超低損失ミラー

超低損失、高反射率ミラーの評価を行うためには、非常に安定な共振器を作製する必要がある。共振器のスペーサーとし 200 mm のスーパーインバーロッドを用い、その両端にミラーを接着し共振器を組んだ。現在得られているもっとも低損失なミラーは損失 1.5 ppm であり、このミラーはカウフマン型イオンガンを使用したスパッタリング装置で作製された⁶⁾。前節で紹介した 3 つの方法による反射率測定の結果を Table 1 に示す。使用している光源は Nd:YAG 安定化レーザー、発振波長は 1064 nm、共振器入射光パワーは約 2 mW である。すべての結果において、その値は誤差範囲内で一致している。RF 型イオンガンの場合、膜欠陥の発生やビームの均一性といった問題があり、カウフマン型の場合のような高品質な光学薄膜が当初は得られなかった⁷⁾。しかし研究の結果技術が進歩し、現在では反射率 99.9967%、損失 4.8 ppm といった超高品質光学薄膜の作製に成功している。

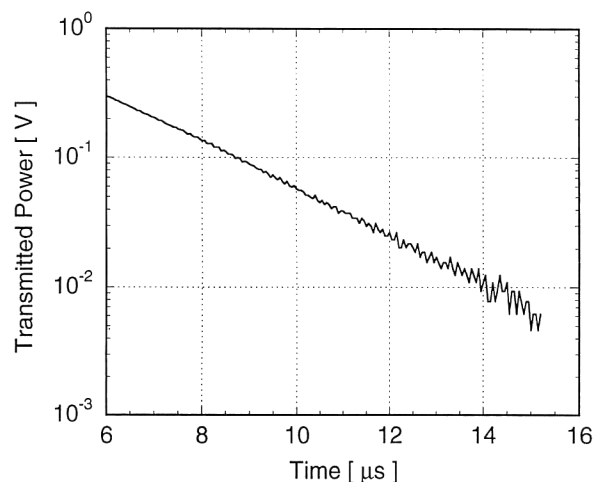


Fig. 4. Ring-down measurement for Fabry-Perot cavity consisting free standing mirrors. The signal has a single decay time constant. In this case, stability of the Fabry-Perot cavity is enough longer than measurement time.

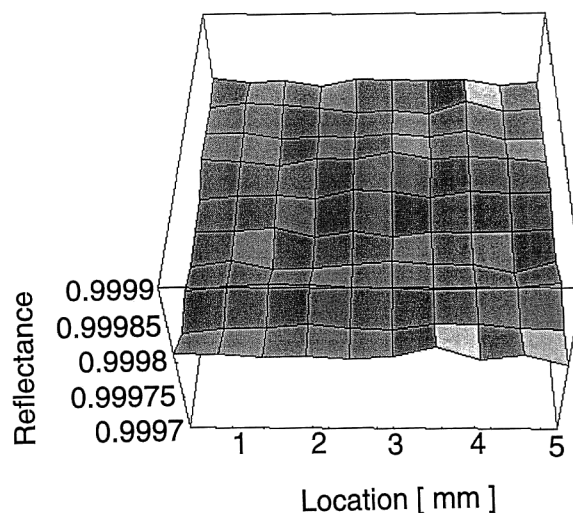


Fig. 5. Two-dimensional mapping of reflectance. The mirrors are fabricated with the Kaufman type ion beam sputtering machine. Measured area is $5 \times 5 \text{ mm}$ by step of 0.5 mm. The reflectance average value is 99.9780% with standard deviation of 8 ppm.

3. 超高品質ミラーの 2 次元性能評価

重力波干渉計やその他の使用目的においては、直径 10 cm 以上という大口径ミラーが必要な場合がある。また、共振器を用いてミラーの評価を行った場合得られる値は、2 つのミラーの性能の平均値である。実際にミラーを使用する場合、常に同時成膜した 2 枚を 1 組として使用するわけではない。したがって、ミラー性能の 2 次元分布および 1 枚のミラー当たりの性能を知る必要がある。ただし、99.99% といった値を共振器を用いたときと同じ精度で測定する方法はなく、共振器を用いて得られる値をなんらかの方法で 1 枚当たりの値に分離する必要がある。ミラーの

Table 2. The reflectance of $r_1 r_2$, $r_1 r_3$, $r_2 r_3$, R_1 , R_2 , and R_3 .

	$r_1 r_2$	$r_1 r_3$	$r_2 r_3$	R_1	R_2	R_3
Cavity life time (μ s)	5.973 \pm 0.174	5.851 \pm 0.465	12.158 \pm 0.822			
Reflectance	0.999892 \pm 3 ppm	0.999886 \pm 5 ppm	0.999890 \pm 7 ppm	0.999884 \pm 16 ppm	0.999893 \pm 16 ppm	0.999880 \pm 24 ppm

反射率分布を求めるには、1枚のミラーを参照ミラーとし、別のミラーを動かして反射率分布を求めればよい。ミラー性能の2次元評価を行うには、ミラーをスキャンするための機構が必要となる。そのため、ミラーをスペーサーの両端に固定することができないので、共振器の安定性が失われる。アルミロッドの両端にミラーを固定した場合、片側のミラーを自立型のミラーホルダーに装着した場合、両側のミラーをミラーホルダーに装着した場合、の3つの状態の共振器に、同一のサーボ回路でレーザーをロックした場合の周波数安定度を示したのが Fig. 3 である。アルミロッドの場合に比べ1枚のミラーをミラーホルダーに装着した場合は1桁、2枚のミラーをミラーホルダーに装着した場合は3桁、安定度が劣化しているのがわかる。20 kHz 付近でいったんすべての安定度が一致しているのは、共振器の応答のためである。共振器に持ち込まれるノイズが白色雑音である場合、周波数安定度は2つの状態で1桁ずつ悪化するはずであるが、1枚のミラーをミラーホルダーにした場合と2枚のミラーをミラーホルダーに装着した場合は2桁の周波数劣化がみられる。これは共振器を構成するミラー間に持ち込まれているノイズが相関をもっているためと考えられる。共振器の安定度が低下した状態では、共振器の伝達関数や AM サイドバンドでフィネスを求めることは不可能である。しかし、リングダウン法は測定時間がマイクロ秒と短く、この時間内で共振器が安定とみなせると仮定すれば測定可能である。共振器が安定かどうかを知るためには、実際に測定を行い、その波形が単一時定数となっていることを確認すればよい。Fig. 4 に2つのミラーホルダーで共振器を構成した場合の計測波形例を示す。波形は単一時定数で減衰しており、計測時間において共振器が十分に安定であることを示している。Fig. 5 はミラーの反射率面分布について測定を行った結果である。測定は、5 \times 5 mm で0.5 mm ごとに行っている。共振器を構成するミラーのうち1枚を参照ミラー（固定）とし、もう一方のミラーを動かし、反射率の面分布を求めている。反射率の平均値は99.9780%でありその分散は8 ppm であった。このミラーはカウフマン型イオンビーム・スパッタリング (IBS) 装置で作製された。この計測系の測定誤差は5 ppm ほどであり、それに比して顕著な反射率面分散は認

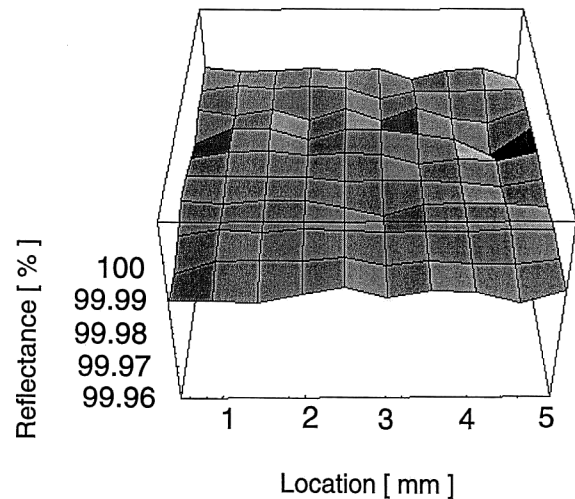


Fig. 6. Two-dimensional mapping of reflectance. The mirrors are fabricated with RF-type ion beam sputtering machine. The reflectance average value is 99.9915% with standard deviation of 15 ppm. This value is slightly larger than the mirrors that are fabricated with the Kaufman type ion beam sputtering machine.

められなかった。この計測で求まる反射率は、2枚のミラーの振幅反射率の積であり、反射率面分布は相対的な反射率分布を示している。したがって、1枚当たりの絶対反射率面分布を求める必要がある。共振器を構成するミラーの反射率を1枚ごとに求めるためには、新たに1枚のミラーを加えすべてのミラーの組み合わせについての反射率を求めればよい。このとき、それぞれのミラーの振幅反射率を r_1 , r_2 , r_3 、計測により求めた $r_1 r_2$, $r_1 r_3$, $r_2 r_3$ の組み合わせに対する強度反射率を a , b , c とすると、それぞれのミラーに対する反射率は

$$r_1 = \sqrt{\frac{ab}{c}} \quad (1)$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{ac}{b}} \quad (2)$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{cb}{a}} \quad (3)$$

で与えられる。今回実験に用いたミラーの曲率は、平面1枚 (M_1)、 $R=1000$ mm の球面鏡が2枚 (M_2 , M_3) である。共振器長は $M_1 M_2$, $M_1 M_3$ の組み合わせに対し 200 mm, $M_2 M_3$ の組み合わせに対し 400 mm である。 M_2 について

は、いったんミラーを取り外す必要があるため、ミラーの反射率面分布を測定しておく必要がある。今回測定を行ったそれぞれの組み合わせに対するミラーの反射率と、各々のミラーの反射率を Table 2 に示す。この測定を行ったミラーは、1枚ごとの反射率がわかっており、反射率基準ミラーとなる。これらのミラーのうち1枚を参照ミラーとし、未知の反射率をもつミラーと組み合わせて共振器を組み、反射率面分布の測定を行えば、1枚のミラーについての値を知ることができる。その測定結果を Fig. 6 に示す。測定領域は 5×5 mm で測定は 0.5 mm ごとに行っている。反射率の平均値は 99.9915% であり分散は 15 ppm であった。このミラーは、RF 型 IBS で作製された。RF 型 IBS では、同時成膜サンプルにおいても 0.5% 程度反射スペクトル中心がばらつくことが確認されており、屈折率にばらつきがあると考えられる。このような効果の影響により、カウフマン型 IBS よりも若干大きな反射率面分布が“現状”では生じている。もちろん、これらはコーティング条件を最適化することで、近い将来解決されると期待できる。

4. ま と め

ミラーの損失は 1.5 ppm に達し、実験当初に比して 2 桁改善された。この値は重力波干渉計で必要とされている性能を満たすものである。共振器を自立型のミラーホルダーで構成したときに持ち込まれる周波数ノイズについて計測を行った。低周波領域では、ミラーホルダーによって持ち込まれるノイズが1つのミラーホルダーの場合 20 dB、2つのミラーホルダーの場合 60 dB であった。ミラーホルダーの安定性については定量的に評価された例がなく、このような方法で複数種類のミラーホルダーについて同一のミ

ラーとサーボ回路を用いレーザーを共振器にロックし、その周波数安定度を測定すれば、ミラーホルダーの安定性についての評価を行うことが可能である。現在では、RF 型 IBS においても、超低損失、高反射率ミラーの作製が可能となった。しかし、まだ成膜の安定性の面では改善の余地がある。

超高品質ミラーの資料提供では、日本航空電子(株)その他の民間企業、国立天文台のコーティング研究グループの協力を得た。また、この研究の一部は文部省科学研究費補助金の援助を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari and M. S. Feld: "A laser with one atom in an optical resonator," *Phys. Rev. Lett.*, **73** (1994) 3375-3378.
- 2) T. J. Kane and R. L. Byer: "Monolithic, uni-directional single-mode Nd:YAG ring laser," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 65-67.
- 3) N. Uehara and K. Ueda: "Accurate measurement of ultra low loss in a high finesse Fabry-Perot interferometer using the frequency response function," *Appl. Phys.*, **B61** (1995) 9-15.
- 4) N. Z. Anderson, J. C. Frisch and C. S. Masser: "Mirror reflectometer based on optical cavity decay time," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 1238-1245.
- 5) R. W. P. Drever, J. L. Hall and F. V. Kowalski: "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," *Appl. Phys.*, **B31** (1983) 97-105.
- 6) A. Ueda, N. Uehara, K. Uchisawa, K. Ueda, H. Sekiguchi, T. Mitake, K. Nakamura, N. Kitajima and I. Kataoka: "Ultra-high quality cavity with 1.5 ppm loss at 1064 nm," *Opt. Rev.*, **5** (1996) 369-372.
- 7) 瀧岡 泉, 伊藤和彦, 関根啓一, 江藤和幸, 西田恵美子: "光学薄膜の低欠陥・超平滑形成技術", *応用物理*, **66** (1997) 1345-1349.