

ファブリー・ペロー共振器を用いた 超高反射率ミラーの特性評価

電子物性工学科

村井 朋代

背景と目的

現在、重力波干渉計等では超高品質ミラーが必要とされている。又、超高品質ミラーを開発したり、特性を評価するような測定系も必要となる。そこで、我々の研究室ではそのような超高品質ミラーの測定系であるOptical Test Facility (OTF)が構築された。

本実験で測定対象とするミラーは反射率 (R) が 99.99%、損失率 (A) が ppm (10⁻⁶) 程度のパラメータをもつため、それらのパラメータを直接測定するには測定系に 6 桁以上のダイナミックレンジが必要となり、1 に対して精密に直接測定するのは極めて難しいこととなる。そこでここでは、同時成膜された 2 枚の超高反射率ミラーより構成された FP 共振器を用いて共振器のフィネス (F) つまり共振線幅 (Δν) と透過効率 (η_T) を測定し、これらの値から各々のパラメータである反射率、透過率、損失率を導出する。なお、共振線幅の測定は AM サイドバンド法、共振器光子寿命法、伝達関数測定法の 3 つの方法で行う。

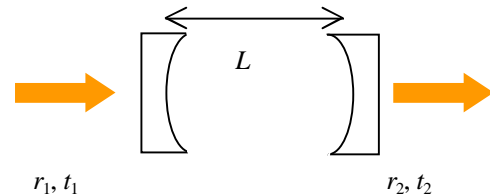


図 1 : 共振器モデル

原理

< 共振器理論とパラメータ導出法 >

図1のようなFP共振器モデルがある時入射光、透過光、透過効率は ~ のように表される。

$$E_i = E_0 \exp(i\omega t)$$

$$E_t = \frac{t_1 t_2}{1 - r_1 r_2 \exp(-i\omega \frac{1}{v_{FSR}})} E_i$$

$$\eta_T = \frac{t_1 t_2}{1 - r_1 r_2} \frac{1}{1 + \frac{4r_1 r_2}{(1 - r_1 r_2)^2} \sin^2 \frac{\omega}{2v_{FSR}}}$$

但し、E₀は電界振幅、r₁, r₂, (t₁, t₂)は各々振幅反射(透過)率を表す。又この透過効率の周期をフリースペクトラルレンジ (FSR) といい、FSR とおくと FSR = c/2L となり光速 c と共振器長 L のみで決定される。更にフィネス F は FSR と Δν の比で表される。

ここで、R = r₁² = r₂² ~ 1、T = t₁² = t₂² とおき、また 式を用いることにより共振

時、透過効率とフィネスは ~ 式ようになる。故に ~ 式より共振線幅と透過効率を測定することで反射率、透過率、損失率を導出することができる。又 式より R を 99.99% とすると F を 3 桁の精度で求めると R は 7 桁の精度で求められることがわかる。

$$R + T + A = 1$$

$$\eta_r = \frac{T}{A + T}^2$$

$$F = \frac{v_{FSR}}{v_c} \frac{\pi}{1 - R}$$

< AM サイドバンド法 >

この測定法は周波数領域の測定である。共振器に入射するレーザー光に強度変調をかけてサイドバンドを発生させる。同時にレーザーの周波数を掃引してその時の透過光波形より既知の値であるサイドバンドを周波数マーカーとして共振線幅を求める。

< 共振器光子寿命法 >

この方法は時間領域の測定法である。まず、レーザーを共振器に周波数安定化する。そしてその状態で共振器に入射するレーザー光に矩形波で強度変調をかけその時の透過光を連続的に観測することにより、得られた波形の減衰時定数つまり共振器光子寿命を求めこの値を用いて共振線幅を求める。

< 伝達関数測定法 >

この方法も周波数領域の測定法となっている。最初にレーザーを共振器に周波数安定化する。その状態で今度は共振器に入射するレーザー光に正弦波で強度変調をかけその時の透過伝達関数をスペクトラムアナライザーで測定することにより共振線幅を求める。

実験装置

今回用いた実験装置配置図を図2に示す。レーザーは出力パワー約 15mW、波長 1.064 μm の LD 励起モノシック Nd:YAG リングレーザー(MISER)を用いた。これは通常のレーザーに比べてフリーランニング時の周波数安定性が極めて高いレーザーで、本実験で用いたものはフリーランニング時のレーザーの線幅が 5 kHzであった。またレーザー結晶には温度制御用のヒーターと高速周波数制御用の piezo素子(PZT)が取り付けられており容易に周波数制御を行うことができるようになってきている。PZTのチューニング係数は約 5.4MHz/V でその帯域は 100kHz である。またモードホップなしに 15GHz にわたって周波数を変化させることができる。

次に共振器について述べる。今回用いた共振器を構成している 2 枚の超高反射率ミラーは、誘電体多層膜(Ta₂O₅/SiO₂)を Kaufman 型イオンスパッタリングで同時成膜された波長 1.064 μm 用のものである。

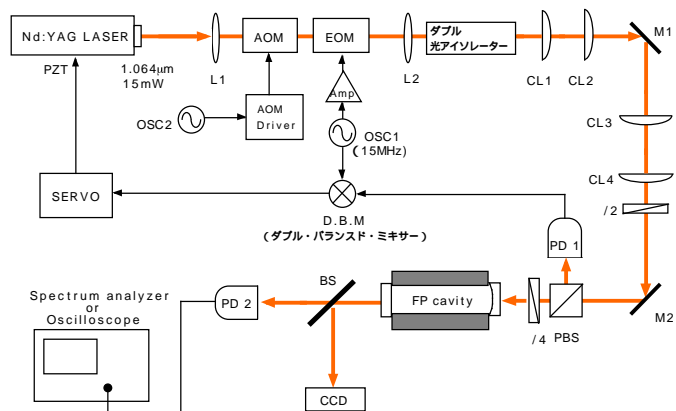


図2：実験装置配置図

{ /4、/2、1/4、1/2波長板 (P)BS：(偏光)ビームスプリッター AOM：音響光学変調器
M：ミラー (C)L：(シリンダリカル)レンズ OSC：発振器

また共振器長は203.0 mmで2枚のミラーは1枚が曲率半径1000mmの凹面ミラー、もう1枚が平面ミラーである。更に透過効率は97.2%と測定することができた。電気光学変調器(EOM)はレーザーの周波数安定化の時に位相変調をかけて用いる。又、透過光は光検出器2 (PD2)で反射光は光検出器(PD1)で各々検出される。

次にレーザーの周波数安定化について述べる。今回の実験ではレーザーの周波数安定化法としてFP共振器の反射光を使ったPound-Drever-Hall法を用いた。ここでその手順について前に示した図2を使って簡単に説明する。まずFP共振器からの反射光はPD1で検出され、それがダブルバランスドミキサ(DBM)へ入力される。DBMより出力された復調信号はサーボ回路に入力され、更にサーボ回路からレーザー結晶に取り付けられているピエゾ素子へと負帰還されることによりレーザーの周波数安定化を行っている。図3に安定化された時の周波数雑音スペクトルを示す。これよりこの雑音を白色雑音として見積もったレーザーの共振器に対する線幅は2Hzであり、フリーランニング時に比べて十分に抑圧することができたといえる。

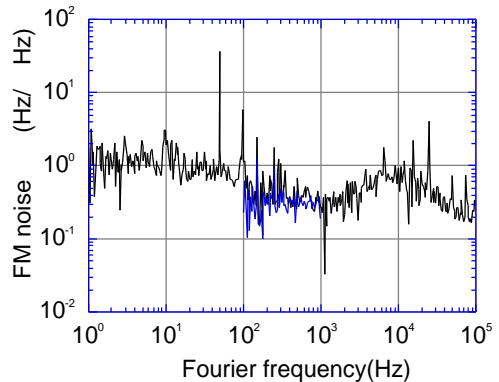


図3：レーザー周波数安定化時のFM雑音スペクトル

結果

各測定法での結果は次のようになった。

< AM サイドバンド法 >

実験で得られた透過光波形を図4に示す。この時にかけている強度変調周波数は300kHzでこれより求めた共振線幅は33.0kHzであった。またフィネスは22400、反射率99.9860%、透過率138.0ppm、損失率2.0ppmと求められた。

< 共振器光子寿命法 >

この測定法で得られた透過光波形を図5に示す。この時の共振器光子寿命は9.41 μ sec.でこれより共振線幅は33.8kHzと求められた。又この時のフィネスは21800、反射率が99.9856%、透過率が141.8ppm、損失率が2.2ppmと求められた。

< 伝達関数測定法 >

この実験で得られた透過伝達関数(利得)を図6に示す。この波形のフィッティング関数より共振線幅は30.5kHzであった。更にこれより求められるフィネスは24200、反射率が99.9870%、

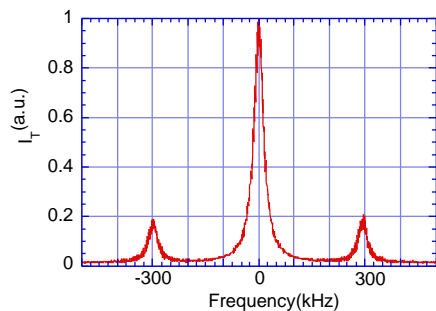


図4：透過光波形

透過率が128.2ppm、損失率が1.8ppmであった。

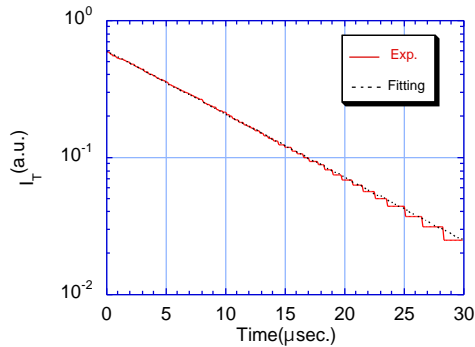


図 5 : 透過光波形

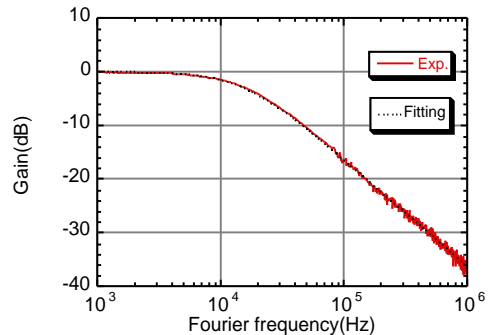


図 6 : 透過伝達関数利得

まとめと今後の実験の流れ

レーザーの周波数安定化を行った。

又、超高反射率ミラーの特性をAMサイドバンド法、共振器光子寿命法、伝達関数測定法の3つの方法で評価した。以下の表1はそれらの結果をまとめたものである。これより精度としては6桁、確度としては4桁で評価することができたと言える。またどの測定法の誤差もデータのばらつきによるフィッティング誤差が測定器による誤差よりも非常に小さかったため、測定器の誤差のみを考慮している。共振器光子寿命法の誤差はオシロスコープからコンピューターへデータを取り込む際のデジタル化にともなうものであり、また伝達関数測定法での誤差は測定器の分解能によるものである。

	AMサイドバンド法	共振器光子寿命法	伝達関数測定法
R	99.9860%	99.9856 ± 0.0002%	99.9870 ± 0.0006%
T	138.0ppm	141.8 ± 1.5ppm	128.2 ± 5.9ppm
A	2.0ppm	2.2 ± 0.5ppm	1.8 ± 0.1ppm

表 1 : 各測定法で求められたパラメータ

この測定系を用いて反射率、透過率、散乱率(今回は行っていないが直接測定できる)を直接測定することができるが、吸収率についてはこれらの値の残差としてしか求められず精度が低くなってしまふ。そこで、今後は当研究室で別に行われている、吸収率直接測定の実験結果と合わせてミラーの光学パラメータを全て直接測定で求め、その結果を更に高品質なミラーの開発にフィードバックしていくことが考えられる。