重力波検出干渉計用大口径ミラーの評価

上田 暁俊, 植田 憲一, 佐藤 修一*, 三代木 伸二*,†, 大橋 正健*, 伊藤 和彦**

渡邊 晃司**, 中村 憲司**, 北島 直哉**, 潟岡 泉**

電気通信大学 レーザー極限技術研究センター (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

*国立天文台 宇宙計量部門 (〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-2)

**日本航空電子工業(株) 中央研究所 (〒196-0021 東京都昭島市武蔵野 3-1-1)

Measurement of Optical Characteristics for Mirrors of the Gravitational Wave Detection Antenna

Akitoshi UEDA, Ken-ichi UEDA, Shuichi SATO,* Shinji MIYOKI,*† Masatake OHASHI*

Kazuhiko ITOU,** Koji WATANABE,** Kenji NAKAMURA**

Naoya KITAJIMA,** and Izumi KATAOKA**

Institute for Laser Science, the University of Electro-Communications, 1-5-1 Choufugaoka, Choufu, Tokyo 182-8585

** National Astronomy Observatory at Mitaka, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588*

***Central Research Laboratory, Japan Aviation Electronics Industry Ltd.*

3-1-1 Musashino, Akishima, Tokyo 196-0021

(Received August 18, 1998)

We measured the optical characteristics of ultra low-loss and high reflectance mirrors. Reflectance was evaluated by means of finesse measurement using the ring down method. The mirrors show a loss of 4.8 ppm and finesse of nearly equal to 10^5 . Surface distribution of reflectance was measured for ultra-high quality mirrors fabricated with a RF-type Ion Beam Sputtering machine. The average reflectance was 99.9915 % with a standard deviation of 8 ppm. The measured area was 5×5 mm by step of 0.5 mm. Two-dimensional mapping of mirror loss was measured for the mirrors of a 20 m gravitational wave detection antenna using small laser spot. The mirror loss coefficient was evaluated based on the transmission efficiency of the Fabry-Pérot cavity. The measured area was 7.5×5 mm. The average loss value was 40 ppm for the small laser spot measurement. The mirror loss coefficient for a large beam was measured using a 20 m Fabry-Pérot cavity. The mirrors show a loss of 28 ppm and a reflectance of 99.9875 %.

Key Words: Gravitational wave detector, Fabry-Pérot cavity, High-quality mirror

1. はじめに

我々のグループでは、重力波干渉計用超高品質ミラーの開発を行ってきた。重力波が伝播してきた場合、空間に $\Delta L/L = 10^{-21}$ 程度の歪みが生じ、この歪みをマイケルソン型干渉計で検出する。この干渉計は、実効的な干渉計距離を稼ぐために、それぞれの腕が Fabry-Pérot 干渉計で構成されている。到達重力波の予想周波数は 1kHz 以下であり、この領域で干渉計および光源は超高安定化されている必要がある。レーザーは $10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ の周波数安定度を必要としている。この安定度を得るために、レーザーを、Pound-Drever-Hall 法で基準共振器に安定化し¹⁾、基準共振器の透過光を干渉計光源として使用する。したがって、基準共振器は高反

射率、高透過効率の必要がある。現在、国立天文台の敷地内に、300m の重力波干渉計が建設されている (TAMA-300)。ここで使用するミラーも同様に超低損失、高反射率の必要がある。ミラーの性能を高感度に評価するためには二枚のミラーを使用し、Fabry-Pérot 共振器を作製し、そのフィネスと透過効率を求める。この場合得られる、共振器線幅は kHz 程度であり、高精度にミラーの性能を決めるには、十分に安定化された光源が必要となる。したがって、重力波干渉計用超高安定化レーザーを開発すると同時に、ミラー評価技術の開発を行ってきた。ミラー反射率の評価方法として、AM-sideband 法、伝達関数測定法²⁾、共振器光子寿命測定法³⁾ の 3 種類を開発し、周波数領域および時間領域でのフィネス評価が可能となっている。現在、我々のグループでは

† 現在の所属：東京大学 宇宙線研究所 (〒188-8502 東京都田無市緑町 3-2-1)

† Present address: Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), Tokyo University, 3-2-1 Midoricho, Tanashi, Tokyo 188-8502

Kaufman型イオンビームスパッタリング(IFS)装置を用いて損失1.5ppmの超高品質ミラーを得ることに成功している⁴⁾。しかし、Kaufman型IFSには、フィラメントからの不純物放出や、成膜中のフィラメント切断などの問題が有り、超高品質光学薄膜の作製は、徐々にRF型IFSに移行しつつある。RF型IFSはイオンガンより不純物が発生する確率が低く、生成するプラズマ密度が高く、大きな出力のイオンビームが得られる。また、イオンガン内にてラジカルな酸素を生成することが可能であり、これらは、大口径超高品質薄膜の作成に有利であると考えられる。したがって、新たに導入した、RF型IFSの条件出しを行い、重力波干渉計TAMA-300に使用する直径100mmのミラーの成膜を行う事になった。この装置での条件設定が終了し、超高品質光学素子の作成が可能となった。本稿では、RF型IFS装置により成膜した超高性能ミラーの評価結果および重力波干渉計用ミラーの最終仕様について報告する。

2. 実験

2.1 ミラーの損失評価

Fig.1に実験配置図を示す。フィネスの計測は共振器内光子寿命法により行った。光源はNd:YAGレーザー(Light-wave: 124-1064-010-F)、発振波長は1064nmである。音響光学素子(AOM)の1次回折光を共振器に入射している。共振器に入射するパワーは約2mWである。コンパレータは共振器からの反射パワーと参照電圧を比較し、反射パワーが参照電圧よりも低くなったときにコンパレータが動作し、AOMが共振器入力を遮断する。共振器反射率が減少するということは、入射光が光共振器にモード整合して、入力パワーが共振器に蓄積された結果である。この時の共振器出射光の減衰信号をデジタルオシロスコープ(Hewlett Packard: HP-54600A)で観測する。光入力が遮断された条件での出力信号は、共振器内の光強度の減衰時定数、すなわち共振器内光子寿命を示す。光強度減衰定数を τ_c 、共振器長を L とした場合、反射率 R と減衰定数の関係は

$$R = 1 - \frac{L}{c\tau_c} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 c は光速である。共振器の透過効率

Fig.1 Experimental setup for measuring cavity finesse. Laser emission wavelength is 1064 nm, its optical power is about 16 mW. The cavity length is 200 mm.

は、共振器に入射している光パワー P_{in} 共振器を透過する光パワー P_{out} 、ミラー透過効率 T および損失 A を用いて

$$\eta_t = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T^2}{(A+T)^2} \quad (2)$$

で与えられる。この式とエネルギー保存則 $R+T+A=1$ より、反射率及び共振器透過効率の計測を行えば、反射率、透過効率、損失を得ることができる。今回測定に使用したミラーは、 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 32層からなる誘電体多層膜ミラーであり、RF型IFS装置で成膜された。測定に用いたFabry-Pérot共振器は、平面と曲率1000mmのミラーで構成され、共振器長は200mmである。非同時成膜の2組のミラーについて評価を行った結果をFig.2に示す。灰色線は10回の計測結果を別々にプロットしたものであり、黒線はその平均値を示している。曲線(a)で表されるミラーの共振器光子寿命は20.19 μs であり、共振線幅は7.9kHz、フィネスは95171であった。この結果より反射率は99.9967%と求まった。共振器長は200mmであるが、共振器光子寿命は20 μs あり実効的な2つのミラー間の距離は6kmに達した。このため、フィネスを測定するためには非常に高いアライメント精度が必要で、同時に、共振器自身が十分に安定でなくてはならない。加えて、共振線幅は8kHz程度であり、この値は通常のレーザーの線幅が100MHz程度であるのに比べて非常に狭い。したがって、ミラー評価を高精度に行うためには、十分に周波数安定化した光源が必要となる。共振器の透過効率は72.8%であり、これらの結果より損失は4.8ppm、透過は28.2ppmとなった。他方の試作ミラーについての計測結果はFig.2の(b)であらわされる曲線となり、共振器光子寿命は14.11 μs であった。透過効率の測定とあわせて、反射率99.9953%、損失5.8ppm、透過41.4ppmという結果を得た。反射率は試料間で若干異なっているが、損失についてはほぼ同じ値となっており、定常的にこのような超低損失ミラー

Fig.2 Measurement of cavity decay time constant using the ring-down method. The gray lines show 10 times measurements of cavity decay time constant. The solid lines are average of the ten times measurements for each Fabry-Pérot cavities. The data shows that the cavity has finesse of nearly equal to 10^5 . The two sets of mirrors is fabricated in different running time of the IBS machine.

をRF-IBS装置で作成することが可能である。二組のミラーの反射率差はわずかに $1.4 \times 10^{-3}\%$ であり、通常の測定では区別することが困難である。しかし、その共振器光子寿命は大きく異なっており99.999%近い反射率を非常に高い精度で決めることが可能となる。これらのミラーの評価結果と誤差を、Table 1に示す。誤差は、10回の測定の分散値である。これまで、RF型IBS装置ではビームの均一性や膜内欠陥の問題があり、高品質な光学薄膜を作成することが出来なかったが、成膜条件の最適化により、Kaufman型IBS装置に匹敵するような、超高品質光学薄膜の作製が可能となった。Kaufman型IBS装置では、フィラメントからの初期放出物質による汚染や、有限のフィラメント寿命など、最良の成膜が可能な期間が限られていた。また、大口径イオンガンの動作にも問題があった。そこで、RF型IBS装置の導入により大口径超高品質光学薄膜の試作を行い、その光学特性を測定した。

2.2 ミラー性能の二次元評価

これまでの計測では、共振器長200mm程度の小型干渉計を用いてミラーの性能評価を行ってきた。この場合、共振器モードに整合するビームサイズは0.4mm程度であった。しかし、TAMA-300のような大規模干渉計では、ミラー性能の不均一性や理想球面からのずれにより、ビーム内の位相の乱れ等が発生すると、それらは新たに損失の要因として加わり、小型干渉計で得られた性能とは異なる値を示す可能性がある。大規模干渉計を稼動しミラーの性能を評価することは容易でないで、小型干渉計において光学パラメータの二次元分布を測定することにした。これにより、実際の使用状況における性能についても、ある程度予測可能である。従来、ミラーの光学パラメータ計測は、スーパーインバーなどの中空ロッドの両端にミラーを固定し、安定な共振器を構成することで行ってきた。しかし、二次元のミラー性能を測定するためには、共振器を構成するミラーをそれぞれ独立なミラーホルダーに入れ、光軸と垂直な平面内でミラーを可動とする必要がある。測定対象となっているミラーは反射率99.99%程度であり、二つのミラー間の実効的な距離はkmとなる。したがって、地面振動によるミラーアライメントの微小変化が測定に大きな影響を与える。この共振器構成に対し、Pound-Drever-Hall法でレーザーを安定化しその周波数安定度を測定した場合、フーリエ周波数で200Hz以下の領域の安定度が、共振器を中空ロッドで構成した場合に比べ3桁以上悪化する。しかし、高

Table 1 Measured optical characteristics of the F-P cavity.

	<i>L</i>	200.0 ± 1.0 mm
	<i>FSR</i>	750.0 ± 3.8 MHz
	Mirror set 1	Mirror set 2
τ_c	20.19 ± 0.61 μ s	14.11 ± 0.41 μ s
$\Delta\nu_c$	7.880 ± 0.229 kHz	11.28 ± 0.320 kHz
<i>F</i>	95171 ± 3347	66483 ± 2285
<i>R</i>	99.9967 ± 0.0001 %	99.9953 ± 0.0002 %
<i>T</i>	28.2 ± 0.9 ppm	41.4 ± 0.9 ppm
<i>A</i>	4.8 ± 0.2 ppm	5.8 ± 0.7 ppm

周波数領域での振動の影響は比較的小さい⁵⁾。もし、フィネスの測定時間が、外部雑音の周期よりも十分に短ければ、精密に反射率を測定することが可能である。これを考慮すると、測定時間中にレーザーが共振器モードに結合している必要がなく、短時間で測定の終了する共振器光子寿命測定法が、二次元計測にはもっとも適した方法だといえる。この共振器構成による共振器光子寿命の測定例をFig.3に示す。得られた信号は単一時定数で減衰しており、外部雑音の計測に対する影響は見られない。この共振器構成で、レーザー入射側のミラーを参照ミラーとし、出射ミラーを動かすことによりKaufman型IBS装置で作製したミラーに対し、反射率面分布の測定を行った。測定ミラーを動かすことによるモード整合率の低下は10%以下であり、参照ミラー上でのビームの安定性は十分ある。しかし、念のため、1方向に掃引する毎に測定ミラーをアライメントし直し、参照ミラー上でのビームの安定性を向上させている。Fig.4

Fig.3 Cavity decay signal. The free standing mirrors compose the Fabry-Pérot cavity. The decay signal has a single decay time coefficient. Influence of external noise is not observed on this measurement.

Fig.4 Two-dimensional mapping of reflectance. The mirrors are fabricated with a Kaufman-type IBS machine. Average value of the reflectance is 99.9810 % with standard deviation of 8 ppm. Measured area is 5 square mm by step of 0.5 mm.

は、Kaufman型IBS装置で作製されたミラーの反射率面分布を示している。測定領域は $5 \times 5 \text{ mm}$ で 0.5 mm 毎に反射率測定を行っている。反射率の平均値は、99.9810%、その分散は8ppmであった。同様の測定をRF型IBS装置で作製したミラーについて行い、反射率の平均値99.9915%、分散値15ppmを得ている。RF-IBS装置で作製した別のミラーについて、反射率面分布計測と同じように計測を行い、ミラーの損失マッピングを行った。共振器長は600mmでミラー上のビーム径は 0.3 mm であり、測定領域は $7.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ で、 7.5 mm 方向は 0.5 mm 毎、 5 mm 方向は 1 mm 毎に計測を行った。この測定で得られた損失値のヒストグラムをFig.5に示す。損失は50ppmまでに大きな分布をもち、それ以上の部分で損失の大きな特異点がある。50ppmまでは、均質膜からの損失であり、それ以上は膜欠陥領域からの損失と考えられる。特異点を除いた損失の平均値は27ppmであった。小口径ビームで損失を測定した場合、ビーム径に対する欠陥の面積比が大きくなるために特異的な大損失を示すが、大口径ビームで損失測定を行った場合にはその比が非常に小さくなり、欠陥の損失に与える影響は小さくなる。したがって、ビームの位相乱れなどによる大幅な損失の増加がなければ、大口径ビームで測定を行った場合の損失値は、27ppmに近い値となることが期待される。TAMA-300のモード径は 15 mm であり、この測定に用いたビーム面積の2500倍である。

2.3 20m干渉計による損失評価

現在、国立天文台ではTAMA-300のプロトタイプである20m重力波干渉計が稼動している。この干渉計を用いて、大口径ビームに対するミラー性能の評価を行った。共振器長は、 $1.99 \times 10^4 \text{ mm}$ である。共振器は真空中に設置され、 10^{-7} torr まで減圧してある。したがって、大気吸収による損失測定への影響はない。共振器を構成するミラーは、ワイヤーで吊るすとともに位置制御が加えられ、防振されている。フィネスの測定は、共振器の伝達関数を測定するこ

Fig.5 Histogram of measured loss using small beam. The average value of the loss is 40 ppm for the measured region of $7.5 \times 5 \text{ mm}$ and 27 ppm with exception of exceptional large defect points.

Fig.6 Measurement of frequency response of the Fabry-Pérot cavity. The cavity length is $1.99 \times 10^4 \text{ mm}$. The Fabry-Pérot mirrors are locked to the laser using the Pound-Drever-Hall technique. Measured finesse value is 24973.

とにより行った。伝達関数は、Pound-Drever-Hall法で入射光に対し共振器を安定化し、入射光に掃引サイン波でAM変調を掛け、その時の共振器透過光を測定することにより求めた。この時、共振器の伝達関数は、共振器の透過曲線の半値半幅を f_c とし

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad (3)$$

で与えられる²⁾。ここで、 f はフーリエ周波数である。Fig.6に測定波形を示す。データは一回の計測によるもので、測定誤差は最小二乗法によるフィッティング誤差である。この計測によりフィネスは24973と求まり、反射率は99.9875%となった。また、透過効率の計測より、損失は28ppmとなった。ビーム径は 8 mm であり、測定値はこの領域での平均値を示している。損失面分布の測定において、大損失部分を除いた平均値は27ppmであり、小口径ビームによる計測と非常に近く、大口径化によって生じるであろうと考えていた位相乱れ等による損失の増加は、認められなかった。損失面分布の測定において、測定ビーム径は、ミラーの位置移動距離に比べて小さく、未測定部分が測定領域内に存在する、しかし大口径ビームでの計測結果より、この領域に膜欠陥が点在している可能性はない。したがって、膜の欠陥発生確率は非常に小さく、20m干渉計よりも更に大きな口径を必要とするTAMA-300のミラーにおいても、十分に超高品質成膜が可能であると判断し、重力波干渉計用ミラーの成膜最終仕様を決定するとともに最終成膜に着手した。TAMA-300用ミラーの最終仕様は、成膜径 100 mm 、成膜層数、 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 30層、反射率99.99%以上、反射率面分布10ppm以下、損失は実際の使用状況において50ppm以下である。

3. 結果及び考察

ミラーの面性能を均一にするためには、均一膜厚の成膜を行わなければならない。そのためには、イオンビームの分布が線形で表せる領域において基板を遊星運動させ、成膜を行う必要がある。線形であらわされるビーム領域を得るためには、成膜面積よりもはるかに大きい面積を持つイオンビームが必要となる。Kaufman型IBS装置を使用した成膜において、1.5ppm損失のミラー作製に成功していたが、Kaufman型のようにフィラメントを用いてイオンビームを作る場合、良質且つ不純物混入の小さい大口径イオンビームを得ることは困難である。したがって、不純物混入確率が小さく良質な大口径イオンビームを得やすいRF型IBS装置での大口径超高品質薄膜の開発を行った。成膜当初、グリッドからの不純物発生、ニュートライザーからの高エネルギー電子の発生、Kaufman型IBSとのラジカルイオン発生率の違いなどにより高品質な膜は作製できず⁶⁾、ミラーの損失は100ppm程度であった。しかし、イオンガンのパワーや酸素流量、ニュートライザーより発生する電子のエネルギーを最適化することにより、Kaufman型IBS装置に匹敵する損失4.8ppmのミラーを得た。非同時成膜の2組のミラーにおいて、その損失値はほぼ同じであり、定常的にこの程度の損失のミラーが作製可能である。また、フィネスは約 1×10^5 であり、光子を20 μ sという長い時間、微小空間に閉じ込めておくことが可能でありながら、76%以上の共振器透過光を得ることが出来る。この事実は、レーザーの周波数安定化、QED、FELなどの実験において非常に重要な意味を持つ。Kaufman型とRF型IBS装置で作製したミラーについての反射率面分布の測定を行った。Kaufman型IBS装置で作製したミラーでは、反射率の平均値99.9810%、分散8ppm、RF型IBS装置で作製したミラーでは反射率の平均値99.9915%、分散15ppmを得た。現状ではRF型IBS装置で作製したミラーの方が若干大きな反射率面分布を持っている。損失については、TAMA-300のプロトタイプである20m干渉計用に作製されたミラーについて、小口径ビームで損失面分布を測定するとともに、20mのFabry-Pérot共振器を組み、大口径ビーム時の損失測定を行った。損失面分布の平均値は、測定領域 7.5×5 mmにおいて40ppmであった。また、20mのFabry-Pérot干渉計における測定での損失値は28ppmとなった。損失面分布の測定において、例外的な大損失部分を除いた平均値は、27ppmであった。成膜における、膜欠陥の発生率は低くTAMA-300用ミラーにおいても、この程度の損失のミラーを得ることは十分に可能であると考えている。Fig.7に超低損失ミラーの開発経緯を示す。超高品質ミラーの開発当初その損失は、200ppm近くであったが、1996年にはKaufman型IBS装置で1.5ppmの損失ミラーの開発に成功し、ミラーの性能を2桁向上させた。また、1998年には、RF型IBS装置で4.8ppm損失の

Fig.7 The history of developing ultra-high-quality mirrors. The loss of the mirror fabricated with the Kaufman IBS machine reached to 1.5 ppm in 1996. We obtained ultra-low-loss and high finesse cavity in 1998. The mirrors were fabricated with the RF-type IBS machine.

Table 2 Final specification of the TAMA-300 mirrors.

Mirror diameter	100 mm
Coating machine	RF-type IBS machine
Materials of coating	Ta ₂ O ₅ and SiO ₂
Number of layers	30
Reflectance	≥ 99.99 %
Surface distribution of reflectance	≤ 10 ppm

ミラーの開発に成功した。このミラーは超低損失でありながら、そのフィネスは、ほぼ10万に達した。最後に、重力波干渉計用ミラーの最終仕様をTable 2に示す。

謝 辞

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。

参考文献

- 1) R. W. P. Drever, J. H. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward: Appl. Phys. **B31** (1983) 97.
- 2) N. Uehara and K. Ueda: Appl. Phys. **B61** (1995) 9.
- 3) N. Z. Anderson, J. C. Frisch, and C. S. Masser: Appl. Opt. **23** (1984) 1238.
- 4) A. Ueda, N. Uehara, K. Uchisawa, K. Ueda, H. Sekiguchi, T. Mitake, K. Nakamura, N. Kitajima, and I. Kataoka: Opt. Rev. **5** (1996) 369.
- 5) A. Ueda and K. Ueda: 光学 **27** (1998) 530.
- 6) 湯岡 泉, 伊藤 和彦, 関根 敬一, 江藤 和幸, 西田 恵美子: 応用物理 **66** (1997) 1345.