

令和元年度
卒業研究報告

研究題目

多重反射セルの実効光路長

指導教員 由井 四海

富山高等専門学校
電子情報工学科

矢後 歩海

令和2年 2月25日提出

目次

第 1 章 序論

- 1.1 はじめに
- 1.2 光とは
- 1.3 偏光とは
- 1.4. Time of flight(ToF)法

第 2 章 使用機器について

- 2.1 多重反射セル
- 2.2 偏光ビームスプリッター
- 2.3 波長板
- 2.4 半導体レーザー
- 2.5 パルスレーザー

第 3 章 既知の距離による ToF 法の原理確認

- 3.1 実験構成
- 3.2 実験結果
- 3.3 ToF 法から求めた距離と実測距離の比較

第 4 章 多重反射セルの光路長測定のシステム構築と構築したシステムの原理確認

- 4.1 実験構成
- 4.2 実験結果
- 4.3 反射パターン

第 5 章 反射回数から求めた光路長と ToF 法で求めた光路長の比較

- 5.1 実験構成

5.2 実験結果

第6章 まとめ

第7章 謝辞

第8章 参考文献

第 1 章 序論

1.1 はじめに

多重反射セルとは、2 枚以上の鏡を使って光路を多重化することで実効的な光路長を長くするセルである。実効光路長を求めることで微量の気体成分を測定することができ、高感度な測定を行うためには反射回数を多くする必要がある。しかし、反射回数が多い場合、振動などの外乱の影響を受けやすく反射回数から実効光路長を求めることが難しい。

図 1 に反射回数が多い場合の多重反射セルの反射パターンを示す。図 1 のように、反射回数が多いと目視で反射回数を数えることは難しい。また、画像解析で光点の抽出を試みたが、光点と光点が重なりあっており、抽出することは困難であった。そのため本研究では、ナノ秒パルスレーザーを用い、多重反射セルを通過し反射し終わるまでの時間を測定し、Time-of-Flight(ToF)法を用いて実効光路長を求めることを目的とする。

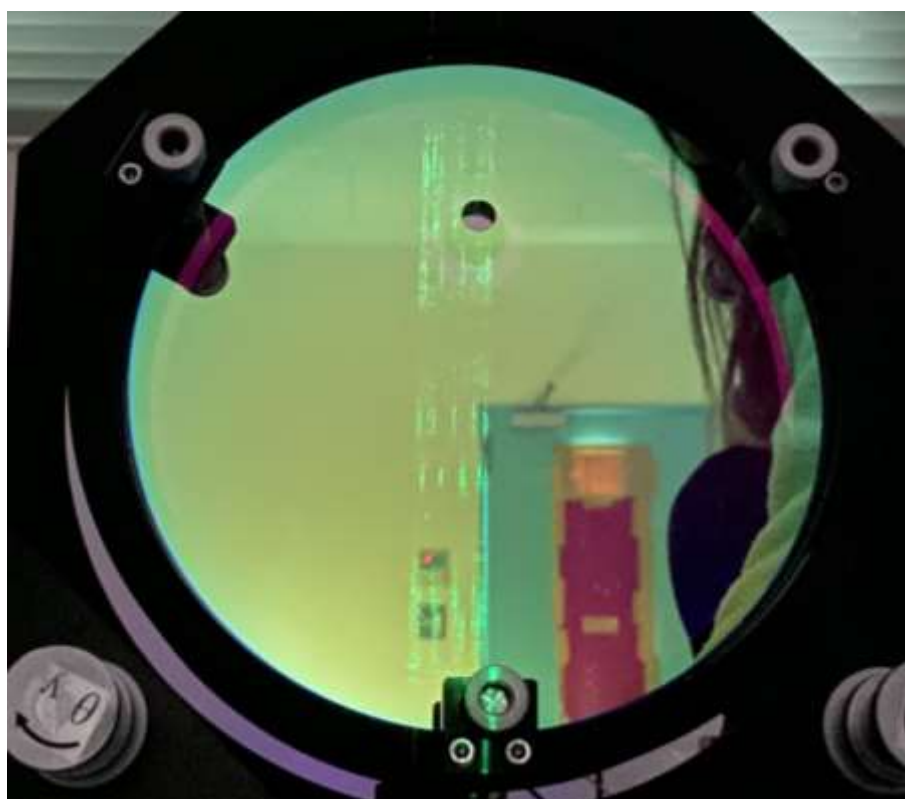


図 1 多重反射セルの反射パターン

1.2 光とは

光はとても身近なものであり 17 世紀には、光は微小な粒子の流れであるとするニュートンの粒子説と、光は真空中を伝わる波であるとするホイヘンスの波動説との間で大論争があった。しかし、19 世紀になるとヤングやフレネルの実験によって、光の回折や干渉の現象が発見され、光も波の一種であることがほぼ確立された。さらに、19 世紀中ごろにはマクスウェルによって、光は横波である電磁波の一種であることも明らかになった。特に目に見える電磁波を可視光といい、単に光というときは可視光を意味する。可視光の中で最も波長が長い赤色の光の波長は 770nm 程度で、赤、橙、黄、緑、青、紫と波長が短くなり、最も波長の短い紫色の光が 380nm 程度である。太陽光のように全ての可視光を含む光を白色光といい、一つの波長を持つ光を単色光という。光は、水面を伝わる波や音波などと異なり、真空中でも伝わる。なお、光の波長の国際単位(SI)は、 10^{-9}m を表す nm (ナノメートル) である。

1.3 偏光

光や電磁波は、電解や磁界が進行方向に垂直な面内で振動しながら進む横波である。偏光とは、新呼応方向に垂直な面内での電解や磁界が時間的・空間的に規則的な振動をしながらしんこうする光やそのような光波の状態である。光の進行方向後方から見た時の電解のベクトルの振動の尖端が描く軌跡によって直線偏光、円偏光、楕円偏光に分けられる。光の場合は偏光と呼ばれるが、電磁波の場合には偏波と呼ばれる。電場が入射面内で振動している光が S 偏光、入射面内に垂直に振動している光が P 偏光である。入射面は、界面の法線ベクトルと入射光の波動ベクトルを含む面と定義される。

円偏光は、P 偏光と S 偏光との位相が 90 度ずれたものである。2 つの物質の界面にお

いて定義されるものであり、均一な空間を光が進んでいることには、P 偏光と S 偏光との区別はない。入射光が直線偏光の場合は、純粋な P 偏光あるいは S 偏光ということもありえる。

1.4 Time-of-Flight(ToF)法

ToF 法は、パルス波を用いた手法である。月から地球までの距離を計測するときに用いられた方法で、照射し測定物に反射し、返ってくるまでの往復時間を計算する方法である。さまざまな動物もこの方法を用いて周囲の状況を察知している。例えば、コウモリが挙げられる。一般に小型コウモリ類に属するものは、目が小さく、耳が薄くて大きいことが特徴である。コウモリは超音波を発して、返ってきた波を利用して木の枝や、虫の位置を察知している。ToF 法を用いた距離 L の式を(1.2)に示す。 c は光の速度、 t_A と t_B は測定場所である。

$$L=c(t_B-t_A) \quad (1.2)$$

第 2 章 使用機器について

2.1 多重反射セル

多重反射セルとは、2 枚以上の鏡を使って光路を多重化することで実効的な光路長を長くする装置である。多重反射セルには、Herriott 型や White 型など様々な種類がある。レーザーを使った気体の吸収分光計測で使われることが多く、光路長を長くすることでガスの吸収強度を大きくすることができる。ンバートピアの法則による透過率 $T(\lambda)$ の式を式(1.1)に示す。 L はガス中を伝搬する光路長、 N は濃度、 $\sigma(\lambda)$ は吸収断面積である。

$$T(\lambda) = \exp(-\sigma(\lambda)NL) \quad (1.1)$$

この式から、マルチパスセル内の光路長を測定することによりガスの濃度検出を行えることが分かる。図 2 に多重反射セルの図解を示す。

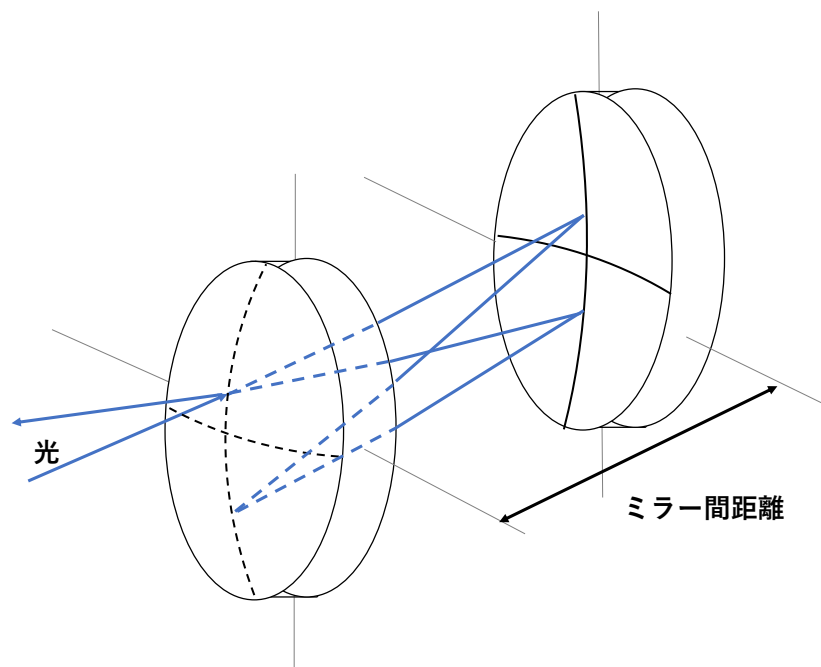


図 2 多重反射セルの図解

2.2 偏光ビームスプリッター

偏光ビームスプリッター(Polarization Beam Splitter : PBS)とは、入射光を特定の分割比で 2 つの光に分割する光学部品である。P 偏光を透過し、S 偏光を反射させることで、入射光の変更状態を直交成分に分割している。特に、入射光強度を 50:50 に分ける PBS は、ハーフミラーとも呼ばれる。図 3 に PBS の図解を示す。

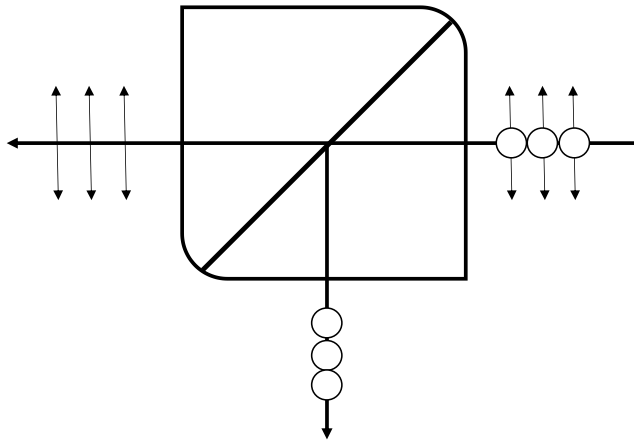


図 3 偏光ビームスプリッターの図解

2.3 波長板

波長板とは、偏光を制御、分析、および最適化するために不可欠なツールである。主にレーザー光源に対して、波長の分離、微調整、楕円率の調整、偏光の回転などの目的で使用され、レーザーを動かすことなく小さなスペースで作業を実行できるという利点がある。また、高パルスや連続発振のレーザーにも適用することができるので、自由度が高く、低価格で攻勢を組むことが可能である。波長の種類には、直線偏光の偏光方向を回転させる $1/2$ 波長板、直線偏光を円偏光に変換させる $1/4$ 波長板(Quarter Wave Plate : QWP)がある。本研究では QWP を使用して実験を行った。図 4 に QWP の図解を示す。

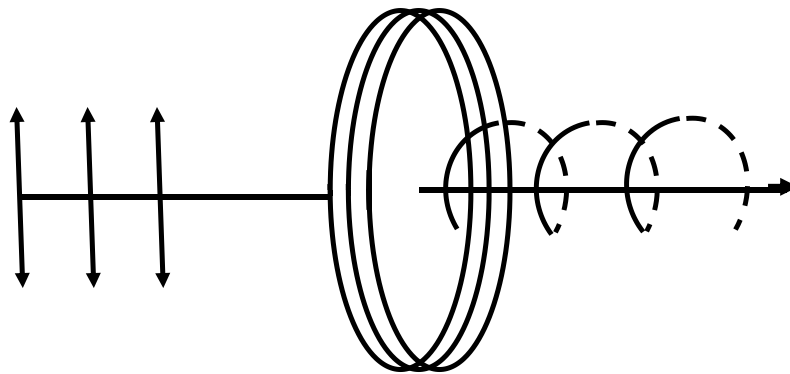


図 4 $1/4$ 波長板の図解

2.4 半導体レーザー

半導体レーザーとは、半導体に電流を流してレーザー発振させる素子である。発光の仕組みは発光ダイオード(LED)と同じで、p-n 接合の順方向に電流を流すことによって起こる。順方向とは p 側がプラス、n 側がマイナスになるように電源を繋ぐと n 側から電子、p 側から正孔が流れ込み、接合部分で両者が出合い、電子が正孔に向かって落ち込むときに光がでる。

2.5 パルスレーザー

パルスレーザーとは、細かい時間間隔で点滅をくり返すレーザーのことである。パルスレーザーの 1 回のレーザー照射時間は、パルス幅と呼ばれる。

パルスレーザーの中でも、特に発光時間の短いものが、超短パルスレーザーと呼ばれる。このようなレーザーは、超高速で発生する物理現象を時間分解して測定するためには非常に有用な装置となる。なお、パルスレーザーに対して、連続的に照射されるレーザーは連続波レーザーと呼ばれる。本研究で使用したパルスレーザーはナノ秒パルスレーザーというものである。これはレーザーの 1 回のレーザー照射時間がナノ秒間隔のパルスレーザーである。

第 3 章 既知の距離による ToF 法の原理確認

本研究は ToF 法を用いた多重反射セルの光路長計測を行うシステムを構築することが目的である。しかし、実際に ToF 法を用いて光路長測定を行うことができるかは不確かである。そこで ToF 法の原理確認と測定結果の信憑性の確認を行うために、鏡 1 枚と半

導体レーザーを用いて、1回反射における光路長測定を行った。そして、実測距離とToF法で求めた距離との比較を行った。

3.1 実験構成

図5に本研究で使用した実験構成図を示す。光源には、波長520nm、パルス幅5ns、平均パワー12mWの半導体レーザー(LD)を用いた。光検出器(PD)には、周波数帯域が4kHz-100kHzのものを用いた。オシロスコープ(Oscilloscope)には周波数帯域が300MHzのものを用いた。出射されたレーザー光(LD)は鏡を反射し、PDで電気信号に変換される。変換した信号をオシロスコープで検出波形として表示し、光が出射されてからPDで検出されるまでの時間を測定する。発振器(FG)からは、レーザー光を出射させるためのトリガー周波数20kHzが出力される。実測距離は、1.1m、5.5m、13.3mで測定を行った。実測距離の測定にはレーザー距離計を用いて測定を行った。

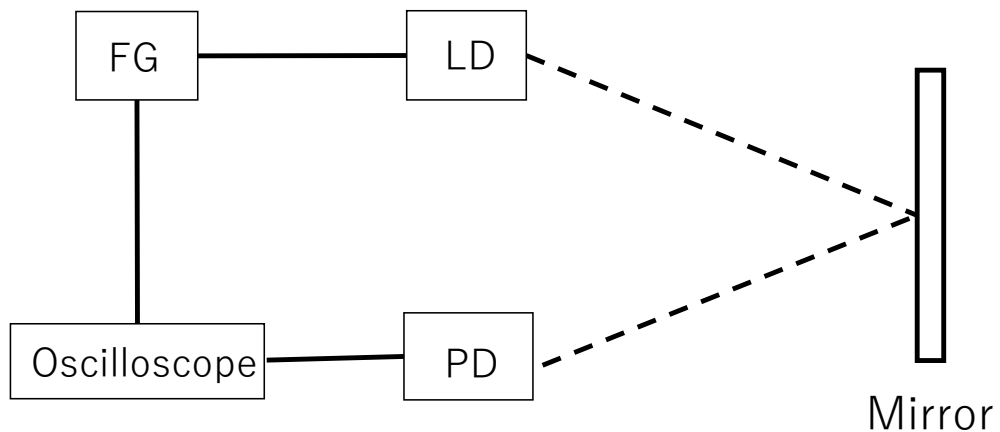


図5 実験構成

3.2 実験結果

図6に実験結果を示す。実測距離1.1mでの時間が $0.07\mu\text{s}$ 、5.5mでの時間が $0.08\mu\text{s}$ 、13.3mでの時間が $0.11\mu\text{s}$ となった。実測距離が長いほど測定時間が長くなることがわかった。また、ToF法を用いて光路長を求めるとそれぞれ、22.1m、26.6m、34.1とな

った。この結果より、ToF 法から求めた距離と実測距離は違うことがわかった。

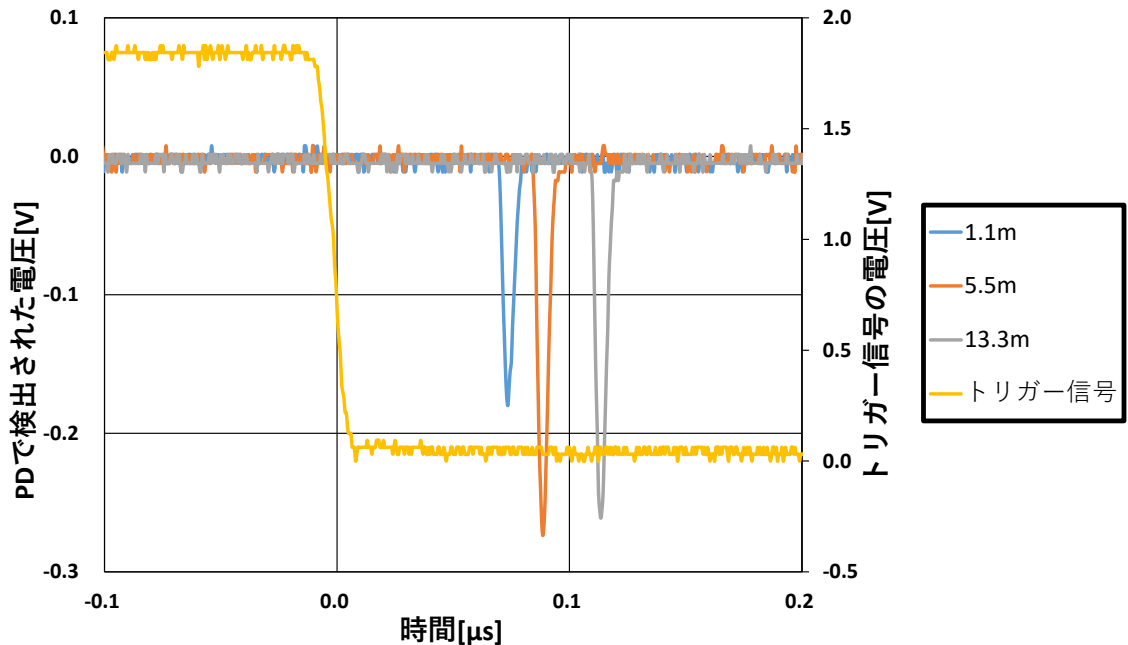


図 6 検出信号

3.3 ToF 法から求めた距離と実測距離の比較

3.2 の実験結果より、ToF 法から求めた距離と実測距離では光路長が大幅に違った。そこで、ToF 法から求めた距離と実測距離の近似式を求め、傾きと切片から光路長の比較をおこなった。図 7 に ToF 法から求めた距離と実測距離の比較したグラフを示す。図 7 より、近似式は $y = 1.00x + 21.02$ になった。傾き 1.00 より、ToF 法から求めた距離と実測距離は比例していることがわかった。また、切片より 21.02m のオフセットが生じていることがわかった。これはトリガー信号の時間が、実際にレーザー光が出射された時間と異なったためだと考えられる。近似式の結果より、ToF 法から光路長を求めることができたと言える。

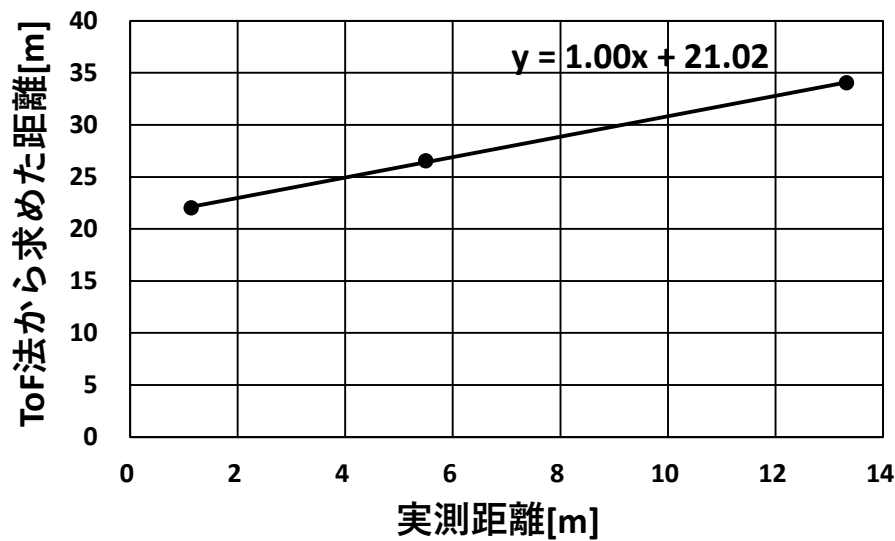


図 7 ToF 法から求めた距離と実測距離の比較

第 4 章 多重反射セルの光路長測定の実験構築と構築したシステムの原理確認

3 章で ToF 法の原理確認と鏡 1 枚を用いた光路長の測定をおこなうことができたため、次は、研究目的である多重反射セルを用いた光路長測定の実験構築と構築したシステムの原理確認をおこなった。

4.1 実験構成

図 8 に実験構成図を示す。光源には、波長 520nm、パルス幅 5ns、平均パワー12mW のナノ秒パルスレーザー(LD)を用いた。光検出器(PD)には周波数帯域が 4kHz-100MHz のものを用いた。1/4 波長板(QWP)には波長が 532nm のものを用いた。偏光ビームスプリッター(PBS)には波長が 420nm-680nm のものを用いた。オシロスコープ (Oscilloscope)には周波数帯域が 300MHz のものを用いた。出射されたレーザー光(LD)は PBS に通し、QWP でレーザー光を円偏光に変換し、多重反射セルを透過させる。透過した光を QWP で直線偏光に変換し、PBS に通す。PBS では入射した光が反射される。反射した光が光路長を偏光面に応じて PD によって電気信号に変換される。変換した信号を

オシロスコープで検出波形として表示し、光が出射されてから PD で検出されるまでの時間を測定する。発振器(FG)からは、レーザー光を出射させるためのトリガー周波数 20kHz が出力される。今回は、反射回数が多い場合と少ない場合の光路長を測定した。反射回数が多い場合をパターン 1、反射回数が少ない場合をパターン 2 とする。

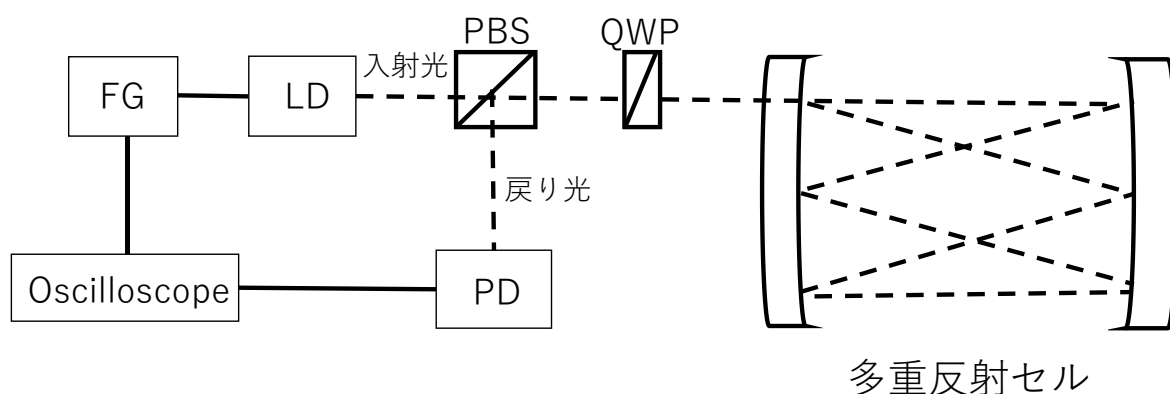


図 8 実験構成図

4.2 実験結果

図 9 に実験結果を示す。測定時間は、パターン 1 が $0.9\mu\text{s}$ 、パターン 2 が $0.2\mu\text{s}$ になった。ToF 法を用いて光路長を求めるとそれぞれ、266.7m、61.2m となった。3 章で求めた近似式より、21.02m のオフセットが生じていることがわかっている。そのため、このオフセットを引いた光路長はパターン 1 が 245.7m、パターン 2 が 40.2m になった。

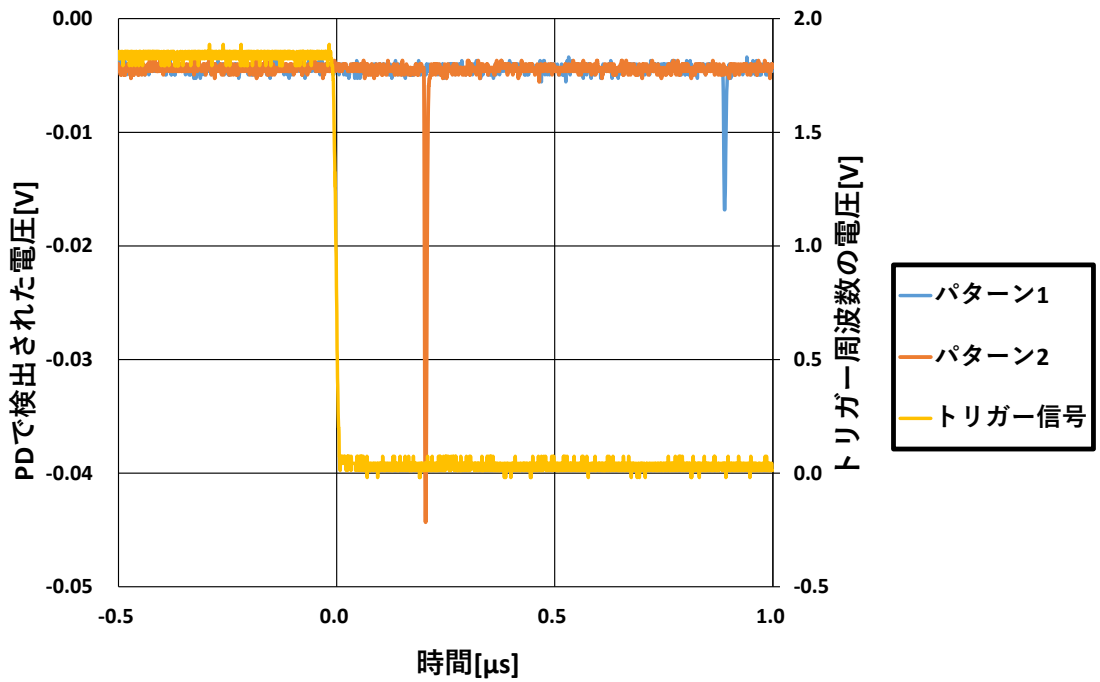


図9 検出信号

4.3 反射パターン

図10と図11にパターン1、パターン2の反射パターンを示す。反射パターンからわかるように、反射点が多いと光路長が長く、少ないと光路長が短いことがわかった。

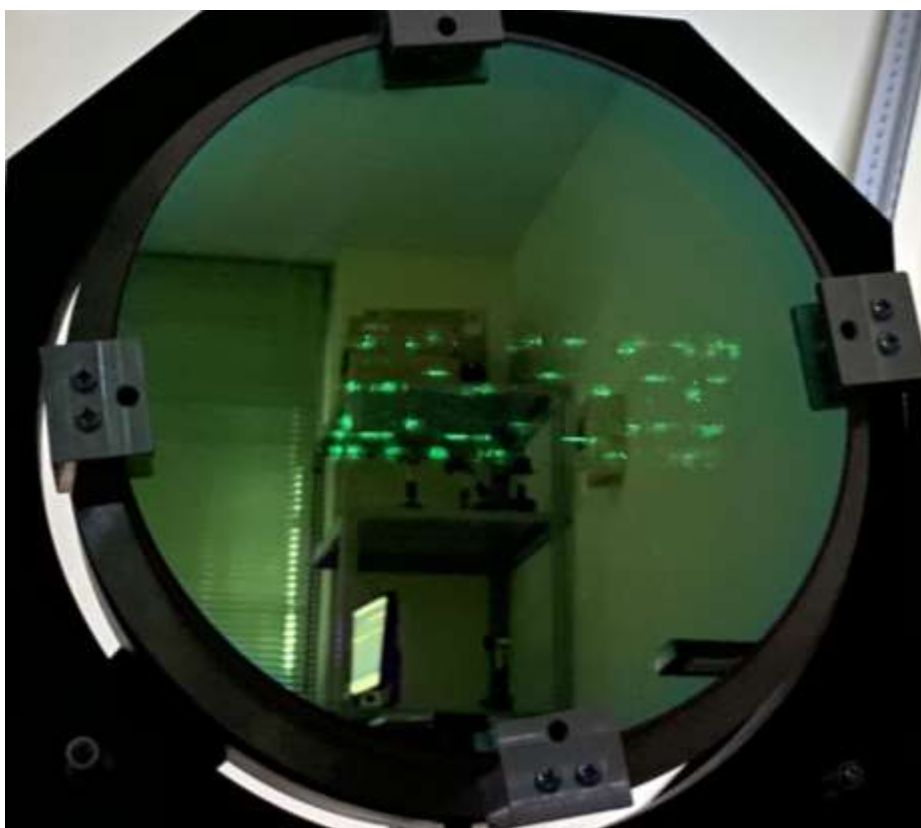


図 10 パターン 1 の反射パターン

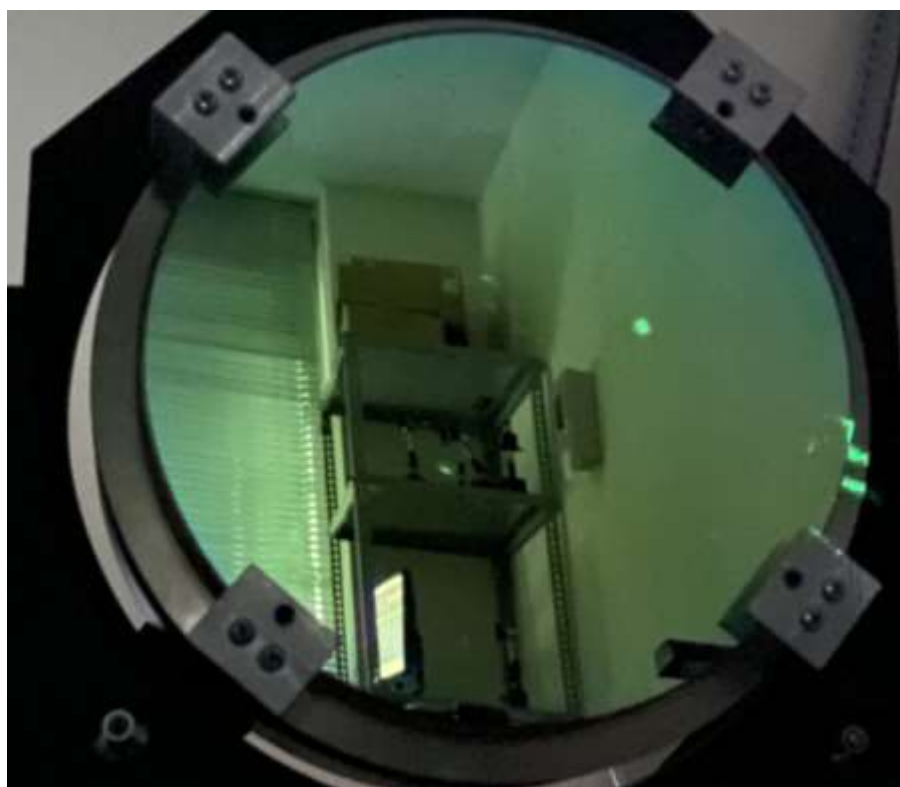


図 11 パターン 2 の反射パターン

第5章 反射回数から求めた光路長と ToF 法から求めた光路長の比較

4章の実験から多重反射セルの光路長を測定することができた。しかし、実際に測定した距離と比較をおこなっていないため ToF 法を用いた光路長が正しいのか信憑性が低い。そのため、反射回数から求めた光路長と ToF 法から求めた距離の比較を行い、信憑性を確かめた。

5.1 実験構成

実験 2 と同様の実験構成図を用いて行い、反射回数 62 回、ミラー間距離 4.95m における多重反射セルの光路長を測定した。ミラー間距離の測定にはレーザー距離計を用いた。図 12 と図 13 に M0、M1 の反射パターンを示す。今回はトリガー信号のオフセットを引いて光路長を求めるのではなく、光路長 0m(反射回数 0 回)の時の時間を測定し、その時間と反射回数 62 回で多重反射セルを透過した時間の差から光路長を求めた。

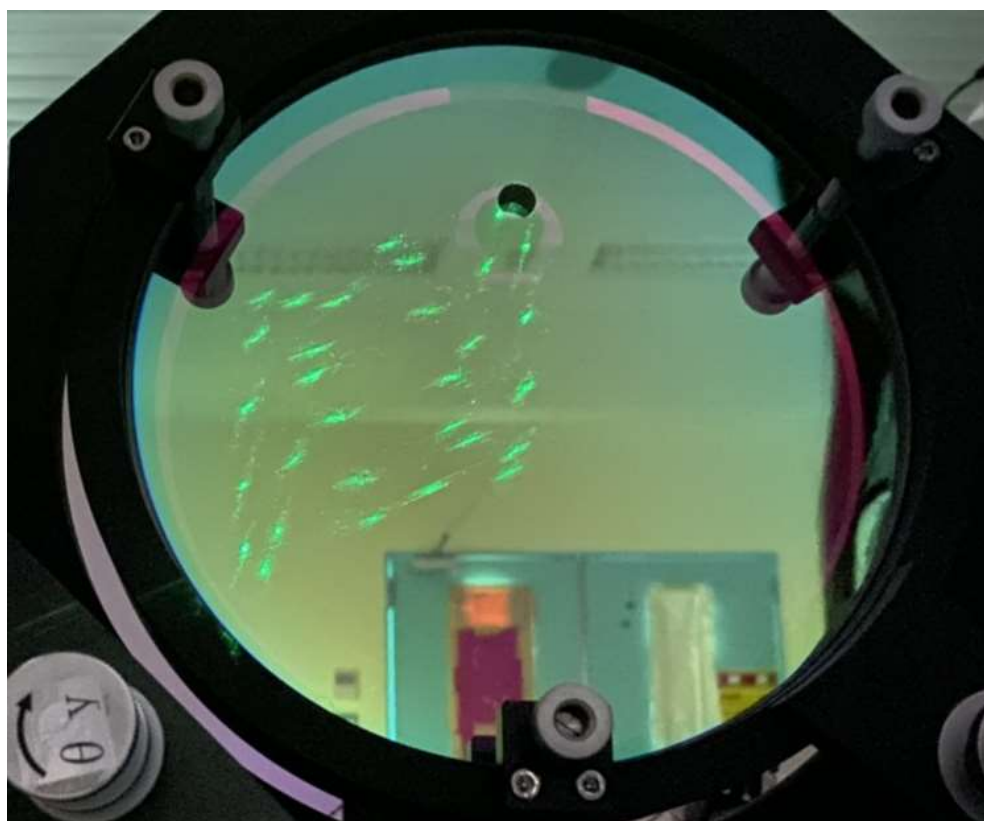


図 12 M0 反射回数 31 回

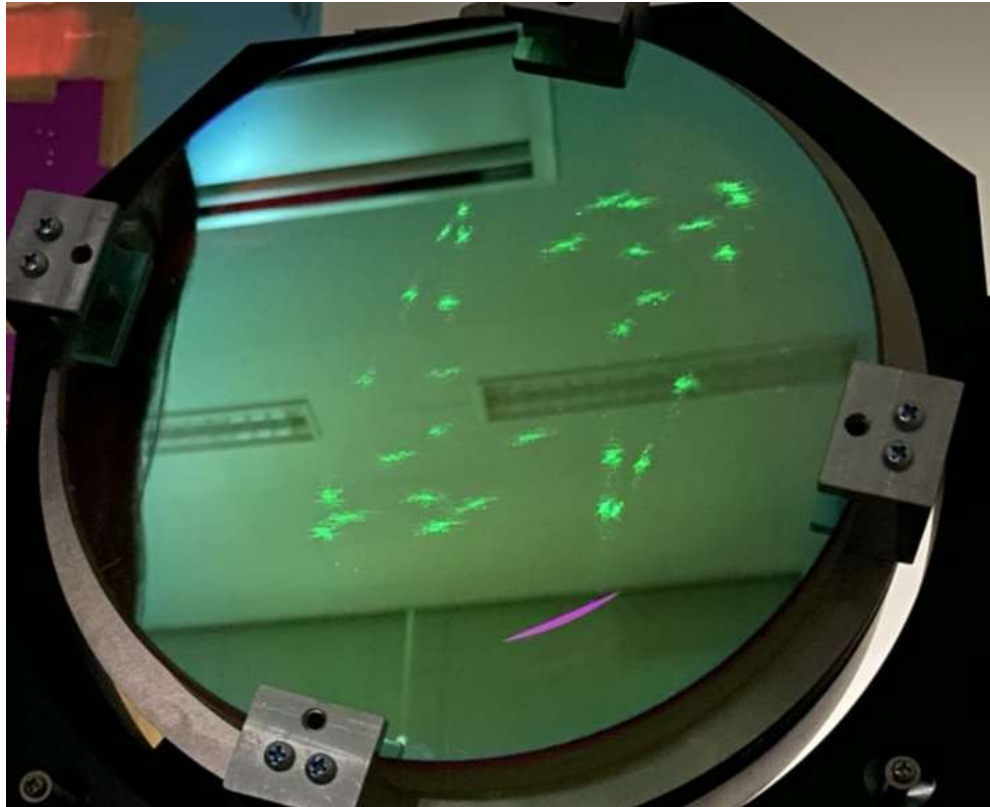


図 13 M1 反射回数 31 回

5.2 実験結果

図 14 に実験結果を示す。赤色の信号が光路長 0m での信号を示し、青色の信号が反射回数 62 回で多重反射セルを透過させた信号を示す。光路長 0m の光路長は 21.8m、多重反射セルを透過させたときの光路長は 330.1m であった。その結果、ToF 法から求めた光路長は 308.3m となった。反射回数から求めた光路長が 306.9m のため約 2m の誤差があることがわかった。これは、レーザー距離計で測定したミラー間距離が正確でない可能性がある。2m の誤差というのはミラー間距離で考えると 2 cm の誤差である。人間が測定した値のため、2 cm の誤差は許容範囲であると考えている。また、今回用いた実験機器より距離分解能は 3m であるため、2m の誤差は信用できない値である。

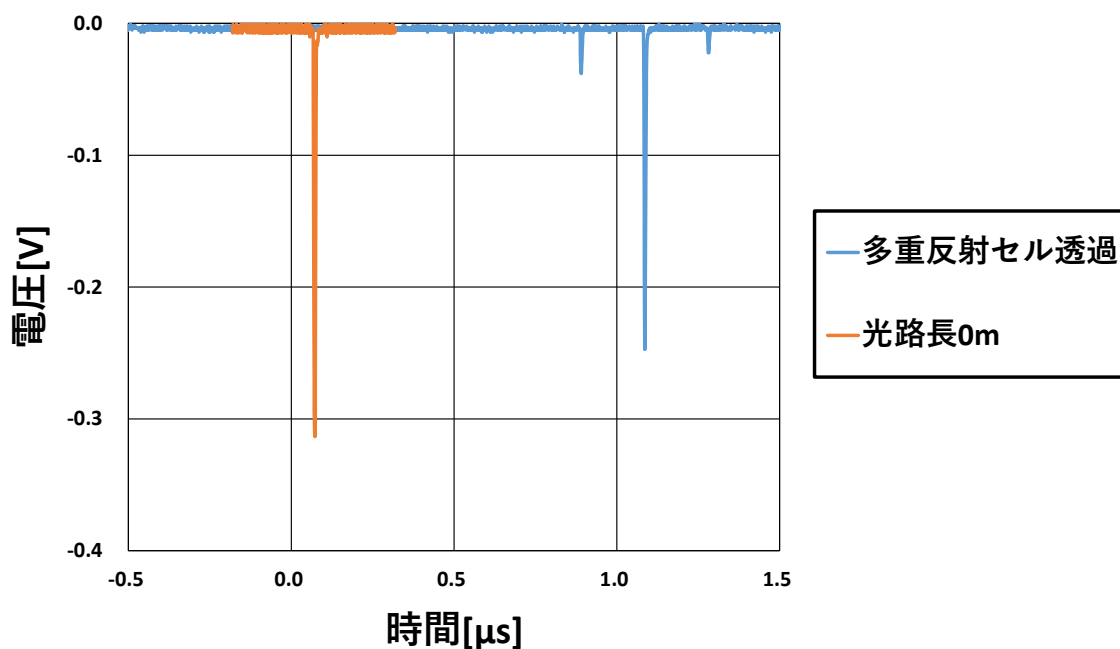


図 14 検出信号

第 6 章 まとめ

多重反射セルの光路長を測定するシステムの構築を目的として実験を行った。本研究では ToF 法を用いた光路長の測定を行った。

まず始めに、ToF 法の原理確認を行い、ToF 法から光路長を求めることができた。

次に多重反射セルの光路長測定のシステム構築と構築したシステムの原理確認を行った。2 種類の異なる反射パターンで、それぞれの光路長を測定することができた。そして、反射回数から求めた光路長と ToF 法から求めた光路長との比較を行った。その結果、反射回数 62 回の状態で光路長が 308.3m であることがわかり、反射回数から求めた光路長とは 2m の誤差が生じた。

第7章 謝辞

本研究に際して、国立高等専門学校、由井四海准教授に多くのご指導ならびに貴重な経験をさせていただきました。心より深く感謝申し上げます。

第8章 参考文献

[1]原和希 半導体レーザーを用いたマルチパスセル内の光路長測定

富山高等専門学校電子情報工学科 2018 年

[2]一ロメモ P 偏光と S 偏光

<http://mh.rgr.jp/memo/oe0113.htm>

[3]ファイバーラボ株式会社 波長板(1/2,1/4...etc)の用途や動作原理とは

<https://www.fiberlabs.co.jp/tech-explan/about-wave-plate/>

[4]シグマ光機株式会社 偏光ビームスプリッター

<https://www.global->

[optosigma.com/jp/Catalogs/pno/?from=page&pname=PBS&ccode=W3029&dcode=](https://www.global-optosigma.com/jp/Catalogs/pno/?from=page&pname=PBS&ccode=W3029&dcode=)

[5]ファイバーラボ株式会社 半導体レーザー(レーザーダイオードの仕組みとは)

<https://www.global->

[optosigma.com/jp/Catalogs/pno/?from=page&pname=PBS&ccode=W3029&dcode=](https://www.global-optosigma.com/jp/Catalogs/pno/?from=page&pname=PBS&ccode=W3029&dcode=)

[6]IT用語辞典バイナリ パルスレーザーとは(Pulsed laser)

<https://www.sophia-it.com/content/パルスレーザー>