

平成 29 年度
卒業研究報告

研究題目

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

指導教員 由井 四海

富山高等専門学校

電子情報工学科

原 和希

平成 30 年 2 月 22 日提出

目次

第1章 序論	3
1.はじめに.....	3
2.光と物質.....	3
2.1.光とは.....	3
2.2.スペクトル.....	4
3.マルチパスセル.....	5
第2章 レーザー	6
1.概要.....	6
2.原理.....	6
3.レーザー光の基本性質.....	7
3.1.指向性.....	7
3.2.コヒーレンス性.....	7
3.3.単色性.....	8
3.4.エネルギー集中性.....	9
4.半導体レーザー.....	9
4.1.半導体レーザーの発光原理.....	9
4.2.半導体レーザーの基本構造.....	9
5.半導体レーザーの種類.....	10
5.1.ファブリ・ペロー型ダイオードレーザー (FP-LD : Fabry Perot Laser Diode).....	10
5.2.分布帰還型レーザー (DFB-LD : Distributed Feedback Laser Diode).....	11
5.3.外部共振器型ダイオードレーザー (EC-LD : External Cavity Laser Diode).....	12
第3章 理論	13
1.光ヘテロダイン法.....	13
2.変調・復調.....	13
3.波の干渉.....	14
4.理論式.....	15

5.同期サンプリング	17
第4章 実験	18
1.光ファイバーで光路差を与えた場合の測定	18
1.1.実験機器	18
1.2.実験構成	19
1.3.実験結果	20
2.同期サンプリング法を用いた測定の検討	22
2.1.概要	22
2.2.実験機器	23
2.3.実験構成	24
2.4.実験結果	25
3.マルチパスセルで光路差を与えた場合の測定	26
3.1.実験機器	26
3.2.実験構成	27
3.3.実験結果	28
4.ビートスペクトルの平均化	31
第5章 まとめ	33
1.まとめ及び考察	33
謝辞	34
参考文献	34

第 1 章 序論

1.はじめに

光吸収分光法によるガス計測においてマルチパスセルは光路長を伸ばし、吸収強度を大きくする目的で使用される。マルチパスセルとは、2 枚以上の鏡を使って実効光路長を伸ばすことのできる機器である。マルチパスセル内の反射回数はミラー間距離のわずかなずれによって大きく変化するため、濃度測定の前に距離測定を行う必要がある。

半導体レーザーを用いて距離測定を行うことで濃度測定と距離測定を同時に行うことができる。

本研究では、分布帰還型(Distributed Feedback:DFB)レーザーを用いた Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)法によってマルチパスセル内の光路長を測定するためのシステムを構築する。

2.光と物質

2.1.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。電磁波を波長ないしは周波数で区分したものを図 1 に示す。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。

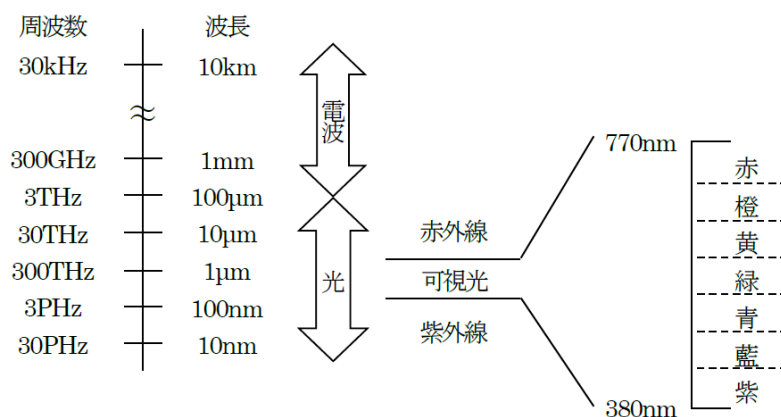


図 1 光の波長と周波数[1]

2.2.スペクトル

図 1 のように赤、橙、黄、緑、青、藍、紫と波長の順に並んだ色の帯をスペクトルという。白熱電灯の光は高温のタングステンから出る光であり、このスペクトルは赤から紫までの光が連続

的に分布している.このようなスペクトルを連続スペクトルという.一般に,高温の物体から出る光のスペクトルは連続スペクトルになる.また,水銀やナトリウムから出る光のスペクトルは細い形状のものがとびとびに分布している.このようなスペクトルを線スペクトルという.線スペクトルは,気体のそれぞれの原子や分子に特有である.太陽光のスペクトルは,連続スペクトルであるが,その中に多数の暗線が混じっている.この暗線をフラウンホーファー線という.これは太陽の表面から出た連続スペクトルをもつ光の中で特定の波長の光が,太陽の周りの原子や地球の周りの大気中の分子によって吸収されたことを示す. [2]

3.マルチパスセル

マルチパスセルとは,2枚以上のミラーを使用し,実効的な光路長を伸ばすことのできる機器である.マルチパスセルには 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い.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.ランバートピアの法則による透過率 $T(\lambda)$ の式を

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

に示す.ここで, 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.

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も求めることができる.

第 2 章 レーザー

本章では、レーザーの原理や種類に関して説明する。本研究では、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯の半導体レーザーを用いた。

1.概要

レーザー (LASER) とは、Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭文字を取ったもので、“放射の誘導放出による光の増幅”を意味する。また、レーザーは人工の光で、特定の物質に人工的に光や放電などの強いエネルギーを与えて励起させることで発生する。1960 年にアメリカのメイマンがルビーを使って 694nm の光の発振に初めて成功した。レーザーは物質の状態によって気体レーザー、固体レーザー、液体レーザー、半導体レーザーなどに分類される。半導体は固体であるが、励起方法とエネルギー準位が異なるため固体レーザーと分けて考えられる。[3]

2.原理

レーザー媒質中に安定状態（基底状態）で存在する原子が、光などの外部からのエネルギーを吸収すると電子がいったん外側の軌道に飛び（励起状態）、一定時間後に光を放出して再び基底状態に戻る。放出される光の波長はレーザー媒質に含まれる原子の種類により異なる。

レーザー媒質に対する強力なエネルギー供給で励起状態の原子数が増え、基底状態の原子

数を上回った状態を“反転分布状態”という。この状態で外から同じ周波数の光を送ると、励起状態の原子から光が放出される。これが他の励起状態の原子へ連鎖反応を起こし、同一方向に向けて光を放出する。それによってより強い光が得られる。この現象を誘導放出という。

3. レーザー光の基本性質

レーザーの持つ光増幅作用は、レーザー媒質による誘導放出の過程に起因するが、この過程のためにレーザー光は自然光にはない次のような顕著な性質を持っている。

3.1. 指向性

レーザー光では共振器の軸方向に往復する光だけが増幅され発振する。したがって、レーザー光の出力光はその軸方向にだけ直進する光となっている。これを指向性という。

一方、自然光はほとんど指向性を持っておらず、光はあらゆる方向に広がってしまう。

3.2. コヒーレンス性

一般の光は自然光であるため、光波の位相はランダムであり、自然光が互いに干渉することはない。しかし、レーザー光は誘導放出により発生する光であるため、光波の位相、エネルギーがそろっており、干渉が起こる。この性質をコヒーレンスといい、コヒーレンスの概念は次の2つである。

<時間的コヒーレンス>

時間的コヒーレンスとは、異なる時間にレーザーを発した光同士でも干渉することを指す。通信に使われている電波は電子回路の発振器から出る電磁波であるが、これを用いて位相変調、ヘテロダイン検波などを行うには電磁波の時間的コヒーレンスが重要である。光通信でも位相変調、ヘテロダイン検波が使われる場合があるが、この場合にはレーザー光の時間的コヒーレンスが高いことが不可欠である。

<空間的コヒーレンス>

空間的コヒーレンスとは、レーザー光が空間的に異なる位置でも干渉することを指す。光情報処理などに使われている立体写真技術であるホログラフィー (holography) をはじめ、干渉や回折などの波動光学現象には空間的コヒーレンスが重要である。

なお、上記の二種類のコヒーレンスの間には原理的な関連はほとんどない。

このほか、レーザー光の偏光特性や振幅の揺らぎ、特に強度の揺らぎ、光子の統計的性質なども通常の光とは著しく異なっている。

3.3.単色性

太陽光をプリズムに通すと複数の波長成分のスペクトルに分解される。これは、太陽光が様々な波長の光が混ざり合ったものであるからである。一方、レーザーは単一波長の光の集

まりなので、分解されることがない。この特徴を単色性と呼んでいる。

3.4. エネルギー集中性

レーザー光の平均パワーは従来からある光源と比較して決して高くはない。なぜならレーザー発振の効率が一般に低いからである。しかし、レーザー光のパワーは時間的、空間的、スペクトル的に狭い領域に集中しているので、きわめて高い光の強度を実現する。

4. 半導体レーザー

4.1. 半導体レーザーの発光原理

半導体レーザー (LD) 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が、発光の仕組みは発光ダイオード (LED) と同じである。発光は p-n 接合の p 型クラッドから n 型クラッドに電流を流すことによって起こる。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、接合部分で電子と正孔が再結合される時に発光する。

4.2. 半導体レーザーの基本構造

半導体レーザーの基本的な構造は図 2 のようになっている。活性層 (発光層) を n 型と p 型のクラッド層で挟んだ構造 (ダブルヘテロ構造) が n 型基板上に作られており、電極から電流を流すことができる。活性層の端面は光が反射するようになっている。順方向に電圧を

かけると n型クラッド層から電子が,p 型クラッド層からホールが活性層に流入し,活性層内で再結合して発光する.この光はまだレーザー光ではないが,クラッド層の屈折率が活性層より低いので光は活性層に閉じこめられ,また,活性層の両端面が反射鏡の役目をするので光は活性層内を増幅されながら往復して誘導放出を生じてレーザー発振が起こる.

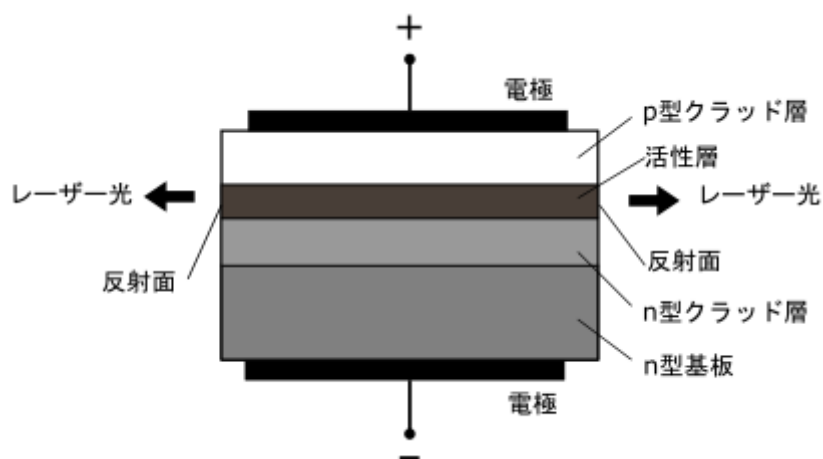


図2 構造半導体レーザーの基本的な構造[4]

5.半導体レーザーの種類

5.1.ファブリ・ペロー型ダイオードレーザー (FP-LD : Fabry Perot Laser Diode)

レーザー発振が最も簡単な共振器構造がファブリ・ペロー共振器である.高反射率の鏡を2枚向かい合わせ,これらの鏡で光を反射させて増幅することでレーザー発振を起こす.しかし,この場合には共振モードとして多くの縦モードが存在することになり,モード間の競合やレーザーの温度などによる屈折率の変化でモードの跳びが起こり,発振波長が不連続になってしまう.また,欠点として,高速パルスで直接変調すると発振縦モードが跳躍したり,ある

いはその数が増加したりして、光ファイバー伝送の質を低下させてしまうことがある。そのため、FP-LD を用いる場合は、モノクロメータやエタロンなどを用いて単一波長の選択を行うとともに、ガスなどの測定に必要な波長と半導体レーザーが発振可能な波長域とを一致させる必要がある。

5.2. 分布帰還型レーザー (DFB-LD : Distributed Feedback Laser Diode)

図 4 に DFB-LD の概念図を示す。DFB-LD は、単一発振波長を連続的に掃引可能な半導体レーザーである。レーザーダイオード素子の内部に微細な回折格子を設けることにより特定の波長の光のみを反射させることができ、単一発振モードの条件も揃いやすいため、分光法の応用に適している。また、吸収スペクトルの線幅と比べるとレーザー光のスペクトル線幅（約 10MHz）は約 2~3 桁狭く、吸収スペクトルを高分解能、高精度で測定できる。しかし、ガスの測定を行うときなどには、各波長で違う分布帰還型レーザーを必要とする。DFB-LD は、本研究で使用するレーザーである。

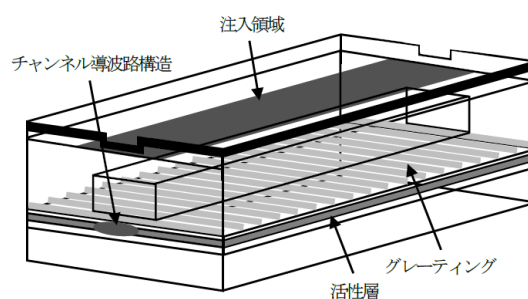


図 3 DFB-LD の概念図[5]

5.3.外部共振器型ダイオードレーザー (EC-LD : External Cavity Laser Diode)

図 5 に EC-LD の構成を示す. EC-LD は, 半導体レーザーと回折格子によって構成される小型の波長可変光源である. 一般的なダイオードレーザーはマルチモードで発振しているが, 複雑なレーザーシステムを用いることで単一モードにすることができる. 実用的なレーザー分光法の応用のためには, モードホップ無しでの単一モードの連続的な調整が必要となる.

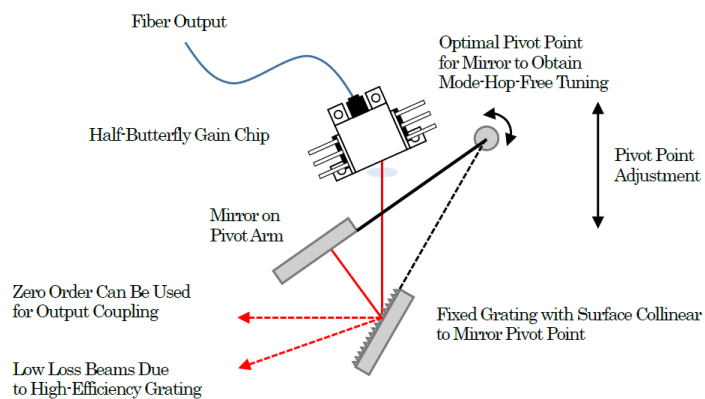


図 4 リットマン型外部共振器型半導体レーザー構成[6]

第3章 理論

1.光ヘテロダイン法

周波数のわずかに異なる2つの振動を重ね合わせると、差の周波数のうなり（強度の強弱）が生じる。そのうなりをビートと呼ぶ。ビートの身近な例として寺院にある鐘の音が挙げられる。鐘の形状により複数のわずかに周波数の違う音が発せられ、それらがビートを生むと考えられる。光においても、ビートは生じる。光の場合、周波数のわずかに異なる2つの光を重ね合わせてフォトダイオードで検出したときに、光の強度が2つの周波数差で時間的に変動する現象をビートという。この光のビートを検出することをヘテロダイン検出と呼び、光ヘテロダイン検出した信号から情報を取り出す手法を光ヘテロダイン法と呼ぶ。光ヘテロダイン法の利点として、ビート周波数から情報を得るのでノイズによる電気信号の強度変動に影響されない、微小な信号でも検出が可能である等が挙げられる。[7]

本研究の目的は、ガスの濃度測定で用いた実験系でマルチパスセル内の光路長を測定することである。光ヘテロダイン法を用いて、光源から出射される光を変調することで距離の計測が可能である。

2.変調・復調

光信号での情報伝達のためにはまず、その光信号の情報を電気信号に変換する必要がある。

る。その電気信号、電波に変換するために変調を行う。変調とは、信号を伝えるための波、搬送波(キャリア波)を変化させることを指す。変調には、周波数変調と振幅変調、位相変調等が挙げられる。それらは、FM(Frequency Modulation)、AM(Amplitude Modulation)、PM(Phase Modulation)と呼ばれる。逆に電気信号、電波を受け取り、情報に変換する操作を復調という。本研究では、周波数変調を用いた連続波を入力として与え測距を行った。この波を周波数変調連続波(FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave)といい、これを用いる方法を FMCW 法という。

3.波の干渉

波の干渉には、水面波の干渉や音波の干渉等が挙げられる。この波の干渉は、1805年にトーマス・ヤングが発見した。光源からの光を平行な2つのスリットを通しスクリーンに照射すると、光波と光波が強め合った部分と弱め合った部分が縞模様になって現れる。これを干渉縞という。

本研究では、周波数の近い光波の干渉によって発生するビートを観測する。ここで2つの光の電場をとしたとき、 E_1, E_2 とし、それぞれ

$$E_1(x, t) = u_1(x) \exp\{i[2\pi f_1(x)t + \phi_1(x)]\} \quad (3.1)$$

$$E_2(x, t) = u_2(x) \exp\{i[2\pi f_2(x)t + \phi_2(x)]\} \quad (3.2)$$

で定義する. この 2 つの光を重ね合わせると検出される光は

$$I(x, t) = \frac{u_1^2(x)}{2} + \frac{u_2^2(x)}{2} + u_1(x)u_2(x)\cos\{2\pi[f_1(x) - f_2(x)]t + [\phi_1(x) - \phi_2(x)]\} \quad (3.3)$$

のようになる. ここで $f_1(x) - f_2(x)$ はビート周波数 f_B という.

以上より, 周波数解析によって, $f_1(x) - f_2(x)$ が観測できる.

4.理論式

FMCW 法による測定の原理図を図 5 に示す. 図 5 で root1 と root2 を定義する. root1 と root2 では光路長に差がある. レーザーから出射された光はファイバカップラ 1 によって root1 と root2 に 1:1 に分けられる. そして root1 と root2 を通る光はファイバカップラ 2 によって干渉する. 2 つの波の干渉によりビートが発生する. ここで, 周波数を f_B とする.

ここで root1 と root2 を通る光は縦軸周波数, 横軸時間で表すと図 6 のようになる.

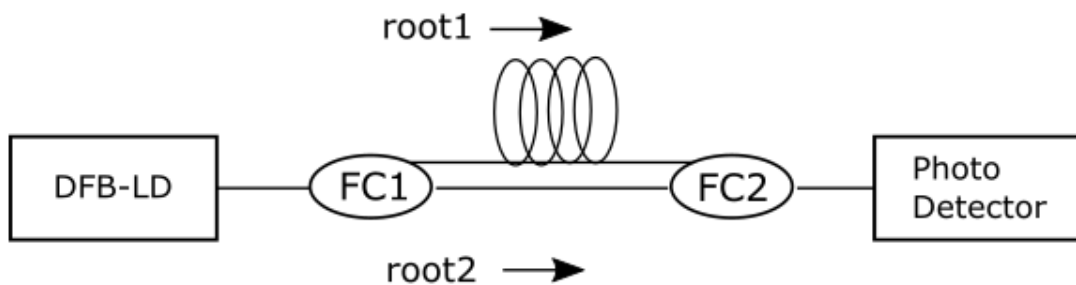


図 5 実験系

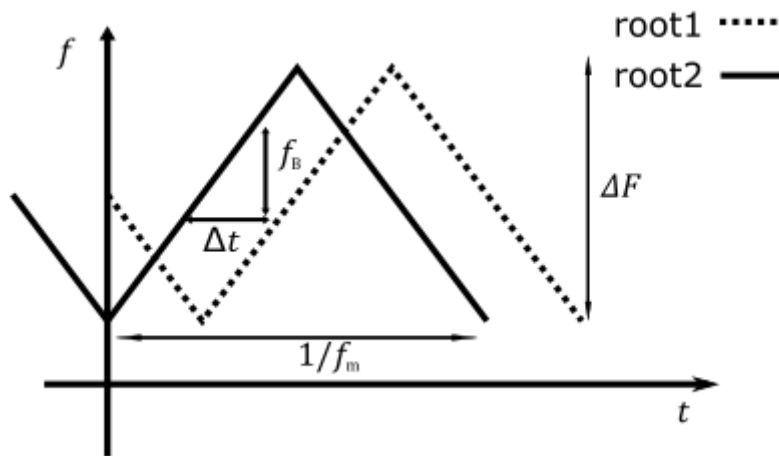


図6 ビート周波数と光路差の関係

root1 と root2 を通る光にはファイバケーブル 2 に到達するまでに時間差 Δt が生じる。そして、図6では、root1 と root2 を通過した三角波では三角形の合同条件が成り立つので、 Δt を

$$\Delta t = \frac{nD}{c} \quad (3.4)$$

で表すことができる。また、ビート周波数 f_B を

$$f_B = \Delta F f_m \Delta t \quad (3.5)$$

で表すことができる。以上より、root1 と root2 の光路長差を D 、光の速さを c 、光ファイバのコアの屈折率を n 、周波数変調幅を ΔF 、変調周波数を f_m とし、理論式

$$D = \frac{c}{n\Delta F f_m} f_B \quad (3.6)$$

を導く。この式より、光路差とビート周波数は比例の関係にあることが分かる。

5.同期サンプリング

同期サンプリングとは、測定対象の周波数の変化に同期して測定波形データのサンプリングを行うことである。この方法は、回転機械の振動や騒音の回転次数比分析に用いられる。回転次数比分析とは、回転体の1回転に1周期を完了する成分のことをいう。同期サンプリングを行うには、回転に同期させるための回転パルスが必要となる。回転パルスは通常、1回転あたり1パルスの信号を使用し、この回転パルスの周波数、つまり回転数に比例したサンプリング周波数でデータをサンプリングする。

非同期サンプリングでは、回転数とは関係なく決められた一定の周波数をサンプリング周波数としてデータをサンプリングするため、そのため、回転機械の回転数が上昇または減少し、回転速度の変化によって振動や騒音の周波数が変化したとき、1回転あたりのサンプル点数も変化する。しかし、同期サンプリングの場合は、回転数が遅い時はサンプリング周波数も低く、回転数が早くなればそれに比例してサンプリング周波数も高くなるため1回転あたりのサンプル数は変化しない。そのため、回転速度の変化による影響を受けずに、1回転に1周期を完了する成分に着目することが容易となる。図7に同期サンプリングのイメージ図を示す。

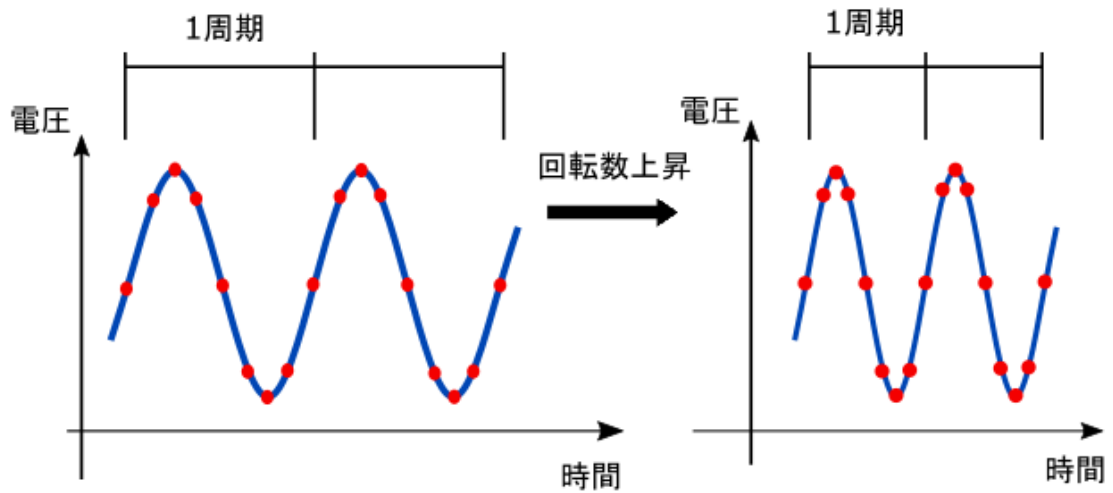


図 7 同期サンプリングのイメージ図

第 4 章 実験

1. 光ファイバーで光路差を与えた場合の測定

本研究は FMCW 法を用いたマルチパス内の光路長計測を行うシステムを構築することを目的としている。マルチパスセル内の光路長を測定する前にビート周波数と光路差の関係を調べるために、光ファイバーで干渉計を構築した。以下に、使用機器、実験構成、実験結果を示す。

1.1. 実験機器

本実験で使用した機器を表 1 に示す。

表 1 実験機器

品名	メーカー	型番	規格
DFBモジュール	NTTエレクトロニクス	NLK1S56SS	波長:1520nm 光強度:20mA 発振振幅:12MHz
任意信号発生器	Tektronix	AFG3102	正弦波 :1μ -100MHz 高周波歪み:0.2%
電流コントローラ	THORLABS	TED200S	変調係数:20mA/V・5% 帯域幅:0-250kHz
温度コントローラ	THORLABS	LDC200S	温度分解:1Ω 温度安定性:0.002度以下
フォトダイオード	THORLABS	PDA20S-EC	感度波長範囲:800-1700nm 受光面積:3.14
光ファイバー	THORLABS	P3-SMF-FC	長さ:1m,2m 屈折率:1.4682
光ファイバカプラ	THORLABS	10202A-50-APC	波長:1310-1550nm 分岐比:50:50
A/D変換器	NATIONALINSTRUMENTS	NIUSB-6251	サンプリングレート:1.25MS/s ビット数:16-bit 帯域幅:1.7MHz

1.2.実験構成

本実験で使用した実験系を図 8 に示す. 光源には波長 1.5 μm帯の分布帰還型(DFB)レーザーを用い, 三角波で光周波数を掃引する. 周波数掃引されたレーザー光はファイバカプラ 1 により 1:1 に分けられる. そのあと root1 と root2 を通った光をファイバカプラ 2 で合わせる. ファイバカプラ 2 で合わせた光はフォトダイオード(PD)を介し光信号を電気信号へと変換し, AD 変換後 PC に取り込み,FFT 解析することにより, ビート周波数を測定する. この時, 温度 25°C,電流コントローラの変調振幅 10mA_{p-p}, 変調周波数 50Hz, オフセット電流 60mA, 周波数掃引幅 6.9GHz, コアの屈折率 1.468 の光ファイバーを用いて実験を行った. 測定する光路差は 1m, 2m, 3m である.

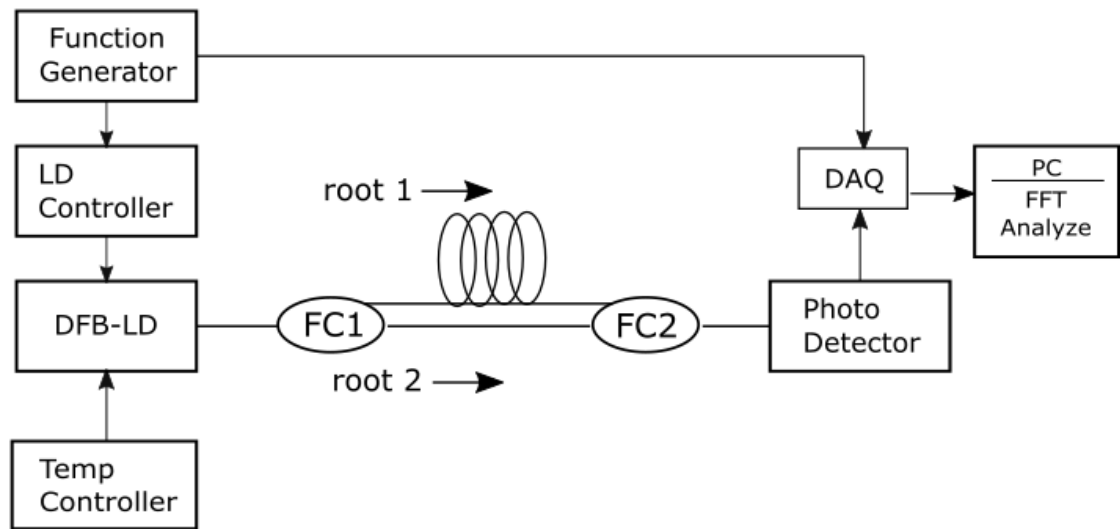


図 8 実験構成図

1.3.実験結果

図 9 に root1 と root2 の光路差 1m, 2m, 3m で測定したビートスペクトルを示す. サンプリングレートは 100kS/s でサンプル数は 2000 サンプルで測定した.図 10 にビート周波数と光路差の関係を示す.

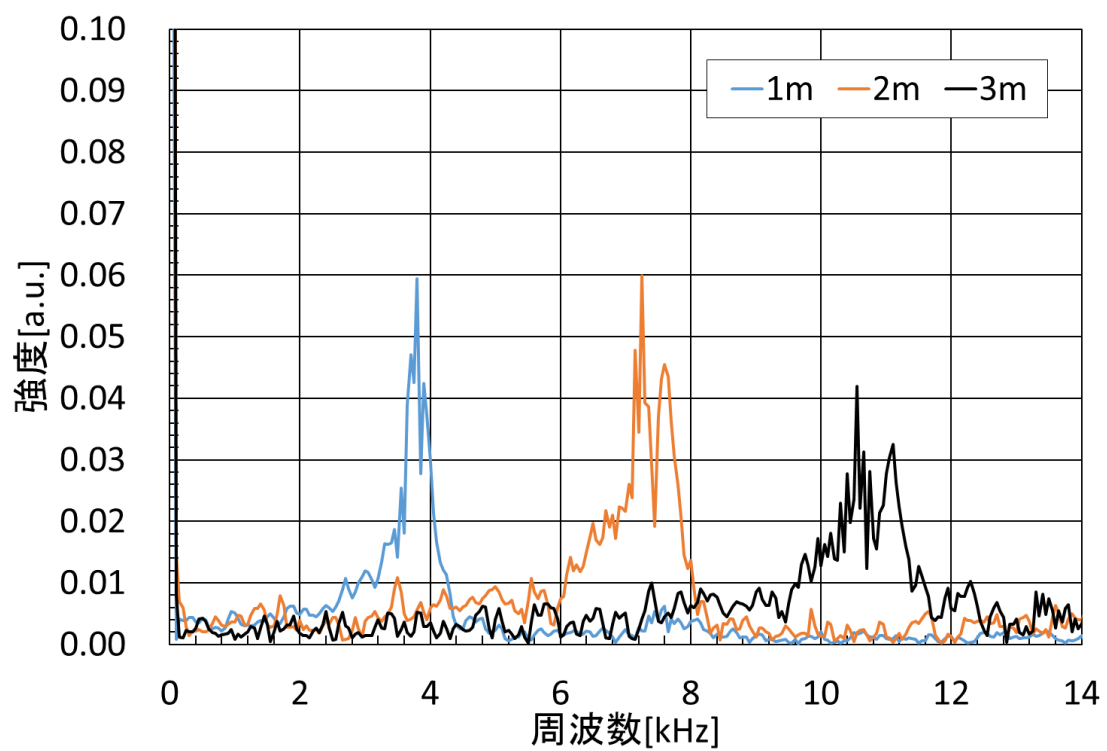


図9 測定結果

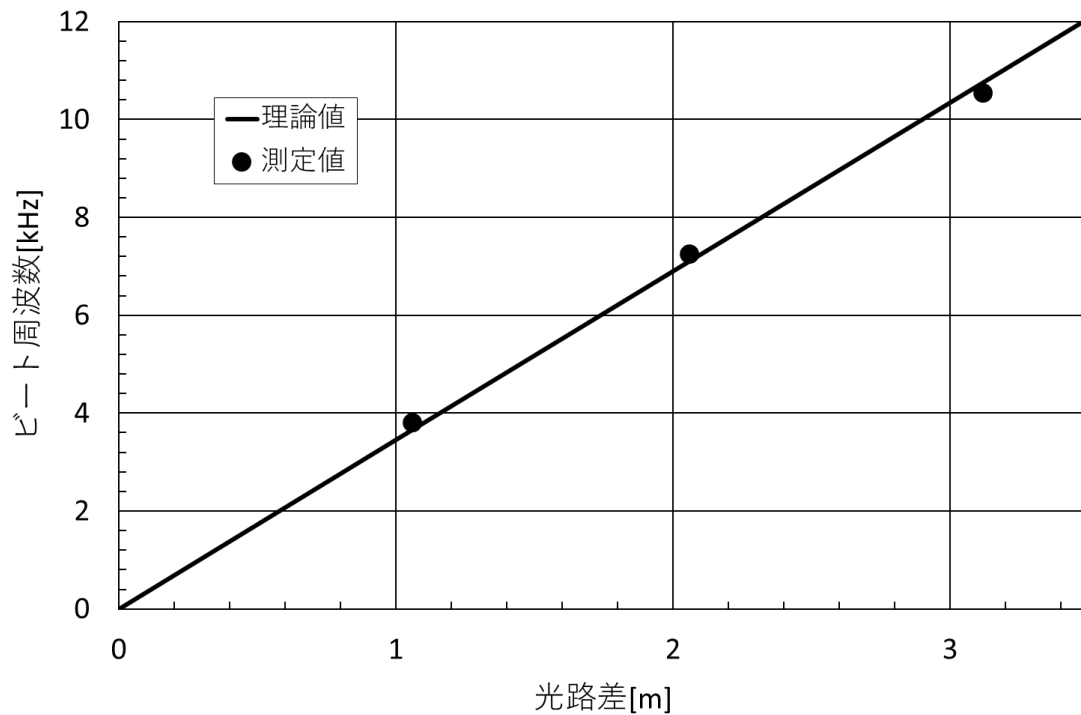


図 10 ビート周波数と光路差の関係

各光路においてビートスペクトルを確認することができたが、1つのスペクトルに複数の周波数成分が現れていることが分かる。また、図 9 より、理論式と同様にビート周波数と光路差は比例関係にあることを確認することができた。

2.同期サンプリング法を用いた測定の検討

本実験では測定精度の向上を図るため同期サンプリング法を用いた実験系の構築を検討した。以下に、概要、使用機器、実験構成、実験結果を示す。

2.1.概要

1つのスペクトルに複数の周波数成分が現れている原因として、レーザー光の周波数掃引が

非線形でビート周波数が一定でないことが挙げられる.図 11 に本研究で使用した DFB レーザーの電流波長特性を示す. これより,電流とレーザーの発振波長が線形でないことが分かる.したがって,電流を掃引したとき,時間によってビート周波数が変化することが分かる.

そこで,同期サンプリング法を用いる.同期サンプリング法とは,補助干渉計で得られた干渉信号を TTL 信号 (矩形波) に変換し,AD 変換のサンプリングを行うことである. 光周波数の非線形性を打ち消しビート周波数を一定に補正するという目的がある. TTL 信号は光路差 20m の干渉信号をコンパレータにより矩形波へと変換したものを使用した.

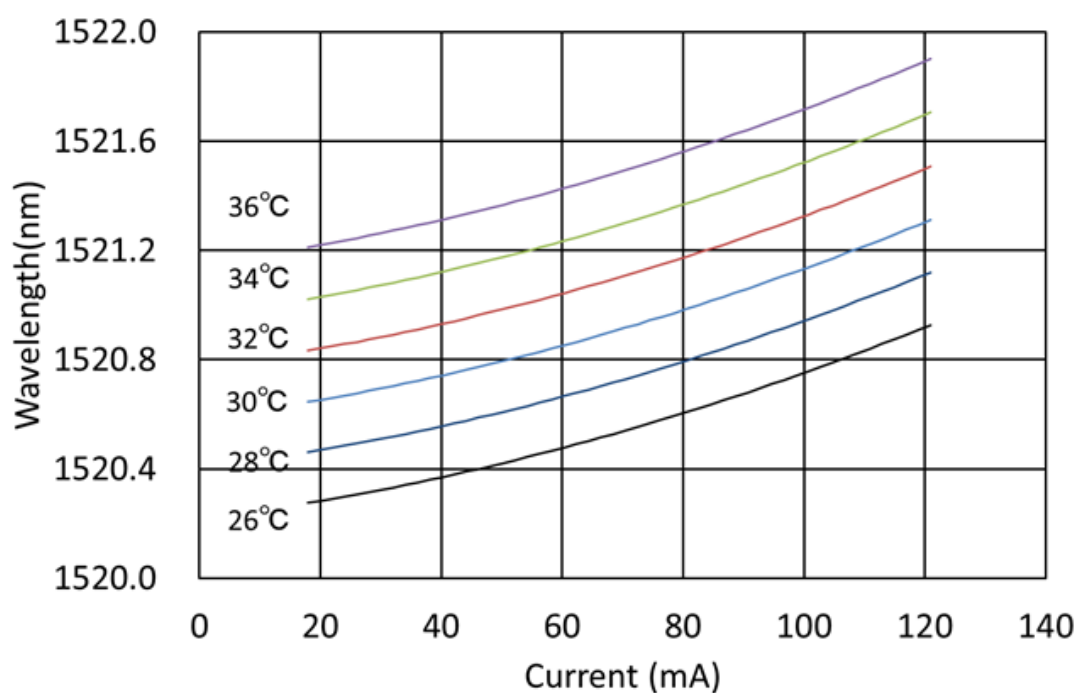


図 11 DFB レーザーの電流波長特性

2.2.実験機器

本実験で使用した機器を表 2 に示す.

表 2 実験構成

品名	メーカー	型番	規格
DFBモジュール	NTTエレクトロニクス	NLK1S56SS	波長:1520nm 光強度:20mA 発振振幅:12MHz
任意信号発生器	Tektronix	AFG3102	正弦波 :1 μ -100MHz 高周波歪み:0.2%
電流コントローラ	THORLABS	TED200S	変調係数:20mA/V \cdot 5% 帯域幅:0-250kHz
温度コントローラ	THORLABS	LDC200S	温度分解:1 Ω 温度安定性:0.002度以下
フォトダイオード	浜松ホトニクス	G9801-22	感度波長範囲:800-1700nm 受光面積:3.14
光ファイバー	THORLABS	P3-SMF-FC	長さ:1m,2m 屈折率:1.4682
光ファイバーカプラ	THORLABS	10202A-50-APC	波長:1310-1550nm 分岐比:50:50
光サーキュレータ	THORLABS	6015-3-APC	波長:1525-1610nm 損傷閾値:500mW
A/D変換器	NATIONALINSTRUMENTS	NIUSB-6251	サンプリングレート:1.25MS/s ビット数:16-bit 帯域幅:1.7MHz
可変光ファイバー減衰器	THORLABS	VOA50-APC	帯域幅:1550 \pm 20nm 減衰幅:1.5-50dB 減衰分解能:0.1dB
凹面ミラー	THORLABS	CM508-200-E04	曲率半径:400mm 帯域幅:1280-1600nm ミラー直径:50.8mm
コンパレータ	TEXAS INSTRUMENTS	LM339N	電力損失:1500mW 応答時間:1.3 μ s
オペアンプ	TEXAS INSTRUMENTS	OP07CP	ゲイン帯域幅積:600kHz 電源電圧: \pm 3- \pm 18V

2.3.実験構成

本実験で使用した実験系を図 12 に示す。光源には波長 1.5 μ m帯の分布帰還型(DFB)レーザーを用い、三角波で光周波数を掃引する。周波数掃引されたレーザー光はファイバカプラ 1 により 1:1 に分けられる。そのあと測定対象である光路差を作り出すため FC2 でレーザー光を同じように 1:1 に分ける。root1 と root2 を通った光をファイバカプラ 2 で合わせる。ファイバカプラ 2 で合わせた光はフォトダイオード(PD)を介し光信号を電気信号へと変換し、同期サンプリング法を用いて AD 変換した後 PC に取り込み、FFT 解析すること

により、ビート周波数を測定する。この時、温度 25°C、電流コントローラの変調振幅 10mA_p、変調周波数 50Hz、オフセット電流 60mA、周波数掃引幅 6.9GHz、コアの屈折率 1.468 の光ファイバーを用いて実験を行った。

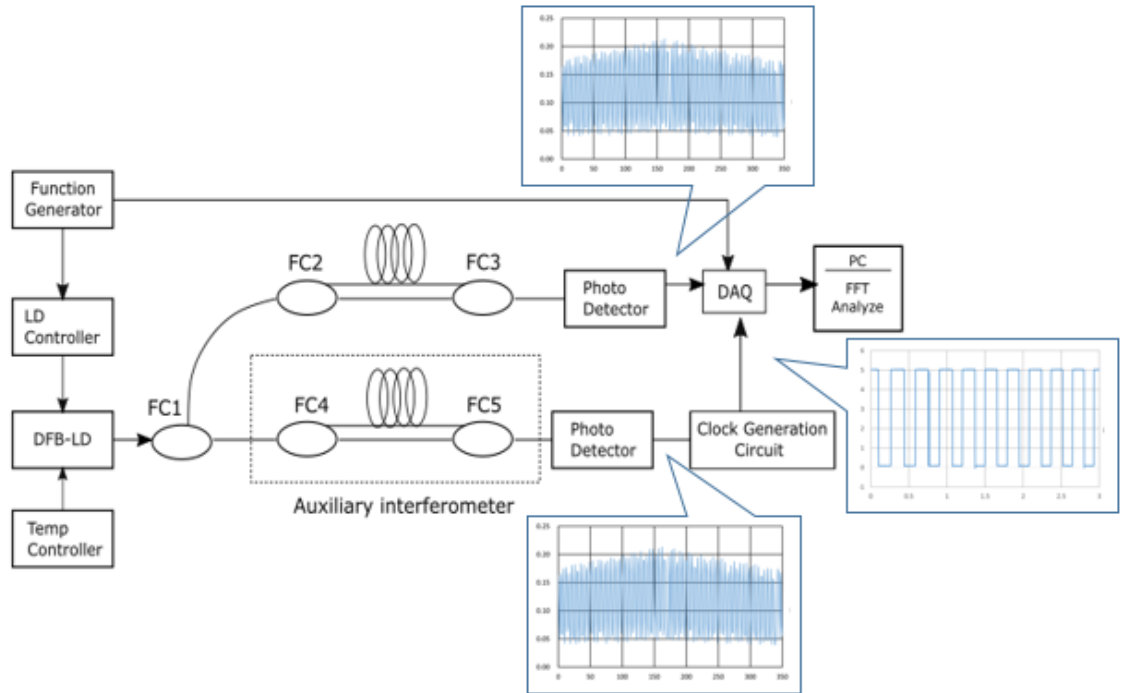


図 12 実験構成図

2.4.実験結果

図 13 に同期サンプリング法を用いた場合の root1 と root2 の光路長差 1m, 2m, 3m で測定したビートスペクトルを示す。サンプリングレートは 34.6kS/s でサンプル数は 692 サンプルで測定した、

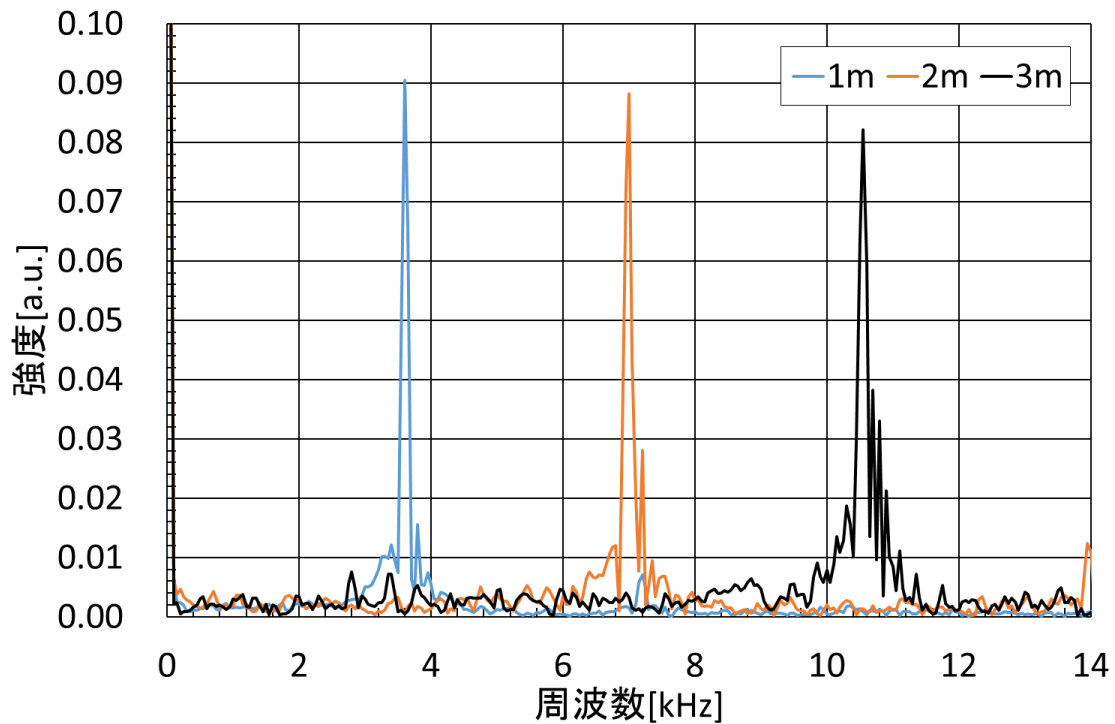


図 13 測定結果

測定結果より,同期サンプリング法を用いることによってビートスペクトルの線幅を小さくすることが出来た. ビートスペクトルの線幅を小さくすることで複数の周波数成分が混在していないことが確認できるため光路長の推定がしやすくなったことが分かる.

3.マルチパスセルで光路差を与えた場合の測定

本実験では研究の目的である FMCW 法を用いたマルチパス内の光路長計測を行うシステムを構築した.

3.1.実験機器

本実験で使用した機器を表 3 に示す.

表 3 実験機器

品名	メーカー	型番	規格
DFBモジュール	NTTエレクトロニクス	NLK1S56SS	波長:1520nm 光強度:20mA 発振振幅:12MHz
任意信号発生器	Tektronix	AFG3102	正弦波 :1 μ -100MHz 高周波歪み:0.2%
電流コントローラ	THORLABS	TED200S	変調係数:20mA/V \cdot 5% 帯域幅:0-250kHz
温度コントローラ	THORLABS	LDC200S	温度分解:1 Ω 温度安定性:0.002度以下
フォトダイオード	浜松ホトニクス	G9801-22	感度波長範囲:800-1700nm 受光面積:3.14
光ファイバー	THORLABS	P3-SMF-FC	長さ:1m,2m 屈折率:1.4682
光ファイバカプラ	THORLABS	10202A-50-APC	波長:1310-1550nm 分岐比:50:50
光サーキュレータ	THORLABS	6015-3-APC	波長:1525-1610nm 損傷閾値:500mW
A/D変換器	NATIONALINSTRUMENTS	NIUSB-6251	サンプリングレート:1.25MS/s ビット数:16-bit 帯域幅:1.7MHz
可変光ファイバー減衰器	THORLABS	VOA50-APC	帯域幅:1550 \pm 20nm 減衰幅:1.5-50dB 減衰分解能:0.1dB
凹面ミラー	THORLABS	CM508-200-E04	曲率半径:400mm 帯域幅:1280-1600nm ミラー直径:50.8mm
コンパレータ	TEXAS INSTRUMENTS	LM339N	電力損失:1500mW 応答時間:1.3 μ s
オペアンプ	TEXAS INSTRUMENTS	OP07CP	ゲイン帯域幅積:600kHz 電源電圧: \pm 3- \pm 18V

3.2.実験構成

本実験で使用した実験系を図 14 に示す. 光源には波長 1.5 μ m帯の分布帰還型(DFB)レーザーを用い, 三角波で注入電流を変調し, 光周波数を掃引する. 周波数掃引されたレーザー光はファイバカプラ 1 により 1:1 に分けられる. そのあと測定対象である光路差を作り出すためファイバカプラ 2 でレーザー光を同じように 1:1 に分ける. ファイバカプラ 2 で分けられた片方のレーザー光はレンズを介して空間に出力されマルチパスセル内で反射する. 反射して返ってきたレーザー光を再びレンズに入射させファイバカプラ 3 で合わせる.

ファイバケーブル 3 で合わせた光はフォトダイオード (PD) を介し光信号を電気信号へと変換し, 同期サンプリング法を用いて AD 変換した後 PC に取り込み, FFT 解析することにより, ビート周波数を測定する. この時, 温度 25°C, 電流コントローラの変調振幅 10mAp-p, 変調周波数 50Hz, オフセット電流 60mA, 周波数掃引幅 6.9GHz, コアの屈折率 1.468 の光ファイバーを用いて実験を行った. マルチパスセル内の反射回数が 4 回, 10 回, 14 回の時の光路長を測定する.

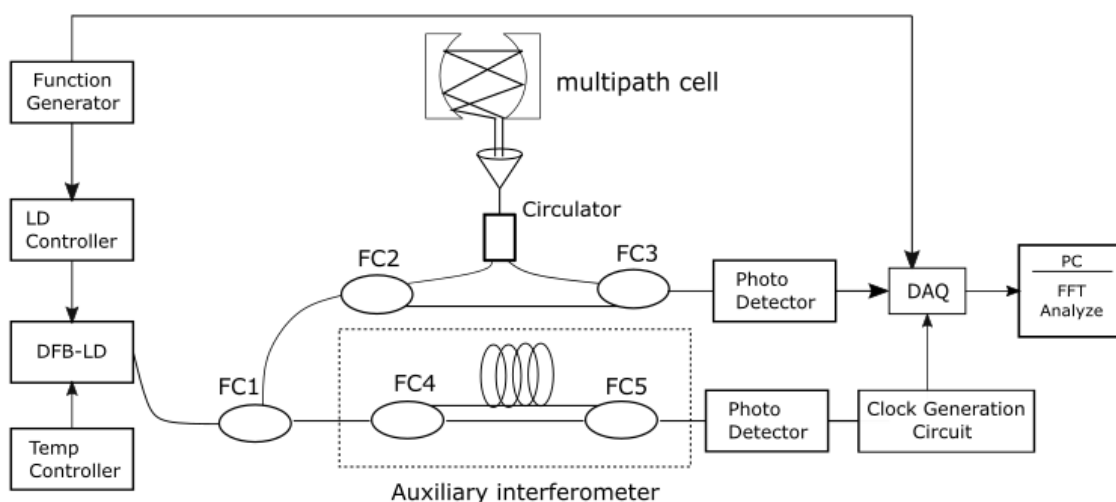


図 14 実験構成図

3.3. 実験結果

図 15 に同期サンプリング法によるマルチパスセル内の反射回数 4 回, 10 回, 14 回で測定したビートスペクトルを示す. この時マルチパスセル内のミラー間距離は 310mm, 210mm, 310mm で, 総光路長は 1.24m, 2.10m, 3.40m である. サンプリングレートは 85kS/s でサンプ

ル数は 1700 サンプルで測定した,また, 測定された各反射回数でのビートスペクトルをもとにマルチパスセル内の光路長を求めた.反射回数から計算して導いた光路長との比較を図 16 に示す.

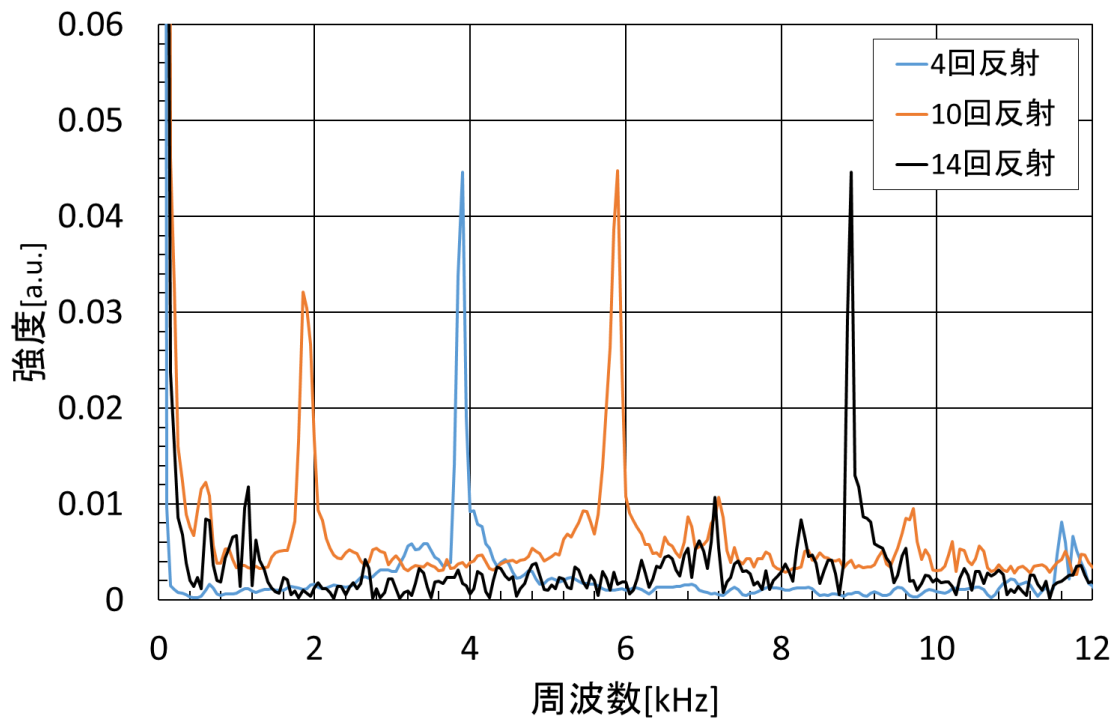


図 15 測定結果

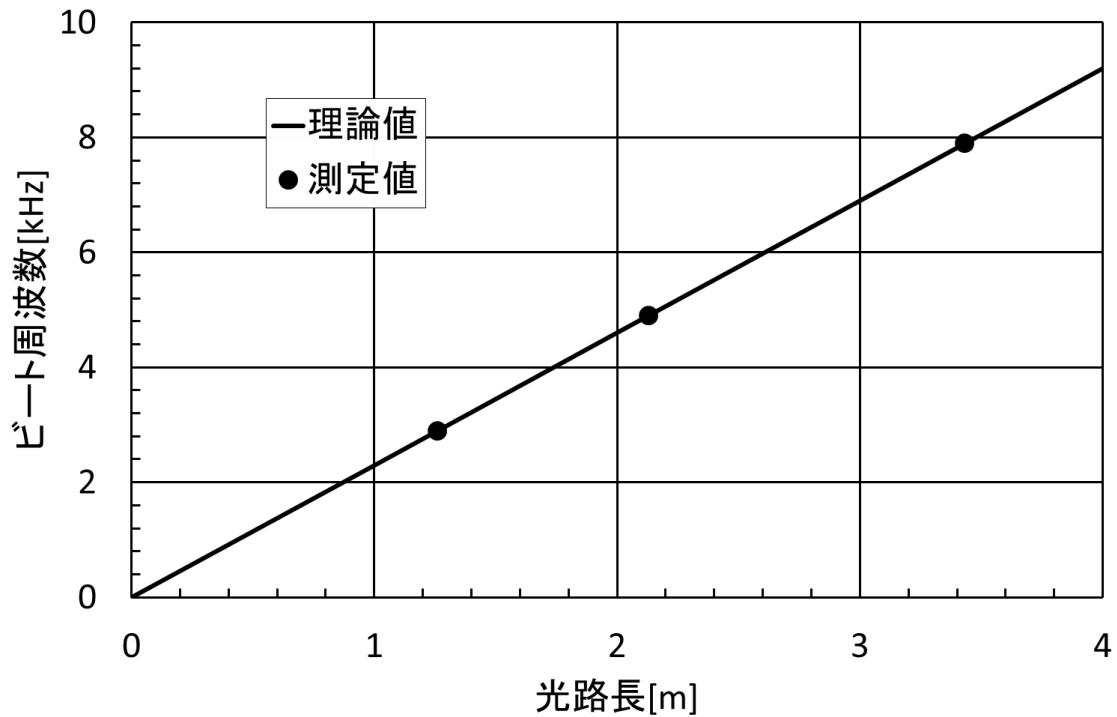


図 16 理論値と測定値の比較

各反射回数において、ビートスペクトルを測定することができた。しかし、10 回反射の時 1.9kHz 付近にスペクトルが見られる。これは反射回数が増えてしまうため、少ない反射回数でレーザー光の一部がロッドミラーに当たり、レンズに戻ってきてしまっている可能性があげられる。

マルチパスセル内の各反射回数から計算した光路長はそれぞれ 1.24m, 2.10m, 3.40m,

ビート周波数から導出した光路長はそれぞれ 1.26m, 2.13m, 3.43m となり誤差は最大で

0.03m 以内となり、距離測定の結果としては十分な精度が得られた。

4.ビートスペクトルの平均化

ビートスペクトルの測定時,ピークの位置が時間によって 100Hz 程度変動していることが分かった. 図 17 にピーク位置の時間による変動の一例を示す.

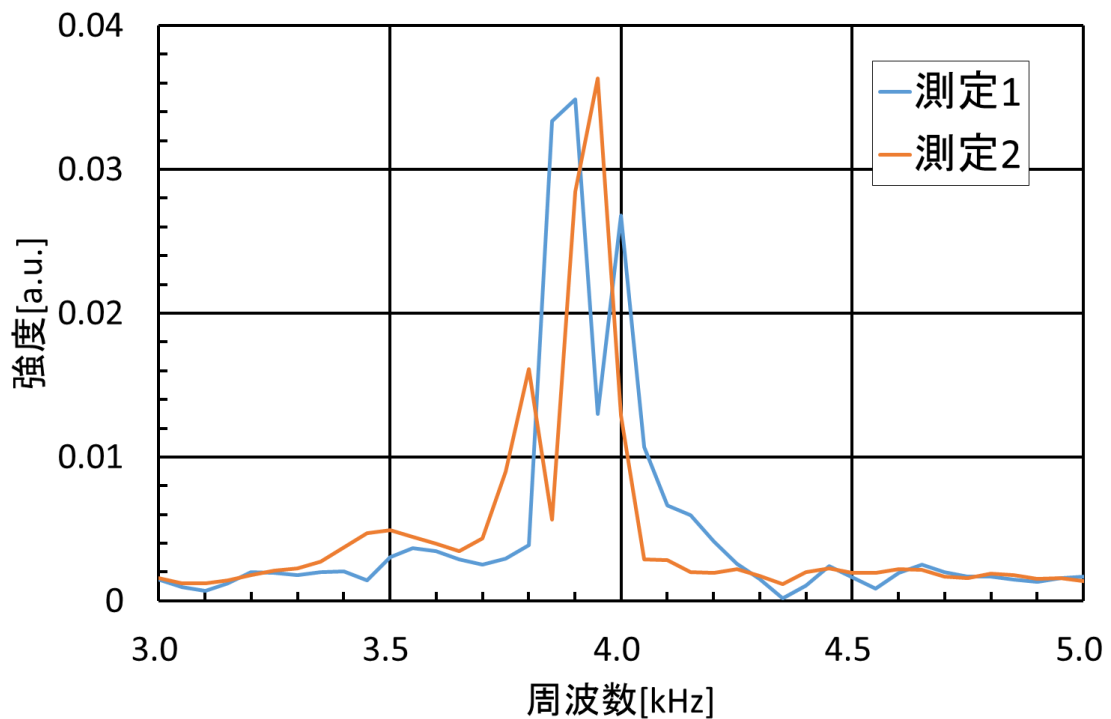


図 17 ピーク位置の時間による変動

原因として,半導体レーザーは温度制御を行っており,温度によってレーザーの波長は変化する.波長が変わると周波数掃引幅も変化しビートが変化してしまうためと考えられる.

図 18 に DFB レーザーの温度と波長の特性のグラフを示す.

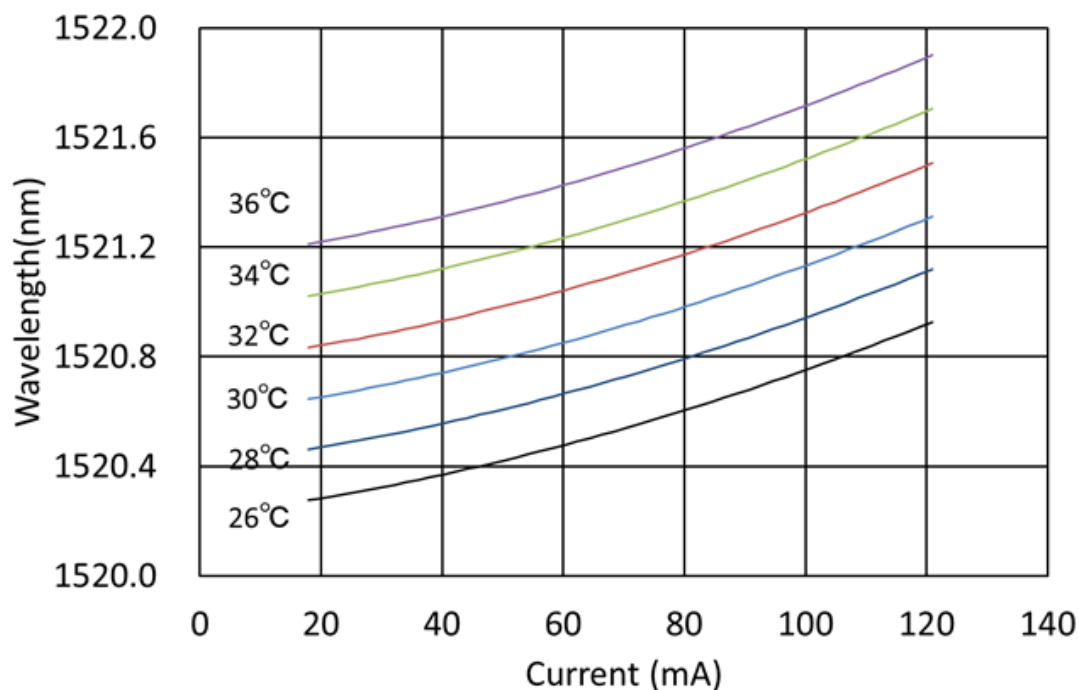


図 18 DFB レーザーの温度と波長の特性

ここで、ビートスペクトルの平均化を行うことで設定値の温度で得られる波長で測定できるピーク位置の特定ができると考えた。今回は平均化する際に RMS(二乗平均平方根)平均を用いた。RMS 平均は計算が積和演算であるため高速演算が可能である。

ある量 x に対して N 個のデータが得られたとして、各データの x の値を $x_i(i=1, 2, \dots, N)$ と名付

けると x の $RMS[x]$ は

$$RMS[x] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)^2} \quad (4.1)$$

のように定義される。

1 周期分のビートスペクトルの 100 回分の平均を行った。平均化の前後でのビートスペク

トル比較を図 19 に示す.

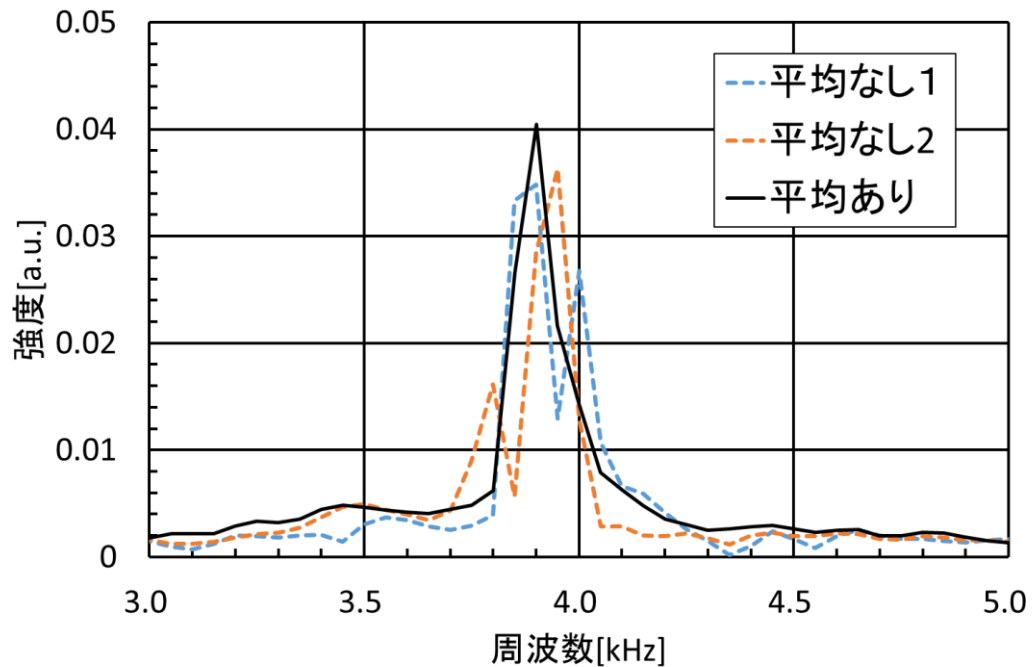


図 19 平均化の前後でのビートスペクトル

平均化を行う前と後のビートスペクトルを見ると平均化前のビートスペクトルのピーク
の中心に平均化後のビートスペクトルのピークが測定することができた.この結果より, 設
定値の温度で得られる波長と同等の測定値が得られ,ピーク位置の特定を行うことができた.

第 5 章 まとめ

1.まとめ及び考察

本研究では半導体レーザーを用いてマルチパスセル内の光路長測定を行うシステムの構
築を目的として実験を進めてきた. ファイバーによる光路差のビート周波数測定を行いビ
ート周波数と光路差は比例の関係にあり, 強度の変化は測定に影響しないことが分かった.

また、光路差に伴いスペクトル線幅も大きくなり空間分解能が低下することも分かった。この実験をもとに同期サンプリング法を用いてマルチパスセル内の光路長の測定を行った。マルチパスセル内の光路長を測定し、ビートスペクトルの確認を行うとともに、各反射回数から計算した光路長と、ビート周波数から導出した光路長の誤差は 0.03m 以内となり、距離測定の結果としては十分な精度が得られた。そして、時間によるビートスペクトルのピーク位置の変化をビートスペクトルの平均化を行うことにより、ピーク位置の特定を行うことができた。

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。

参考文献

- [1]: 黒澤宏.“入門まるわかり非線形光学”. オプトロニクス社. 2008.
- [2]: 谷川千絵, 半導体レーザーの第二高調波光による波長変調分光測定における残余強度変調に関する研究, 富山高等専門学校制御情報システム工学専攻, 2016 年
- [3]: 和達三樹.”高専の物理[第5版]”. 森北出版株式会社. 2000.
- [4]: ファイバーラボ株式会社, 半導体レーザ(LD)とは,
<https://www.fiberlabs.co.jp/about-ld/>

[5]: 栖原敏明. “半導体レーザーの基礎”. 共立出版株式会社. 1998.

[6]: ソーラボジャパン総合カタログ. Vol.21

[7]: 吉澤徹・瀬田勝男, 1994年, 光ヘテロダイナミクス, (株)新技術コミュニケーションズ, 全
208 ページ

[8]: 新川電機株式会社, 同期サンプリングとは,

http://www.shinkawa.co.jp/times/sst_column_table/vol006_no03_col03.html