

技術紹介

1

極低損失誘電体多層膜鏡の開発

Development of ultra low loss mirrors for high finesse cavity

江藤 和幸	Kazuyuki Etoh	商品開発センター シニアエキスパート
関根 啓一	Keiichi Sekine	商品開発センター エキスパート
渡邊 昌彦	Masahiko Watanabe	商品開発センター 主任
伊藤 和彦	Kazuhiko Ito	航機事業部 第二技術部 シニアマネージャー
渡邊 晃司	Koji Watanabe	航機事業部 第二技術部 主任

キーワード: 精密計測、光格子時計、光共振器、誘電体多層膜鏡

Keywords : precise measurement, optical lattice clock, optical cavity, dielectric multilayer mirror

要 旨

近年、光を使った超精密計測の技術が進歩しています。中でも特に次世代の時間標準に成りえるものとして光格子時計の研究開発が大学や国の研究機関において行われています。この光格子時計には、超高反射率ミラーを組み合わせた光共振器が使われています。我々は、この光共振器用のミラーを、これまでに培ってきた誘電体多層膜鏡の製造技術を改良することで開発しました。波長 1064 nm で反射率 99.99975 %、フィネス 1,256,000、波長 698 nm で反射率 99.99941 %、フィネス 532,000 を達成することができました。

SUMMARY

Recently, precise measurement by using optical method has been improved greatly. Especially, the optical lattice clock which will be next-generation standard of time is studied in many universities and national laboratories.

In optical lattice clocks, optical cavities with two high reflection mirrors are used. We refined our accumulated technologies and developed such high reflection mirrors. Finally, a reflectivity of 99.99975 % and finesse of 1,256,000 at 1064 nm and a reflectivity of 99.99941 % and finesse of 532,000 at 698 nm are achieved.

1. はじめに

レーザが発明されて以来、光を使っていろいろな物理量を精密に計測するという技術が発達し、様々な産業あるいは科学の分野において利用されています。当社においても、この光計測技術を応用した製品として、物体の運動を検出するリングレーザジャイロ(RLG)¹⁾やファイバーオプティックジャイロ(FOG)²⁾といったものを製造・販売しています。一方、世の中の最先端の研究開発に目を向けてみると、光を使った重力波の検出³⁾(太陽と地球との距離に対して水素原子 1 個分の変位を計測することが要求されている)や光を使って時間(秒)を現在の定義から数ケタ改善するとかいった試みがなされています。特に、秒の再定義については、東京大学の香取教授により光格子時計⁴⁾が提案されて以来、日本の内外で活発な研究開発が行われています。

このような光を使ってある物理量を測定しようとする際、超高品質なミラーが使われることがあります。例えばRLGの場合、レーザの光路が三角形の形状をしているためコーナーにミラーが使われています。しかし、そのミラーの表面に凸凹があると光が散乱されるためロックインという現象が起こりRLGの性能を低下させてしまいます。⁵⁾ また光格子時計に使われるレーザには、線幅が非常に狭いものが求められています。その超狭線幅のレーザを得るためにファブリペロー型の光共振器(高反射率のミラーを対向させて配置したもの)が使われますが⁶⁾、このミラーの反射率は極限まで高くしたものの、言い換えると散乱損失と吸収損失を極限まで低下させたものが必要とされています。

本報では、RLG 用のミラーの製造技術からスタートし、最近我々が取り組んでいる光格子時計用光共振器ミラーの研究開発の内容について紹介します。

2. 光共振器

2.1 光共振器について

図1に今回作製したファブリペロー型の光共振器の構造と写真を示します。

高反射ミラーが対向する形でスペーサーに張り合わせてあります。図中の誘電体多層膜は図示するために便宜上厚く書いてありますが、実際の厚さは数 μm と非常に薄いものです。この光共振器に光が入射すると共振条件を満たす波長の光だけが透過することができます。その条件はフリースペクトルレンジ(FSR)の間隔で出現し、光共振器の長さを L 、光速を c として以下の式で表されます。

$$FSR = \frac{c}{2L}$$

また共振モードの鋭さを表す量としてフィネス(finesse)は、ミラーの反射率を R として

$$Finesse = \frac{\pi\sqrt{R}}{(1-R)}$$

この時透過光の半値幅(Δf)は

$$\Delta f = \frac{FSR}{Finesse}$$

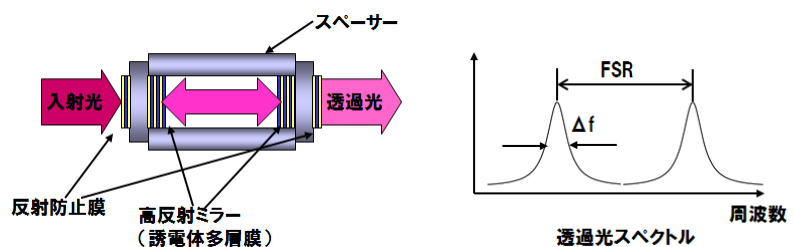


図 1. 光共振器の構造と写真

共振器の長さを 10 cm および 30 cm としたときのミラーの反射率と半値幅の関係を図 2 に示します。半値幅 1500 Hz を得るためには、共振器長 10 cm の場合ミラーの反射率として 99.9997 % 以上共振器長 30 cm の場合反射率として 99.999 % 以上が必要になることがわかります。

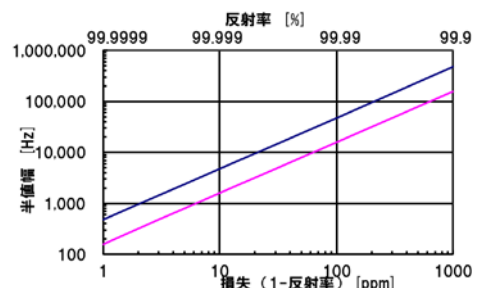


図 2. 光共振器ミラーの反射率と半値幅

また、低屈折率層の屈折率(n_l)を 1.45、高屈折率層の屈折率(n_h)を 2.1 とし、低屈折率層の消衰係数(k_l)が 0、高屈折率層の消衰係数(k_h)が 5×10^{-6} から 0 まで変えた時の全損失(1-反射率)を計算したものが図 3 です。反射率の目標値を 99.9997 %とすると k_h は 5×10^{-7} 以下でなければなりません。

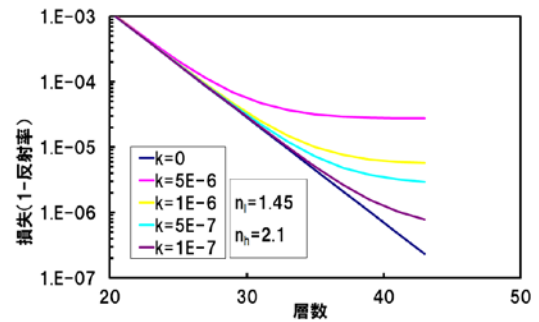


図 3. ミラーの層数と反射率
膜の消衰係数依存性

2.2 反射率の測定方法

99.999 %とか 99.9999 %といった非常に高い反射率は、市販の分光器を使用した反射率計では測定できないため光共振器を使って測定します。光共振器に外部から光を入射すると、共鳴条件にあった波長の光だけが透過することは前述のとおりですが、共鳴条件を満たしている光は共振器内部に蓄えられているため、入射光をあるタイミングでカットしても透過光の強度は直ぐにゼロになるのではなく少しずつ減衰していくという特性を示します。

この減衰時間(τ_0)とミラーの反射率(R)には次式の関係があります。

$$I_{out} = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right)$$

$$\tau_0 = (1 - R) \frac{L}{c}$$

この減衰時間を測定しミラーの反射率を求めるという方法を採用しています。

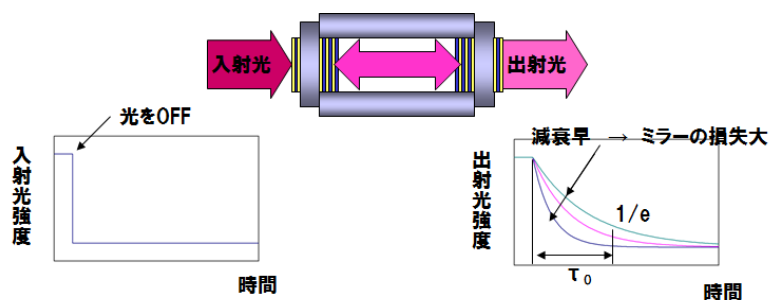


図 4. 光共振器の透過光特性

3. 開発内容および結果

まず、研究開発を開始するにあたり従来の条件で波長 698 nm用の高反射ミラーを作製しミラーの評価を行いました。低屈折率層には二酸化珪素(SiO_2)、高屈折率層には五酸化タンタル(Ta_2O_5)を使っています。また、ミラー基板には表面粗さが 0.07 nm rmsレベルの超平滑研磨⁷⁾したものを using しています。反射率 99.999 %のミラーについて散乱損失を積分球を使って測定すると 1~2 ppm、また透過率は 1~2 ppmでした。したがって従来の条件で作製したミラーの損失の主要因は吸収損失であるということがわかりました。そこで、吸収損失の原因を調べることから始めました。

誘電体薄膜の光吸収は、膜中の不純物と欠陥により生じます。このうち欠陥は不対電子(ラジカル)を持つものと持たないものに大別できます。一般的にラジカルによる光吸収のほうが低エネルギーの光を吸収すると考えられます。今回の研究開発の対象となる光の波長は 698 nm(1.78 eV)と 1064 nm(1.17 eV)です。これは光学膜材料のバンドギャップ(Ta_2O_5 の場合約 4.2 eV SiO_2 で約 7.5 eV)と比較してエネルギーは低いと考えられます。したがって、まず電子スピン共鳴(ESR)を用いてラジカルの種類と密度を計測しました。成膜条件を変えて計測した結果を図 5 に示します。今回のサンプルの場合 SiO_2 の欠陥の一種である過酸化ラジカル($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{O}\cdot$)のみが検出され、 E' ($\equiv\text{Si}\cdot$)や NBOHC ($\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot$)は検出されませんでした。この過酸化ラジカルは、成膜条件を変えていくことでESRの計測下限以下まで低減することができました。また高屈折率層の Ta_2O_5 からは信号が検出されませんでした。Sawadaらにより Ta_2O_5 の酸素欠陥の分子軌道の計算が行われていて、⁸⁾ それによると Ta_2O_5 中の酸素原子が欠損している箇所に対向して存在しているTa原子の 5d軌道が、結合性の軌道と反結合性の軌道を形成し、結合性の軌道に 2 個の電子が入ることが示されています。 Ta_2O_5 の酸素欠損がこのような状態になっていると仮定するとESRで検出できないことが説明できます。

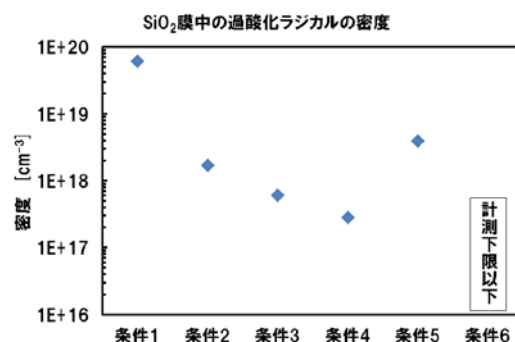
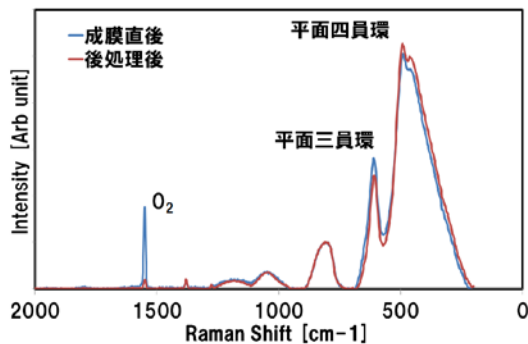
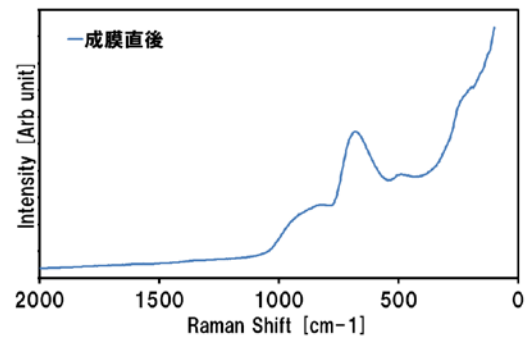


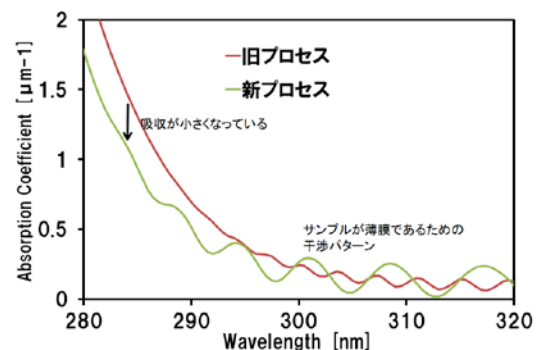
図 5. ESR 測定の結果

図 6. SiO₂ 膜のラマン分析図 7. Ta₂O₅ 膜のラマン分析

次にラマン分析を行いました。結果を図 6 および図 7 に示します。SiO₂膜の場合、成膜直後の試料からO₂が検出されていて、膜中にO₂が溶存していることがわかります。後処理をくわえることでO₂濃度は低下します。別の分析からSiO₂膜には、ODC(≡Si-Si≡や≡Si:⁻ Si⁺≡)が存在し、後処理によりODCの濃度が減少することがわかっています。したがって、後処理によりO₂が拡散し欠陥をうめっていると推測しています。

一方Ta₂O₅の場合、成膜直後の試料からO₂は検出されません。ラマン分析の計測下限や定量化といったことに課題がありますが、Ta₂O₅は膜中にO₂を取り込みにくいのではないかと考えられます。

ESRの結果とも考え合わせて成膜プロセスの改善を行いました。プロセスの改善を行ったTa₂O₅膜の分光透過率の測定から吸収端近傍での吸収係数を求めた結果を図 8 に示します。サンプルが薄膜であるためフリンジが長波長側の測定結果に出っていますが、吸収端近傍で吸収係数が低下し改善できていることがわかりました。同様にSiO₂膜についても吸収端近傍での吸収係数を低減することができました。

図 8. Ta₂O₅ 膜の吸収係数

最後に改善を行ったプロセスで 698 nm と 1064 nm 用のミラーを作製し、反射率を評価した結果を図 9 および図 10 に示します。これまでの改善により波長 698 nm ではフィネス 532,000 反射率 99.99941 % 全損失 5.9 ppm さらに波長 1064 nm ではフィネス 1,256,000 反射率 99.99975 % 全損失 2.5 ppm という値を達成しています。

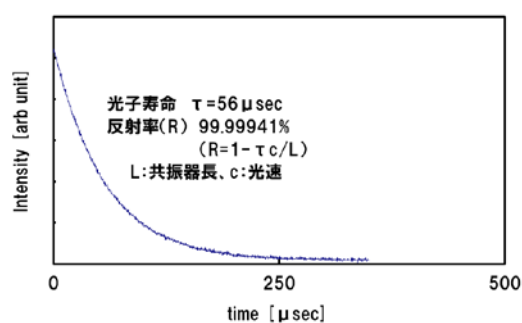


図 9. 波長 698 nm 用光共振器の減衰時間

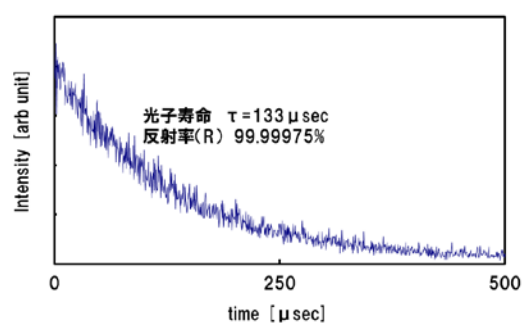


図 10. 波長 1064 nm 用光共振器の減衰時間

4. まとめ

膜の分析を行い成膜プロセスの改善を行いました。その結果、波長 698 nm ではフィネス 532,000 反射率 99.99941 % 全損失 5.9 ppm さらに波長 1064 nm ではフィネス 1,256,000 反射率 99.99975 % 全損失 2.5 ppm という値を達成することができました。

本研究開発は、JST CREST 「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」において行われたものです。また、独立行政法人 情報通信研究機構 井戸哲也氏には多くの助言を頂きました。ここに感謝いたします。

【参考文献】

- 1) JAE 会社案内参照
- 2) JAE 会社案内参照
- 3) 総合研究大学院大学重力波プロジェクト推進室ホームページ参照
- 4) H. Katori “Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement.” in the Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology, 323(2002)
- 5) F. Aronowitz et al “Lock-in and Intensity-Phase Interaction in the Ring Laser”, Journal of Applied Physics, Vol. 41 No. 1 130(1970)
- 6) 李 瑛他、“超狭線幅クロックレーザーの開発”、情報通信研究機構季報 Vol.56 161(2010)
- 7) 伊藤 匡他,”RLG 用ミラー基板の加工技術開発”, 航空電子技報 No.15 19(1992)
- 8) H. Sawada et al.”Electronic structure of oxygen vacancy in Ta₂O₅”, Journal of Applied Physics Vol. 86 No.2 956 (1999)