

超高性能ミラー用測定装置の開発

武者研究室 長岡 慧

1. はじめに

本研究は、重力波検出器 KAGRA で使用される超高性能ミラーの開発を目標とした研究である。重力波の直接検出を目的として建設が行われてきた重力波検出器 KAGRA が 2015 年に竣工し、2016 年度の測定開始を目標に運用が開始された。KAGRA で用いられる光源には、ショットノイズ低減のために 150 W の高出力 CW レーザーが使用される。このため、KAGRA の光学系で使用されるミラーはこのような高出力レーザーによる長期間の観測に耐えうる高い性能が要求される。特にミラーの光損失は重要なパラメータであるが、過去に全損失 1.5 ppm の誘電体多層膜ミラーが報告されて以来[1]、国内では超低損失ミラーの開発は行われていない。そこで超低損失ミラーの開発を目標に国立天文台と企業との共同研究を行った。超低損失ミラーの開発には、作成と特性評価の繰り返しによる作成条件の最適化が必要となる。そこで、ミラーの反射率や損失などのパラメータを繰り返し精密に評価することの出来る測定装置の開発に取り組んだ。KAGRA で使用される反射率 99.99% 以上のミラーの測定を行うために装置の性能としては以下の目標を設定した。

- ・ 5 桁精度での反射率測定
 - ・ クロスチェックによる測定値の信頼性の向上
- これら 2 つの目標を満たす測定装置の開発を行った。

2. 超高性能ミラー用測定装置

ミラーの主要なパラメータとして、反射率 R 、透過率 T 、損失 A の 3 種類のパラメータが挙げられる。今回の実験ではこれらのパラメータを精密に評価できる装置の開発を目標とした。これらのパラメータについては、反射率と透過率は実測を行い、損失はエネルギー保存則から導かれる $R + T + A = 1$ の関係式から評価を行う。しかし、今回評価対象となるミラーの反射率は 99.99% 以上であるため、反射率の直接測定は困難である。そこで今回の実験では非測定ミラーを 2 枚用いて

図 1 のような光共振器を構成し、光共振器のフィネス \mathcal{F} を測定する事で反射率を評価する間接測定の手法を用いた。



図 1 光共振器

光共振器を構成する 2 枚のミラーの反射率が等しく R という値である場合、フィネスと反射率の間には以下の関係式が成り立つ。

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

また、フィネスは次の式でも表現される。

$$\mathcal{F} = \frac{FSR}{\Delta\nu_c} = \frac{c}{2L\Delta\nu_c}$$

ここで FSR はフリースペクトルレンジと呼ばれる共振器の縦モード間隔であり、光速 c と共振器長 L で決定される値である。 $\Delta\nu_c$ は共振線幅であり、共振周波数の半値全幅である。これらのパラメータのうち光速は既知の値であり、共振器長も容易に計測が可能である。従って共振線幅を測定すればフィネスを評価でき、反射率も評価することが出来る。更に測定した反射率と入射光強度と反射光強度の比から透過率は次の式で計算することが出来る。

$$T = (1 - R) \sqrt{\frac{I_{out}}{I_{in}}}$$

以上より、共振線幅を測定する事で反射率、透過率、損失の評価が可能となることが分かる。従って今回の実験では共振線幅を精密に評価できる測定装置の開発を行った。共振線幅の測定には AM サイドバンド法、共振器光子寿命測定法[2]、伝達関数測定法[3]と呼ばれる 3 種類の独立した測

定方法を用い、測定結果のクロスチェックを行い信頼性の向上を行う。次にこれらの測定方法について述べる。

AM サイドバンド法はレーザーに強度変調を加えて周波数軸上に AM サイドバンドを形成し、周波数掃引を行い透過光強度の時間変化を測定する事で共振線幅の評価を行う手法である。この手法では図 2 で示すような時間波形信号が得られる。

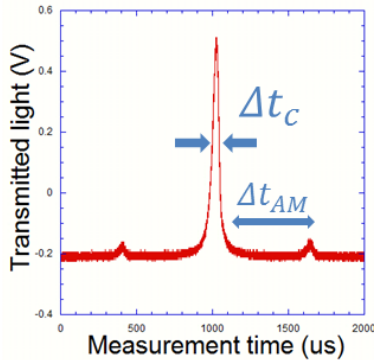


図 2 AM サイドバンド法 測定例

横軸は時間であり縦軸が透過光の強度である。図 2 の中心にあるピークはキャリア周波数成分が共振周波数に一致した際の信号であり、左右の小さいピークはサイドバンドが共振周波数に一致した際の信号である。中心ピークの半値全幅である Δt_c を中心ピークとサイドバンドの間隔である Δt_{AM} と変調周波数 ν_{AM} を用いて校正を行うと、共振線幅は次の式で与えられる。

$$\Delta \nu_c = \frac{\Delta t_c}{\Delta t_{AM}} \nu_{AM}$$

この測定法は容易に共振線幅を見積もることが出来る手法であるが、レーザー自身が持つ線幅により、得られる共振線幅は実際の値より大きくなる。従ってこの手法で得られるフィネスは実際よりも小さくなり、反射率も小さくなってしまう。

共振器光子寿命測定法は共振時に入射光を遮断し、その際の透過光の減衰時間から共振線幅を評価する手法である。共振時には光共振器内部に光が蓄えられており、この時入射光を遮断すると内部に蓄えられた光は減少していき、透過光強度は指数関数的に減少する。図 3 に測定例を示す。

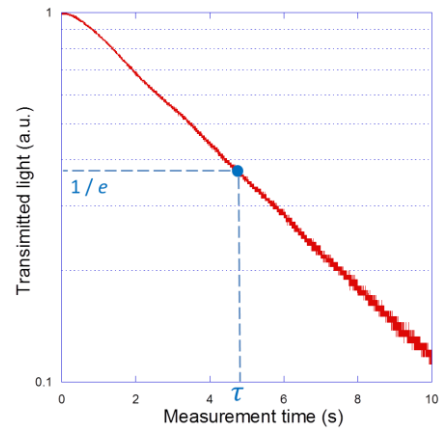


図 3 共振器光子寿命測定法 測定例

横軸が時間であり、縦軸は規格化した上で対数表示した透過光の強度である。この図では $t=0$ の瞬間に入射光を遮断しており、それ以降で透過光が指数関数的に減少していること確認できる。透過光が最大値の $1/e$ になる共振器寿命 τ と共振線幅は次の関係にある。

$$\Delta \nu_c = \frac{1}{2\pi\tau}$$

この方法の測定精度は原理的にはオシロスコープなどの測定器の性能で制限されるため、高い測定精度を目指すことが出来る。

伝達関数測定法はレーザーを光共振器に周波数安定化をした状態で強度変調を加え、その際の透過光強度の周波数応答を計測することで伝達関数を測定し、伝達関数の特性から共振線幅を評価する手法である。光共振器の強度変調に対する伝達関数は図 4 の測定例で示すように 1 次のローパスフィルタとなる。

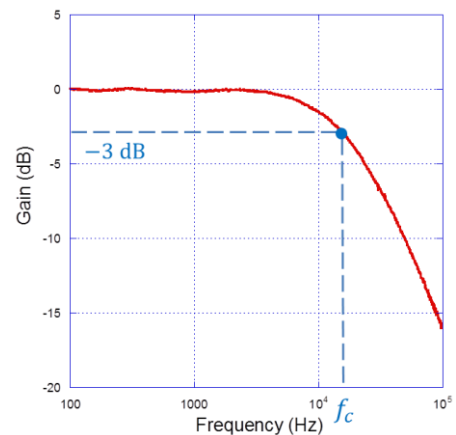


図 4 伝達関数測定法 測定例

横軸が変調周波数であり、縦軸は光共振器の透過

光ゲインである。透過光のゲインが無変調時の-3 dBとなる周波数はカットオフ周波数 f_c と呼ばれ、カットオフ周波数と共振線幅は

$$\Delta\nu_c = 2f_c$$

の関係がある。従って伝達関数を測定する事で共振線幅を評価することが出来る。この測定方法に関しても、測定精度は測定装置の精度で決定される。しかしこの手法では周波数安定化を行うことが必須となるため、測定に手間がかかるという欠点がある。

次に今回の実験で作成した、以上の3種類の測定を同時に行うことが出来る装置の光学系について説明を行う。

図5に光学系の概略図を示す。

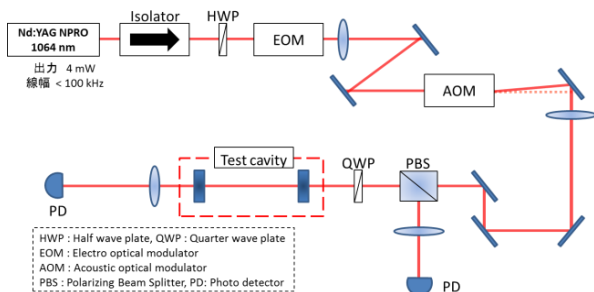


図5 超高性能ミラー用測定装置

光源には、波長 1064 nm の Lightwave Electronics 社製 NPRO 120 を使用した。NPRO は利得媒質と共振器が一体化しているモノリシック構造によりフリーランでの安定度が高く、また外部から信号入力を行うことで温度調整と共振器長制御による周波数制御が可能である。レーザーから出射した光はアイソレータを通過して戻り光が抑制される。その後 HWP(1/2 波長板)により偏光の調整が行われた光は EOM(電気光学変調素子)に入射する。EOM では光に対して 15 MHz の位相変調が行われており、後の PBS(偏光ビームスプリッター)と QWP(1/4 波長板)と合わせて、レーザーの光共振器への周波数安定化のために使用される。この装置で線幅測定を行うに当たり、最も重要な素子が AOM (音響光学変調素子)である。AOM は各測定で重要な役割を果たしており、共振器光子寿命測定法では光シャッターとして、AM サイドバンド法と伝達関数測定法では強度変調器として使用している。

装置の性能評価として、フィネスの公称値が

50,000 (反射率 99.994%) の固定スペーサ付光共振器のフィネス測定を行った。

表 1 にそれぞれの測定結果を示す。測定結果はそれぞれの測定を 10 回行って得られた平均値と誤差である。

表 1 超高性能ミラー装置評価結果

	AM サイドバンド法	共振器光子寿命測定法	伝達関数測定法
共振器寿命 τ		4.85 $\pm 0.66 \mu\text{s}$	
共振線幅 $\Delta\nu_c$	39.3 $\pm 4.6 \text{ kHz}$	33.0 $\pm 5.0 \text{ kHz}$	33.7 $\pm 1.6 \text{ kHz}$
フィネス \mathcal{F}	$(1.24 \pm 0.14) \times 10^4$	$(1.48 \pm 0.20) \times 10^4$	$(1.48 \pm 0.07) \times 10^4$
反射率R	99.974 $\pm 0.003 \%$	99.978 $\pm 0.003 \%$	99.979 $\pm 0.001 \%$

得られた反射率は公称値の 99.994%より小さいが、経年劣化により特性が低下したためであると考えられる。3種類の測定により得られた反射率は4桁の精度で一致し、それぞれの測定で5桁の精度で測定できることが確認できた。これは KAGRA で使用される反射率 99.99%以上のミラーの測定が可能性能であり、目標を達成している。

次に今回の測定結果から各測定方法の評価を行う。まず AM サイドバンド法で得られた反射率は他の測定に比べ 0.004%ほど小さい。これは先に述べたようにレーザー線幅の影響であると考えられる。共振器光子寿命測定法と伝達関数測定法は測定結果がほぼ一致した。特に伝達関数測定法は誤差が 0.001%と今回の測定の中で最高制度の測定を行うことが出来た。

以上のことから、反射率測定は AM サイドバンド法を補助測定とし、共振器光子寿命測定法と伝達関数測定法により行っていくこととした。しかし伝達関数測定法を用いる際には、測定の度にレーザーを共振器に安定化する必要がある。そこで自動周波数安定化による繰り返し測定の高速度と簡易化を目指し、デジタル制御を用いた周波数安定化システムの開発に取り組んだ。

3. デジタル制御による周波数安定化

今回の実験ではレーザーの周波数を共振器に安定化する手法として、PDH(Pound-Drever-Hall)法を用いた。この方法は図6に示すようにレーザ

一の周波数と共振周波数の差を誤差信号として得る手法である。

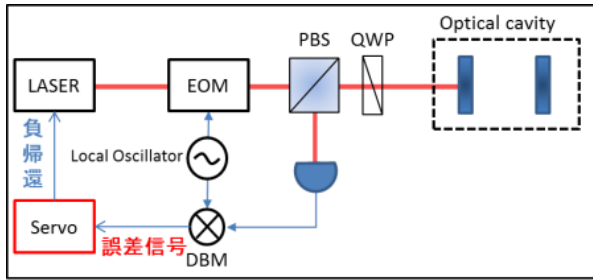


図 6 PDH 法概略図

この手法により得られた誤差信号を制御回路に通してレーザーに負帰還することにより周波数安定化が行われる。従来、本研究室では制御回路としてアナログ回路を用いてきたが、特性の最適化に手間と時間がかかる。そこでアナログ回路をパラメータの変更が容易かつ、はんだ付けなどの作業を必要としないデジタル回路に置き換え、更に自動で周波数安定化を行う機構を追加した自動周波数安定化システムの開発を行った。

今回の実験では、システムの実装に FPGA(Field Programmable Gate Array)を使用した。FPGA は自由にハードウェアの書き込みおよび書き換えの出来るデジタルデバイス的一种である。FPGA は CPU やマイコンといった他のデジタルデバイスと異なり、並列処理(パイプライン処理)が可能である点から、高速処理や連続信号処理に適している。FPGA へ書き込むシステムの作成には VHDL(Hardware Description Language)を用いた。また、FPGA のプラットフォームには Digilent 社製 BASYS2 を利用し、AD コンバータには同社製の PmodAD1、DA コンバータには PmodDA2 を使用した。表 2 にこれらのデバイスの詳細を示す。

表 2 使用デバイス詳細

BASYS2 (XC3S100E)	ゲート数	100,000
	ロジックセル数	2160
	乗算器数	4
	動作クロック	50 MHz
PmodAD1	ビット数	12
	変換レート	1 MSPS
PmodDA2	ビット数	12
	変換レート	30 MSPS

これらのデバイスを用いて作成したシステムの概略図を図 7 に示す。

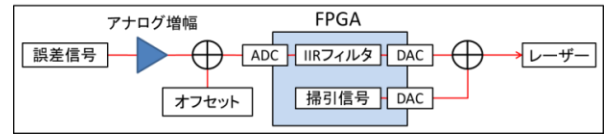


図 7 自動周波数安定化システム

今回使用したデジタルデバイス単体ではビット数に起因する最小分解能の制限により、到達可能な周波数安定度に限界が生じるため、アナログ回路により誤差信号の増幅を行っている。増幅された信号は FPGA 内部の IIR(Infinite Impulse Response)フィルタにより処理され、コントロール信号としてレーザーに負帰還される。このときコントロール信号に FPGA 内部で生成された掃引信号を加算することで非安定化時にはレーザーの周波数を共振状態へ引き込み、自動周波数安定化を行う。

作成した制御回路の伝達関数を図 8 に示す。

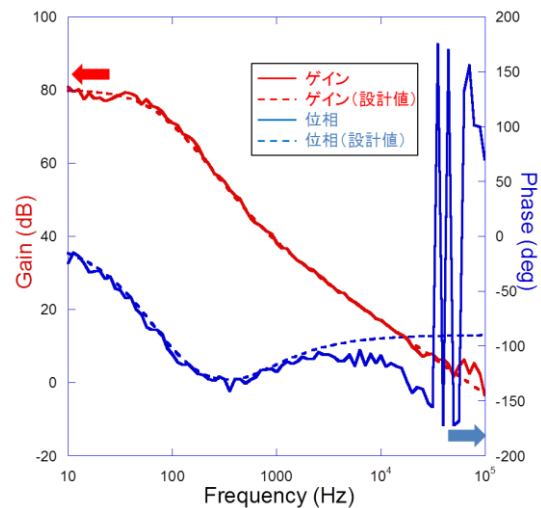


図 8 制御回路伝達関数

赤線がゲイン特性であり、青線が位相特性である。それぞれの点線は設計した伝達関数の特性である。ゲインに関してはほぼ設計通りの特性が得られたが、位相に関しては高周波域において設計値よりも位相が遅れている。これは次の図 9 で示す ADDA コンバータなどのデバイスで発生する遅延時間に起因していると考えられる。

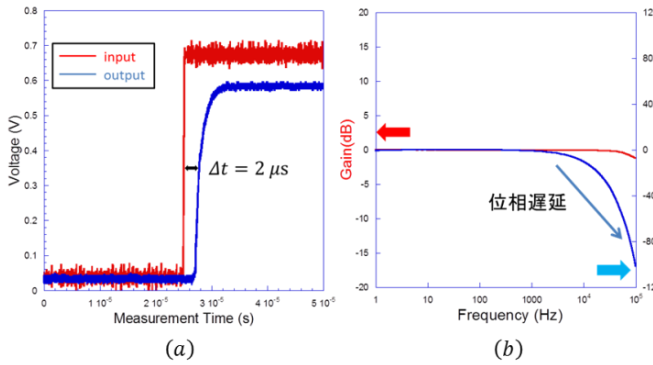


図 9 ADDA コンバータの時間特性と周波数特性
 図 9 の結果は、AD コンバータで取り込んだ矩形波信号に対して処理を加えずに DA コンバータで出力することで得た特性である。図 9(a)は時間特性であり、赤線で示す入力信号に対して青線で示す出力信号は約 $2 \mu\text{s}$ の遅延が発生している。図 9(b)は周波数特性である。赤線はゲイン特性であり、青線は位相特性である。ゲインはほぼ一定であるのに対し、位相に関しては時間遅延により位相遅延が発生している。この位相遅延により、図 8 で示したような設計値とのずれが生じていると考えられる。

以上のシステムを用いて周波数安定化を行った際に得られた各種信号の時間変化を図 10 で示す。

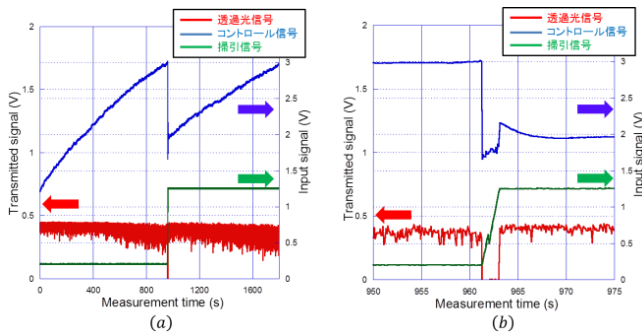


図 10 周波数安定化結果

図 10 中の透過光信号は光共振器の透過光強度を表す。透過光信号は共振時、すなわち周波数安定化時に検出される信号であるため、図 10(a)の範囲内で周波数安定化が行われていることが分かる。960 秒付近で一旦安定化が外れているが、その瞬間に再掃引が行われ、自動で再安定化が行われている。図 10(b)は再安定化時の挙動を拡大して表示した図である。透過光信号が急激に減少した瞬間、すなわちロックが外れたときから掃引信号が増加し、約 2 秒後に再ロックが行われている。自動安定化により全体では 30 分間の周波数安定化を行

うことが出来た。その後、共振器の温度変化に起因する周波数ドリフトにより制御のダイナミックレンジを外れ、再安定化は行われなかった。従って光共振器の温度を一定に保つ、もしくは応答速度は遅いが制御のダイナミックレンジの広いレーザー温度調整による周波数制御を並行して行うことで、更なる長時間の安定化が可能であると考えられる。また、図 10 を見ると透過光強度のゆらぎが大きいことが確認できる。これは DA コンバータの出力電圧の分解能によるものであると考えられる。今回使用した DA コンバータの出力電圧の最小分解能は 0.8 mV であり、周波数制御の最小分解能に換算すると 5 kHz である。周波数基準として用いた光共振器の共振周波数の半値半幅は約 15 kHz であり、共振状態から 3 ビット分変化するだけで透過光強度は半分になる。このことから、DA コンバータの分解能が透過光強度のゆらぎの原因になっていると考えられる。

次にオープンループゲイン測定による制御帯域の評価を行った。図 11 に測定結果を示す。

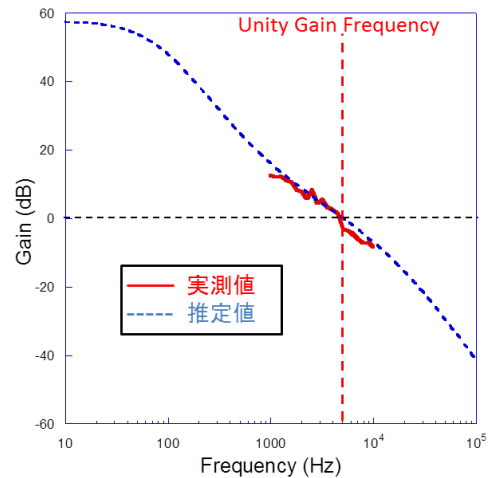


図 11 オープンループゲイン

赤線がオープンループゲインの実測値であり、青線は制御回路の伝達関数および光共振器の伝達関数から推定したオープンループゲインである。オープンループゲインは有効な特性の測定が行うことの出来た 1 kHz から 10 kHz までを表示している。測定範囲において実測値と理論値はほぼ一致していることが確認できる。ゲインが 0 になるユニティゲイン周波数はおよそ 5 kHz であることから、このシステムでは 5 kHz 以下の周波数雑音が行

抑制されていると考えられる。次に誤差信号から周波数雑音スペクトルの評価を行った。図 12 に結果を示す。

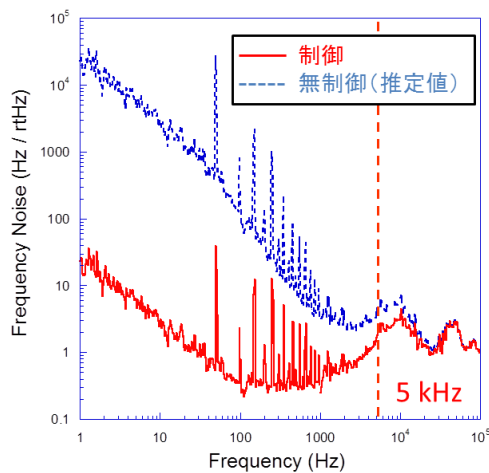


図 12 誤差信号周波数雑音スペクトル

赤線が実測値であり、青線は実測値を図 11 で示したオープンループゲインの推定値を用いて計算したフリーランでの周波数雑音スペクトルの推定値である。オープンループゲインから得られた制御帯域である 5 kHz 以下の周波数域で周波数雑音の抑制が確認できた。一方でこれ以上の制御帯域の拡大は ADDA コンバータによる位相遅延と FPGA のロジックセル数の不足に起因する実装制限により困難であった。さらなる制御帯域の拡大にはデバイスの選定と制御回路の改良によるシステムの性能向上が必要になると考えられる。

4. まとめと展望

重力波検出器 KAGRA で使用される超高性能ミラーの測定を行うことの出来る測定装置の開発を行い、装置の性能評価を行った。装置はクロスチェックのために AM サイドバンド法、共振器光子寿命測定法、伝達関数測定法の 3 種類の測定方法を行うことの出来る構成とし、それぞれの測定で 5 桁精度でのミラーの特性評価が出来ることが確認できた。これは KAGRA で使用するミラーの測定が可能な性能である。今後はこの装置を超高性能ミラーの評価に用いることで、更なるミラーの性能向上を目指す。また、高パワーの光入射や汚染により生じるミラー特性の微小な変化などを測定し、実際にミラーの運用を行う上で生じる経年

劣化の特性などの評価を行いたいと考えている。

また、伝達関数測定法による反射率測定を効率的かつ容易に行うために FPGA を用いた自動周波数安定化システムの開発を行った。自動周波数安定化システムは、信号増幅を行うアナログ回路とデジタルフィルタや掃引を行うデジタル回路により構成した。デジタル回路を搭載するデバイスには Digilent 社製の FPGA 評価用ボードである BASYS2 を使い、制御帯域 5 kHz のシステムの作成を行った。このシステムを用いることでレーザーをフィネス 14,800 の光共振器に対して連続 16 分、自動安定化により計 30 分間の自動周波数安定化を行うことが出来た。今後は安定度の向上と制御帯域の拡大を目指し、デバイスの選定やシステムの改良を行う予定である。今回作成した FPGA による周波数安定化システムはレーザーを光共振器に対して安定化するためのシステムであるが、本研究室で作成を行っている宇宙型重力波検出器 DECIGO 用のヨウ素安定化レーザーの制御システムにも応用することで、宇宙空間における安定した動作を実現するシステムの構成も研究室で行っていく予定である。

5. 参考文献

- [1] Ueda, Akitoshi, et al. "Ultra-high quality cavity with 1.5 ppm loss at 1064 nm." *Optical Review* 3.5 (1996): 369-372.
- [2] DZ Anderson, et al. "Mirror reflectometer based on optical cavity decay time." *Applied Optics* 23.8 (1984):1238-1245.
- [3] Uehara, N, et al. "Accurate measurement of ultralow loss in a high-finesse Fabry-Perot interferometer using the frequency response functions." *Applied Physics B: Lasers and Optics* 61.1 (1995): 9-15.