

富山高等専門学校 専攻科
令和2年度

特別研究報告



研究題目 2つのレーザーによる
コヒーレントビーム結合の検討と周波数安定化

指導教員 由井四海

提出者 制御情報システム工学専攻

小西朋春

令和2年2月29日 提出

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 目的	2
第 2 章 1 台の分布帰還形半導体レーザーを用いたコヒーレントビーム結合の実験 ...	3
2.1 理論	3
2.1.1 光の干渉	3
2.1.2 ビームスプリッター	7
2.1.3 Mach-Zehnder 干渉計	9
2.1.3.1 Mach-Zehnder 干渉計を用いたビーム結合実験の実験構成.....	11
2.1.3.2 Mach-Zehnder 干渉計を用いたビーム結合実験の実験結果.....	14
2.2 実験構成	17
2.3 結果・考察	19
第 3 章 2 つの独立したレーザーを用いた干渉実験.....	20
3.1 理論	20

3.1.1 レーザー光のスペクトル線幅測定実験の実験構成	23
3.1.2 レーザー光のスペクトル線幅測定実験の実験結果	25
3.2 実験内容	26
3.2.1 ビート信号の測定実験.....	26
3.2.2 共振器の縦モードの測定実験.....	27
3.3 実験結果	28
第4章 レーザー光の周波数安定化の実験.....	31
4.1 理論	31
4.2 実験内容	33
4.3 実験結果	40
第5章 まとめ	42
謝辞	42
参考文献.....	43

第1章 序論

1.1 研究背景

現在様々な場面でレーザー光が使用されており、自然光にはない高い可干渉性はその特徴の一つになっている。可干渉性の高い、高精度なレーザーは、同位体の生成[1]などの、レーザーを使用した化学反応の分野で使用される。しかし、一般にこれらのレーザーは出力が低く、高効率な化学反応を実現させるためにレーザーの高出力化が求められている。レーザー光の可干渉性を保持したまま出力強度を大きくする技術はコヒーレントビーム結合、加算 (Coherent Beam Combining : CBC)と呼ばれている。一般的な CBC の具体例[2]を Fig.1 に示す。Fig.1 に示した CBC の例は、主発振器(Master Oscillator: MO)を分岐し、それぞれの光を光増幅器によって増幅(Master Oscillator Power Amplifier : MOPA)したのち、光の位相を揃えて1つのビームに合波することで、レーザー光を高出力化する方法である。CBC では、特注の MOPA を使用するなど、レーザー内部に手を加える場合もあり、レーザー技術者以外のユーザーが容易に利用できるものとは言えない。したがって、入手性や保守性を考えると、市販されている光源を組み合わせることの必要性が考えられる。

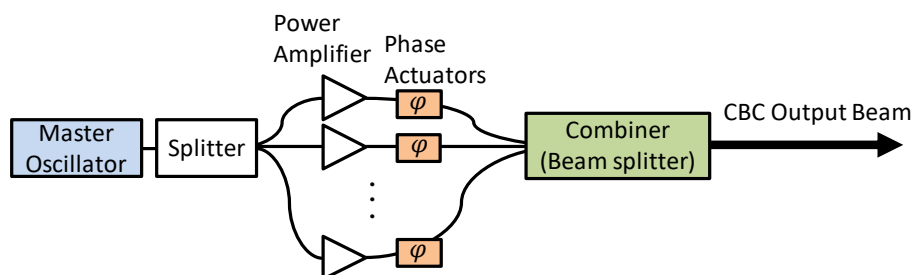


Figure 1 Example of coherent beam combining

1.2 目的

本研究で検討する、市販の光源を組み合わせた CBC のシステムの構成を Fig.2 に示す。

本研究では、レーザー装置内部に手を加えることなく、入手性の高いレーザー光源を複数組み合わせることで、ビーム結合をさせることを目的に、Fig.2 のように独立したレーザーからの出力光をコヒーレントビーム結合するための、周波数条件について検討する。特に、本研究では、2 台の独立したレーザーからの出力光のコヒーレントビーム結合について検討する。

周波数条件の検討結果より、2 つのレーザーがビーム結合するためには、2 つのレーザー光の周波数が、互いのスペクトル線幅内であることが必要だと分かった。本研究で使用したレーザー光の周波数は、時間変動によって周波数条件を常に満たさない。したがって、2 台のレーザーをビーム結合するための周波数条件を満たすことを目的として、レーザー光の周波数を安定化するシステムの構築を試みる。

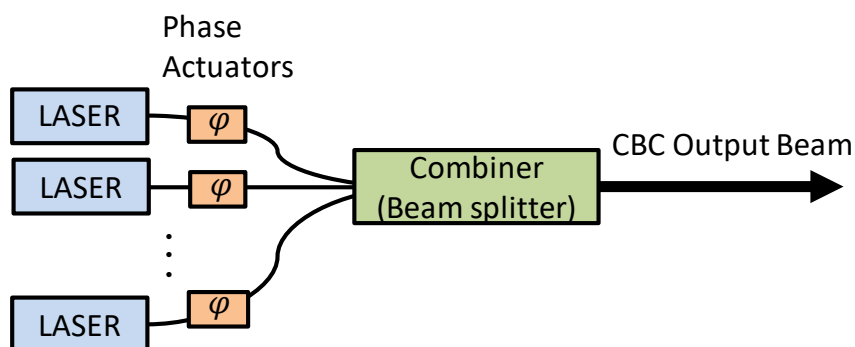


Figure 2 Configuration of coherent beam combining using independent lasers

第 2 章 1 台の分布帰還形半導体レーザーを用いたコヒーレントビーム結合の実験

2.1 理論

2.1.1 光の干渉

まず、光の電界を

$$E = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

とすると、その光強度は、

$$I = c\epsilon_0 \langle E^2 \rangle = \frac{c\epsilon_0}{2} A^2 \quad (2)$$

となる[3]。ここで、 c は光速、 ϵ_0 は真空中の誘電率であり、 $\langle \rangle$ は時間平均を表す。

2つの光が同じ光路内にあるとき、2つの光波は、重ね合わさり、光波の位相や周波数の差によって、互いに強め合ったり弱めあったりする、これを「干渉」とよぶ。干渉する2つの光の電界 E_1, E_2 を、それぞれ

$$E_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (3)$$

$$E_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (4)$$

とすると、光検出器で検出される干渉後の光強度 I_0 は、

$$I_0 = c\epsilon_0 \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle \quad (5)$$

となり、三角関数の和積の公式より、

$$\begin{aligned}
I_0 = & c\epsilon_0 \langle A_1^2 \cos^2(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \varphi_2) \\
& + 2A_1 A_2 \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)\} \\
& + 2A_1 A_2 \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)\} \rangle \quad (6)
\end{aligned}$$

となる。

ここで、フォトダイオード(Photo Diode: PD)で干渉する光の強度を検出する場合について考える。PDからは、干渉する電界の実効値(光強度)に比例した電流が出力される。したがって、PDでは、電界が時間平均されることがわかる。PDによる平均時間を T とすると、

(6)式における $\cos^2(\omega_n t + \varphi_n)$ ($n = 1, 2$)の時間平均は、

$$\begin{aligned}
\langle \cos^2(\omega_n t + \varphi_n) \rangle &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \cos^2(\omega_n t' + \varphi_n) dt' \\
&= \frac{1}{2} - \frac{1}{4\omega_n T} [\sin\{2\omega_n(t+T) + \varphi_n\} - \sin 2(\omega_n t + \varphi_n)] \quad (7)
\end{aligned}$$

となる。PDにおいては、 $\omega_n T \gg 1$ が成り立つため、

$$\langle \cos^2(\omega_n t + \varphi_n) \rangle = \frac{1}{2} \quad (8)$$

となる。また、 $\cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)\}$ の時間平均は、

$$\begin{aligned}
& \langle \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)\} \rangle \\
&= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t' + (\varphi_1 + \varphi_2)\} dt' \\
&= \frac{1}{T(\omega_1 + \omega_2)} [\sin\{(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)\} \\
&\quad - \sin\{(\omega_1 + \omega_2)(t+T) + (\varphi_1 + \varphi_2)\}] \quad (9)
\end{aligned}$$

となる。ここでも $\omega_n T \gg 1$ が成り立つため、

$$\langle \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)\} \rangle = 0 \quad (10)$$

となる。干渉する光の周波数差 $\omega_1 - \omega_2$ が PD の応答周波数帯域より十分に大きい時、

$\cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)\}$ は、(10)式と同様に平均化され、干渉後の光の強度は、

$$I_0 = \frac{c\varepsilon_0}{2}(A_1^2 + A_2^2) \quad (11)$$

となる。干渉する光の周波数差 $\omega_1 - \omega_2$ が PD の応答周波数帯域より十分に小さい時、干渉

後の光の強度は、

$$I_0 = \frac{c\varepsilon_0}{2}[A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)\}] \quad (12)$$

となる。ここで、干渉する2つの光の強度を I_1, I_2 とすると、

$$I_0 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)\} \quad (13)$$

となる。したがって、2つの周波数が異なる光が干渉するとき、干渉後の光の強度は、干渉

する2つの光の位相差と周波数差に応じて変動する。2つの周波数が異なる光が干渉すると

きの、干渉後の光の強度のシミュレーション結果を Fig.3 に示す。この強度変動信号をビート

ト信号と呼ぶ。ここでは、周波数差が 10Hz で、強度がそれぞれ 5.0W の2つの光同士の干

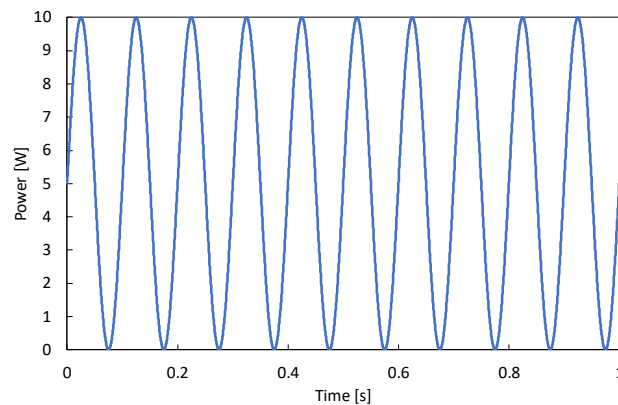


Figure 3 Beat Signal

渉についてシミュレーションを行った。レーザーの光スペクトルを Fig.4 に示す。レーザーの光スペクトル線幅レーザー光の周波数は、単一の周波数だけで構成されるのではなく、Fig.4 のように、光スペクトル線幅が存在し、複数の周波数成分で構成される。一般に、レーザー光の周波数は、光スペクトルのピーク周波数を表し、線幅は、光スペクトルの半値全幅である。2つのレーザー光が干渉するとき、ビート信号のピーク周波数は、レーザー光の光スペクトルのピーク周波数の差となる。

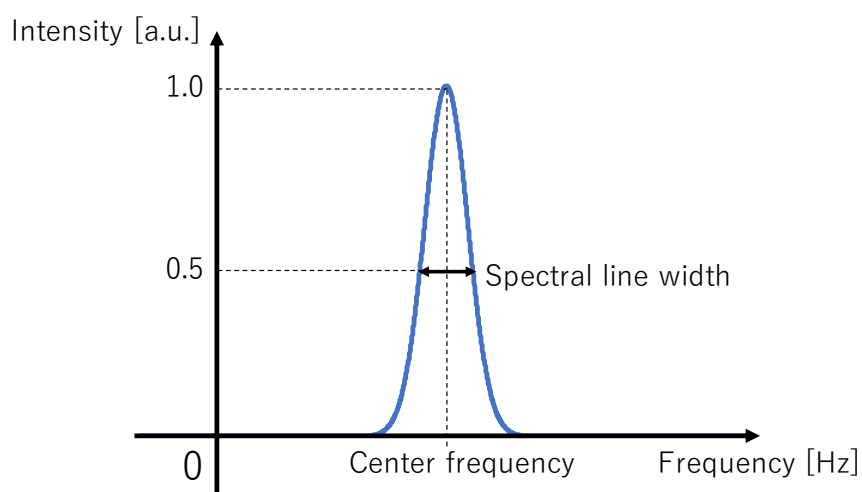


Figure 3 Spectral line-width of the laser light

2.1.2 ビームスプリッター

ビームスプリッター(Beam Splitter: BS)の概要を Fig.5 に示す。BS には、Fig.5 のように 2 つの入力ポート、2 つの出力ポートが存在する。BS は、入射した光を分岐する光学素子である。特に、入射光強度を 50:50 に分ける BS は、ハーフミラーとも呼ばれる。一般に、BS は 1 つの光を特定の強度比で分ける用途で使用するが、本実験では、ビームを結合するために使用した。

光が BS に入射するとき、BS によって分かれる 2 つの光の強度比は、BS が持つ透過率、反射率、吸収率によって決まる。しかし、単一光子について考えるとき、その振る舞いは通常とは異なり、光子の出力が確率によって定まるようになる。単一光子とは、その光子が検出されるとき、同時に他の光子が検出されない時空間に存在する光子である [4]。その例として、Hong-Ou-Mandel 干渉を紹介する。Hong-Ou-Mandel 干渉の概念図を Fig.6 に示す。Hong-Ou-Mandel 干渉は、Hong, Ou, Mandel によって、1973 年に観測された干渉であり、Fig.6 に示したように、2 つの入力ポートに、それぞれ単一光子が 1 つずつ入射されたとき、

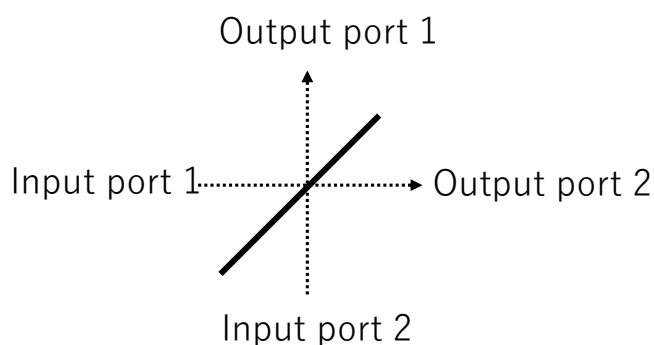


Figure 4 Beam splitter

必ず1つの出力ポートから2つの光子が出力される現象である[5]。ここで、2つの入射ポートに、単一光子を同時に入射した時、2つのそれぞれの出力ポートから、単一光子が出力(両方の単一光子が反射、もしくは透過)されないのは、2光子間の量子干渉に基づく現象である[6]。

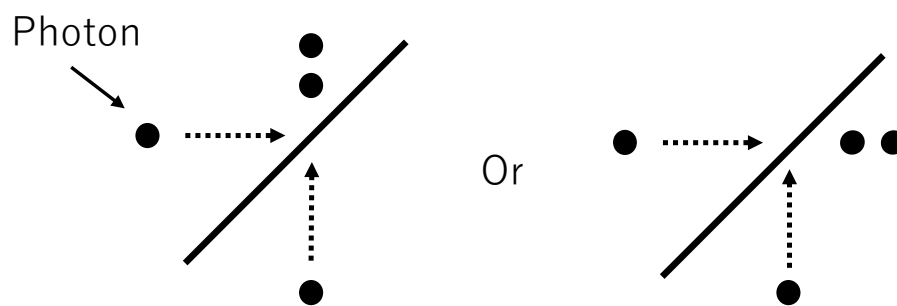


Figure 5 Hong-Ou-Mandel interference

2.1.3 Mach-Zehnder 干渉計

Mach-Zehnder 干渉計は、2つのBSと2つのミラーによって構成される干渉計である。

Mach-Zehnder 干渉計を Fig.7 に示す。Mach-Zehnder 干渉計は、光をBS1で分け、BS2で2つの光をそれぞれ再び分岐する。BSで分岐されたそれぞれの光が干渉する。

Mach-Zehnder 干渉計に1つの単一光子を入射することについて考える。入射された光子が干渉計のそれぞれの出力ポートから出力される確率 p_{out1}, p_{out2} は、

$$p_{out1} = \frac{1}{2}(1 + \cos \varphi) \quad (14)$$

$$p_{out2} = \frac{1}{2}(1 - \cos \varphi) \quad (15)$$

となる[6]。ここで、 φ は干渉計内の光路差による光の位相差である。

一般的に、CBCにおいてビームを結合するためには、BSが用いられる。分岐比50:50のBSの2つの入力ポートに、(3)式、(4)式の電界 E_1, E_2 をそれぞれ入射する。ここで、1つの出力ポートについて考える。出力ポートからは、BSによって分岐された電界

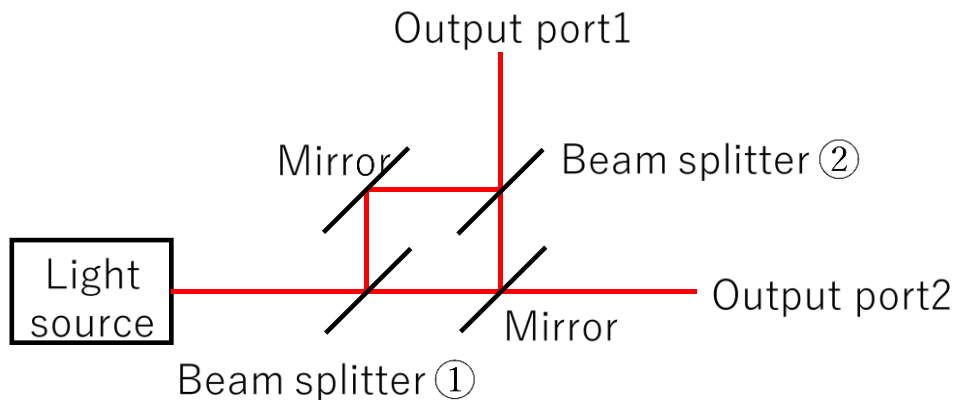


Figure 7 Mach-Zehnder interferometer

$$E_1' = \frac{A_1}{2} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (16)$$

$$E_2' = \frac{A_2}{2} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (17)$$

が出力される。ここで、 E_1', E_2' が干渉することで、(12)式、(13)式から求めた干渉後の信号

I_0 は、

$$I_0 = \frac{1}{2} [I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)\}] \quad (18)$$

となる。

本研究では、Mach-Zehnder 干渉計を利用してビームを結合した。Mach-Zehnder 干渉計

によって、ビームが結合されることを確認するために、2.1.3.1 の実験を行った。

2.1.3.1 Mach-Zehnder 干渉計を用いたビーム結合実験の実験構成

実験構成図を Fig.8 に示す。干渉計は、ファイバーカプラー(Fiber Coupler : FC)と BS、3 枚のミラーで構成される。光源には、波長 152nm 帯の分布帰還形 (Distributed Feedback : DFB) レーザー (NTT エレクトロニクス, NLK1S5GAAA) が用いられている。レーザー (Laser Diode: LD)の温度と電流は、温度コントローラと電流コントローラによって、それぞれ 22.1°C, 18mA に安定化されている。このとき、FC によって分けられるレーザー光強度は、それぞれ 0.85, 0.62mW である。干渉計を構成する 3 枚のミラーのうち 1 枚には、駆動電圧 0~150V、最大変位 $10\mu\text{m}$ の piezo 素子(Thorlabs, PAC166J)が取り付けられ (Piezo Mirror : PM)、コリメートレンズから BS の入力ポートまでの光路長を制御することができる。この時、PM は、レーザー光を垂直に反射するように設置する必要がある。PM におけるレーザー光の反射角が 45° のときの結合するビームの様子を Fig.9 に示す。反射角が 45° となるように PM を配置すると、Fig.9 のように、piezo 素子で光路長を変化させたとき、結合する 2 つのビームの中心がずれ、干渉しない領域が発生するためである。干渉しな

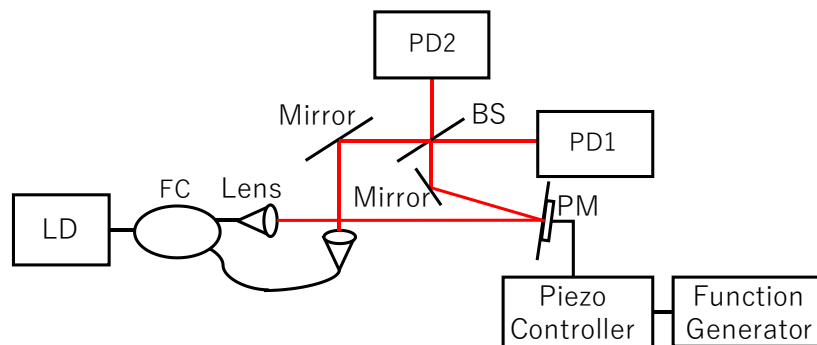


Figure 8 Configuration of constructed system

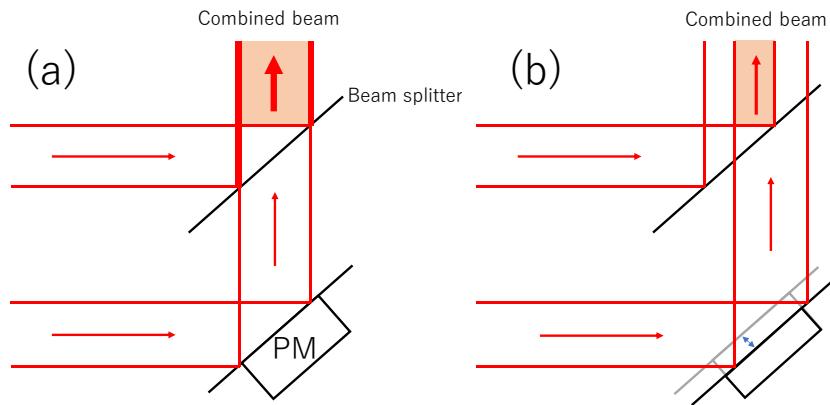


Figure 9 Decreasing the power of the combined beam

(a) Entire beams are combined. (b) Changing a displacement results in a part of beams are not combined.

い領域が発生したとき、ビート信号の振幅は小さくなる。しかし、PM 反射後の光を BS に入射するためには、ミラーで再び反射させる必要があることから、反射角が 0° になるように PM を設置することは困難である。本実験では、PM における光の反射角を 1.5° となるように PM を設置した。ピエゾ素子の長さの変化を Δl とすると、干渉計内の光路長の変化 ΔL は、

$$\Delta L = 2\Delta l \cos \theta \quad (19)$$

となる。ここで、 θ は PM における光の反射角である。したがって、ピエゾ素子の長さの変化による干渉計内の 2 つの光の位相差 φ は、

$$\varphi = \frac{4\pi\Delta l \cos \theta}{\lambda} \quad (20)$$

となる。ピエゾ素子には、100Hz、141V_{p-p} のランプ状の駆動電圧が印加される。このとき、

干渉計の 2 つの光路の光路差は 0-17.5 μm 、位相差 φ は 0-23 π で変化する。

本実験において、干渉計によって干渉する2つのレーザー光の周波数は等しいため、(18)

式における干渉後の光強度は、

$$I_0 = \frac{1}{2} \{I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)\} \quad (21)$$

となる。ここで、PDからは、検出する光の強度に比例した電圧が出力されることから、

$$V_0 = \frac{1}{2} \{V_1 + V_2 + 2\sqrt{V_1 V_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)\} \quad (22)$$

とも表せる。ここで、強度 I_n の光をPDで検出したときのPDの出力電圧を V_n とした($n =$

$0, 1, 2$)。 (22)式において、 $\varphi_1 - \varphi_2$ は、(20)式に相当することから、干渉計の1つの出力ポ

ートから出力されるレーザー光のPDでの検出電圧 V_0 は、

$$V_0 = \frac{1}{2} \left\{ V_1 + V_2 + 2\sqrt{V_1 V_2} \cos\left(\frac{4\pi\Delta l \cos\theta}{\lambda}\right) \right\} \quad (23)$$

となる。

2.1.3.2 Mach-Zehnder 干渉計を用いたビーム結合実験の実験結果

ピエゾ素子による光路長と PD の検出電圧の変化を Fig.10 に示す。ピエゾ素子の駆動電圧が変化し、ピエゾ素子の体積が変化することで、干渉する 2 つの光の光路差が変化する。光路差は、干渉する 2 つのレーザー光の位相差に相当し、位相差が変化したことで、PD1 の検出信号の強度が時間変化していることがわかる。Fig.11 に PD1, PD2 の検出信号を示す。Fig.11 より、PD1 と PD2 の検出信号は逆相であることがわかる。次に、2 つのレーザ

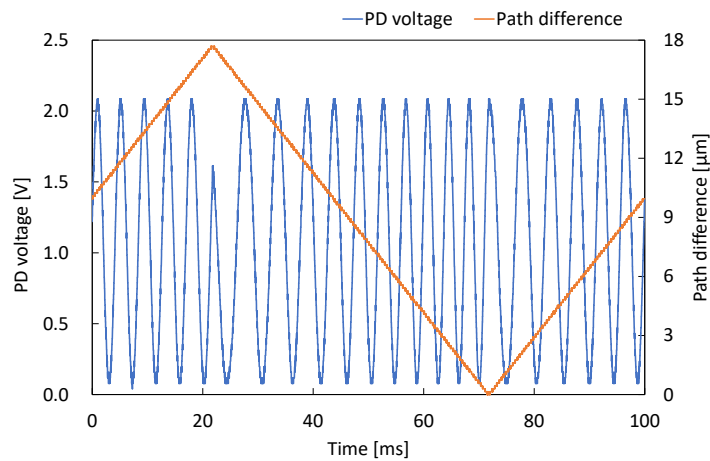


Figure 10 Photo diode voltage and path displacement of a piezo actuator

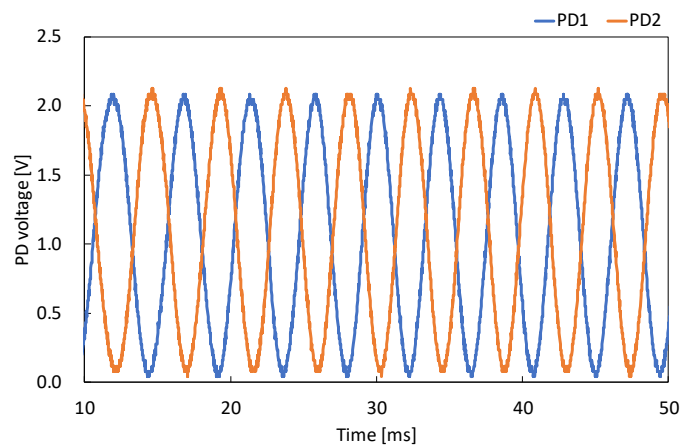


Figure 11 Photo diode 1 and photo diode 2 voltage

一光の光路差が変化したときの PD1 電圧の変化と、理論値を Fig.12 に示す。(20)式より、

ピエゾの変位 Δl は、

$$\Delta l = \frac{\lambda\varphi}{4\pi \cos \theta} \quad (24)$$

となる。最小二乗法によってピエゾ素子の最大変位を求めた結果、 $17.0 \mu\text{m}$ となった。ピエゾ

素子の駆動電圧に対する変位のヒステリシスを Fig.13 に示す。ピエゾ素子は、Fig.13 の

ように駆動電圧に対する変位にヒステリシスを持つ。

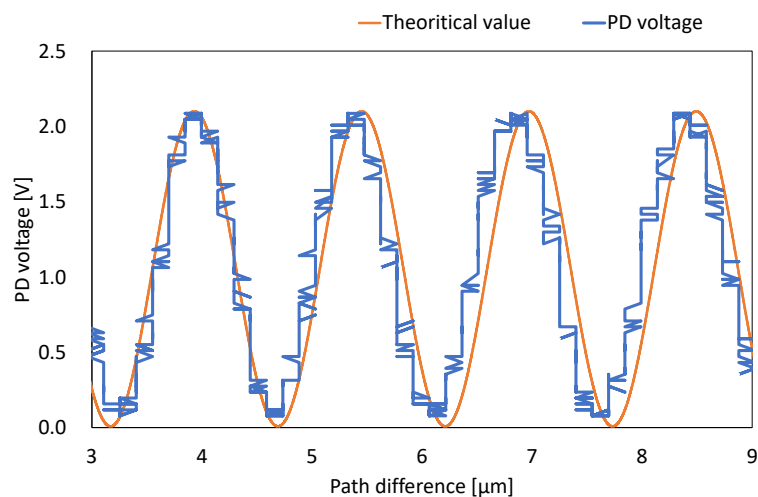


Figure 12 Photo diode voltage and theoretical value

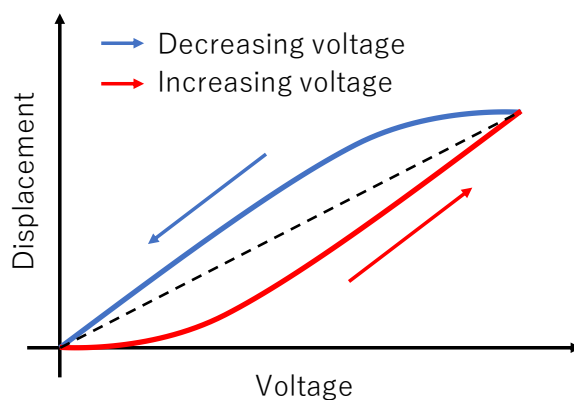


Figure 13 Hysteresis of piezo actuator

このヒステリシスを補償するため、 piezo素子が駆動電圧に対して線形に変化すると考えられる範囲の駆動電圧において、最小二乗法を用いた。

PMによって、干渉計内の2つ光路差を変化させることで、干渉する2つの光の位相が制御でき、(20)式より、2つの光の位相差 φ を、

$$\varphi = \frac{4\pi\Delta l \cos \theta}{\lambda} = n\pi \quad (25)$$

に安定化することで、2つの入力の和を1つのポートから出力できる。この結果、ビームが結合されることとなる。

2.2 実験構成

実験構成図を Fig.14 に示す。本実験では、Mach-Zehnder 干渉計によってビームを結合する。干渉計は、Fig.7 のものと同様のものを使用した(ピエゾ素子は、thorlabs, PA44LEW、駆動電圧 0~150V、最大変位 $2.6\mu\text{m}$ を使用)。光源には、波長 1520nm 帯の DFB レーザー (NTT エレクトロニクス, NLK1S5GAAA) が用いられている。LD の温度と電流は、温度コントローラと電流コントローラによって、それぞれ 28.5°C , 25mA に安定化されている。位相制御を開始し、PD2 で検出された信号は、AD 変換され、PC に取り込まれる。位相制御のフローチャートを Fig.15 に示す。位相制御では、結合する 2 つの光の位相を合わせるため、PD1 の信号強度を最小にするピエゾ素子の駆動電圧を出力する。位相制御は、25Hz で行われ、ピエゾ素子の制御電圧の分解能は 1.5V である。このとき変化する 2 つの光の位相差は、(20)式より、約 12° である。Fig.16 に位相差と結合後の光強度の関係を示す。位相差が 12° 変化した時の結合後の光強度は、位相差が 0° のときと比べて、99.4%であるこ

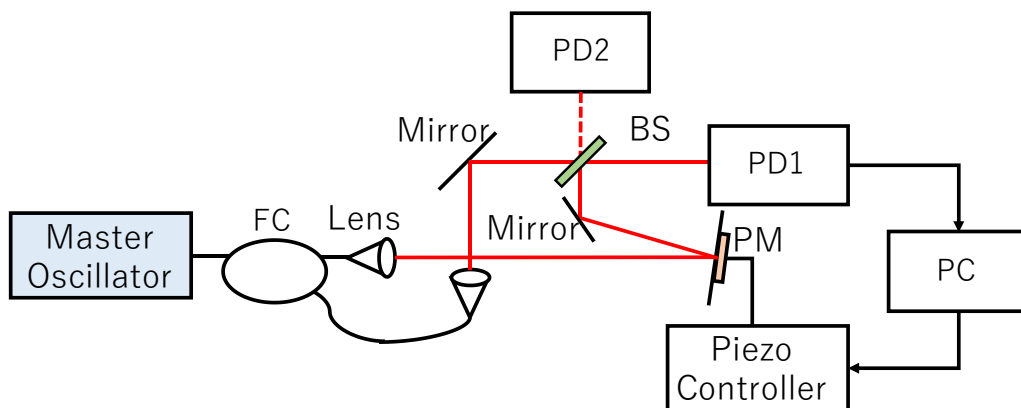


Figure 14 Configuration of constructed system

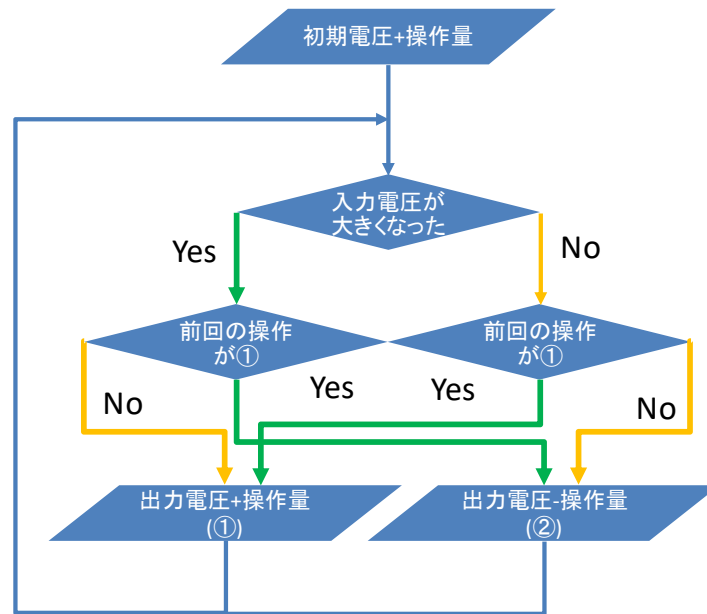


Figure 15 Flowchart of phase control

とから、予想される結合後の光強度の変動は 0.6% であると考えられる。

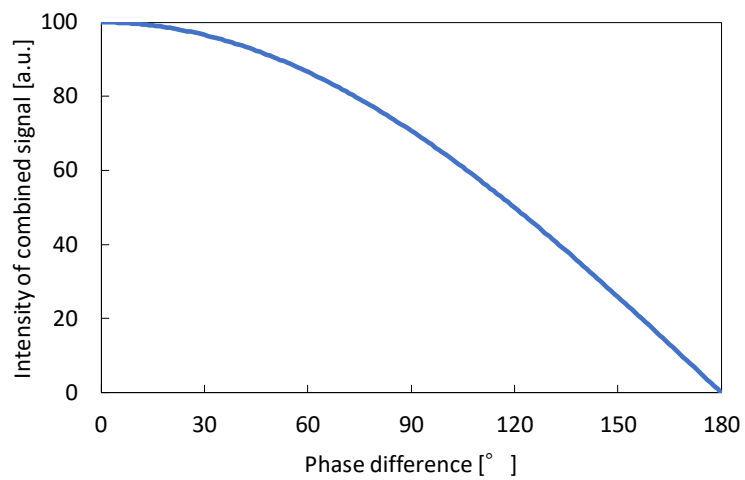


Figure 16 Change in an intensity of combined signal from phase difference between two beams

2.3 結果・考察

位相制御前後の PD 電圧の時間変化を Fig.17 に示す。PD 電圧測定開始後 75 秒において位相制御が開始された。位相制御開始後、 piezo 素子の駆動電圧が変化しており、PD1, PD2 の電圧が安定化されたことから、位相が制御できたことがわかる。また、PD2 で検出した信号強度が、 $1.643 \pm 0.003V$ となった。ここで、測定のばらつきを位相制御開始後、PD 電圧が安定してから約 2000 データの標準偏差(2σ)とした。理想的には、PD1 の電圧は 0V で安定するが、本実験では約 0.2V で安定している。これは、結合する 2 つのビームの光軸のずれ、ビーム径の大きさの差によって、レーザー光の 1 部が干渉しなかったためであると考えられる。ここでは、PD2 の検出電圧が最大となることを、2 つのレーザー光の位相差が 0° の状態とする。位相制御開始後の PD2 の最大電圧は 1.652V であり、最大電圧に対する平均電圧の割合は約 99.5% であり、2.2 で示した理論値と 0.1% の差があった。これは、PM によってビームの光軸がずれたためであると考えられる。

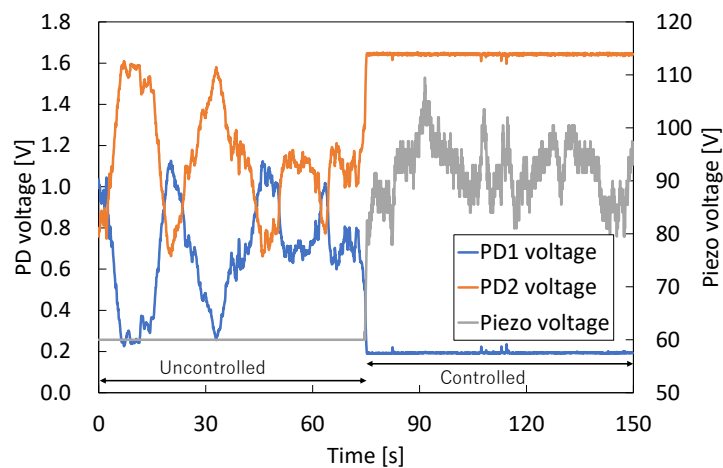


Figure 17 Photo diode voltage before and after phase control

第3章 2つの独立したレーザーを用いた干渉実験

3.1 理論

1950年代、物理学者の P.A.M Dirac は、光子の干渉は、光子自身のみで起こるもので、2つの独立した光子間の干渉は起こらないと述べた[7]が、Magyar らによって、独立したレーザー光間の干渉によって生じる干渉縞を観測された[8]。ここで、独立した2つの光子は、互いにコヒーレント状態であり、互いの偏光状態が直交していない光子をいう。2.1.3より、BSによってビームが結合されることを確認し、結合されるビームの強度は、(23)式と一致したため、独立したレーザー光の干渉から、独立したレーザー光の結合の可能性が期待される。

本実験では、まず独立した2つのレーザー光が干渉することを確認する。2つのレーザー光が干渉するとき、ビート信号は、(13)式より、

$$I_0 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)\} \quad (13)$$

である。したがって、ビート信号には、干渉する2つのレーザー光の周波数差に応じた信号に加え、2つのレーザー光の位相差に応じた信号も含まれることがわかる。Fig.18にビーム結合のための周波数条件を示す。2つのレーザー光の周波数が Fig.18のように、互いのスペクトル線幅内にある時、スペクトルの重なりにおいて周波数が一致し、ビームが結合すると考えられる。ここで、結合する2つのレーザー光の位相差によって、光は互いに強め合ったり弱めあったりする。周波数条件が満たされたときと満たされていないときのビート信

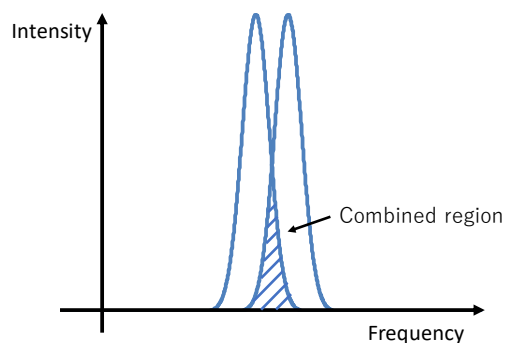


Figure 18 Frequency condition for beam combining

号をそれぞれ Fig.19 に示す。周波数条件が満たされた状態においては、レーザー光の位相差によって生じるビート信号は、Fig.19 のようになると考えられる(ここでは、ビート周波数 100Hz、位相変動 10Hz のビート信号について述べる)。Fig.19 に示すビート信号の移動平均を Fig.20 に示す。レーザー光の位相変動の周波数は、2 つのレーザー光の周波数差に比べて低いとすると、ローパスフィルタ(本研究では、ビート信号の移動平均)によってレーザー光の周波数差に応じた信号を遮断したとき、ビート信号は、Fig.20 のようになる。Fig.20

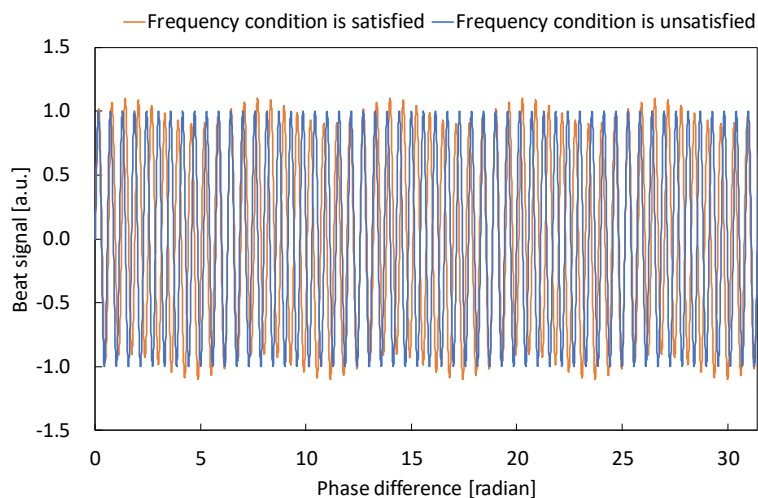


Figure 19 Beat signal

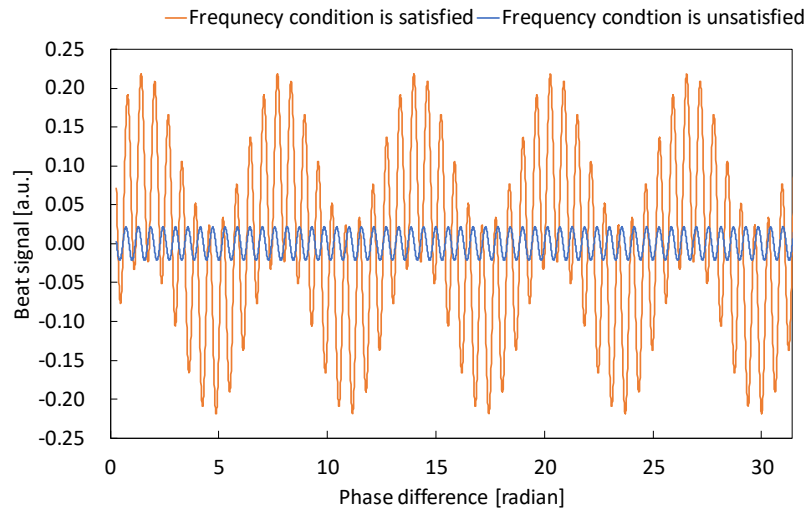


Figure 20 Moving average of beat signal

より、周波数条件が満たされていないときは、レーザー光の位相差に関係なくローパスフィルターによってビート信号は遮断されるが、周波数条件が満たされると、ビームが結合することによって、2つのレーザー光の位相差に応じた信号が抽出されることがわかる。

3.1.1 レーザー光のスペクトル線幅測定実験の実験構成

ここでは、レーザー光のスペクトル線幅を測定する実験を行った。実験構成図を Fig.21 に示す。レーザー光を、Fabry-Perot 型光レーザースペクトルアナライザ(Laser Spectrum Analyzer:LSA)に入射する。本実験で使用した LSA には、Finesse 300, FSR 8GHz の Fabry-Perot 型共振器が用いられており、光共振器の干渉縞(縦モード)の線幅は、約 26MHz である。本研究で用いた Fabry-Perot 型共振器の縦モードを、Fig.22 に示す。ここで、LSA で測定されるレーザーの光スペクトルのシミュレーション結果を Fig.23 に示す。Fig.23 より、レーザー光のスペクトル線幅に応じて、測定される縦モードの線幅も大きくなることわかる。本実験では、レーザーが共振器を透過した時に測定される縦モードの線幅を測定し、Fig.23 より、レーザーの光スペクトル線幅を求める。



Figure 21 Configuration of constructed system

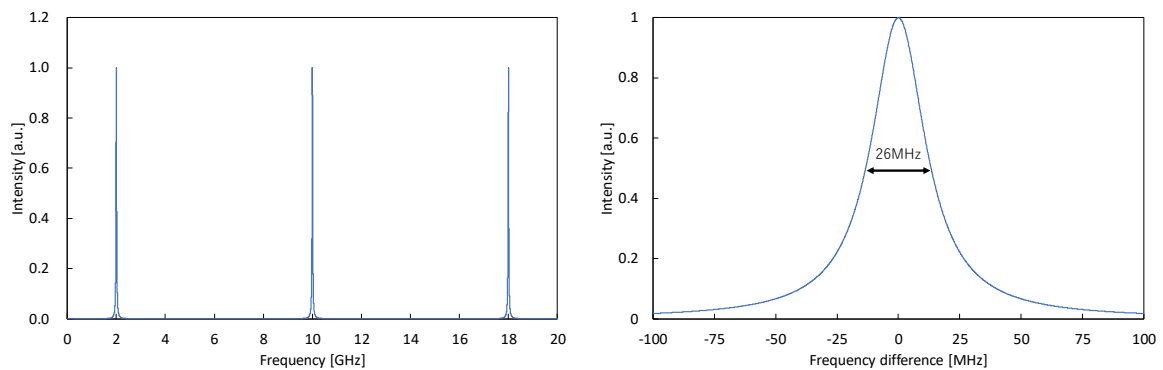
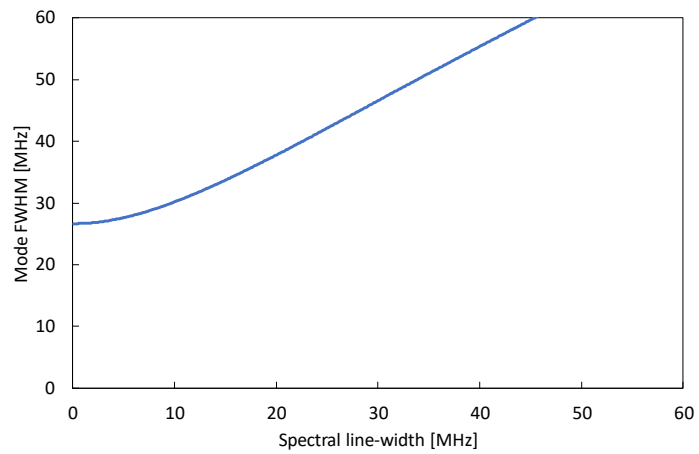


Figure 22 Interference fringes of cavity



**Figure 23 Relationship of laser spectral line-width and full width half maximum of mode
measured by laser spectrum analyzer**

3.1.2 レーザー光のスペクトル線幅測定実験の実験結果

LSA で測定された干渉縞を Fig.24 に示す。Fig.24 より、LSA によって測定される縦モードの線幅は、約 39MHz となった。LSA で測定されるレーザーの光スペクトル線幅が約 39MHz のときのレーザーの光スペクトル線幅のシミュレーション結果を Fig.25 に示す。Fig.25 より、縦モードの線幅が約 39MHz のとき、レーザーの光スペクトル線幅は約 21MHz と求められる。

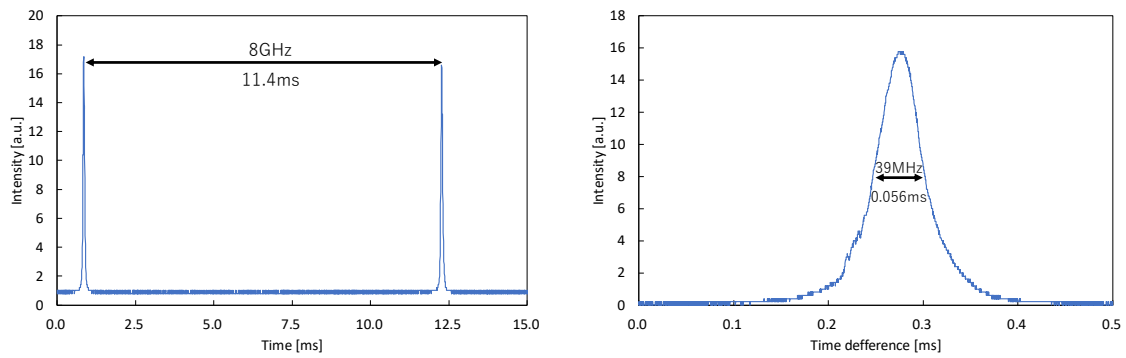


Figure 24 Interference fringes measured by laser spectrum analyzer

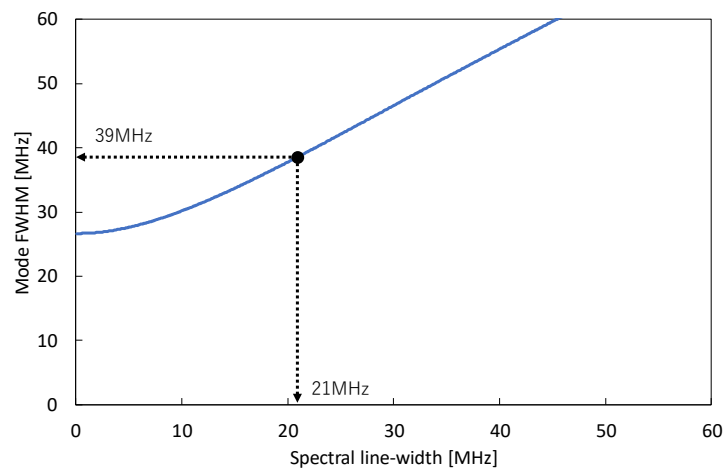


Figure 25 Measured spectral line-width of the laser light

3.2 実験内容

3.2.1 ビート信号の測定実験

Fig.26 に実験構成図を示す。2 台の DFB レーザー(LD: NTT エレクトロニクス, NLK1S5GAAA, 波長 1520nm)を FC によって合波し、PD でビート信号を検出する。このとき、LD2 の光周波数は、三角波の LD2 の駆動電流によって LD1 の光周波数を含む範囲で掃引される。変調信号の三角波は、周波数が 400Hz で、LD2 の電流は 15.0~45.0mA である。LD1 と LD2 の光強度はそれぞれ、53.0mW, 52.6mW である。

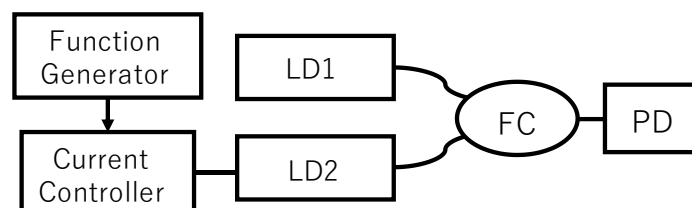


Figure 26 Configuration of constructed system

3.2.2 共振器の縦モードの測定実験

Fig.27 に実験構成図を示す。光源には、ビート信号の測定実験と同様の変調条件で周波数変調した LD2 を用いる。LD2 のレーザー光は、共振器(Finesse 300, FSR 8GHz)を透過し、PD で検出されることで、共振器の縦モードが測定される。

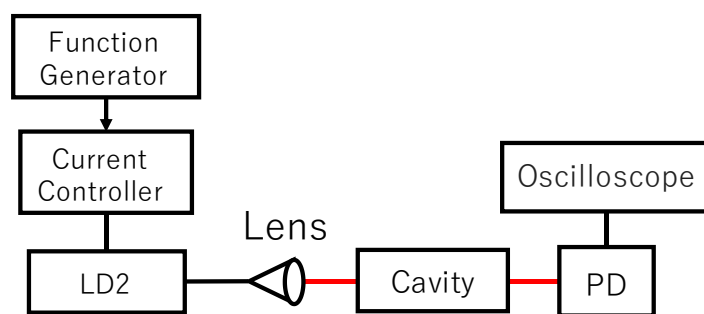


Figure 27 Configuration of constructed system

3.3 実験結果

3.2.1, 3.2.2 の実験をそれぞれ行い、実験結果の比較を行う。PD で検出された干渉信号の例、100ns ごとの干渉信号のピーク周波数、LD2 を共振器に透過させた時の共振器の縦モードを Fig.28 に示す。1ms において、PD の検出信号が大きく変動しており、信号の周波数が小さくなっていることから、2 つのレーザー光同士が干渉し、LD2 の出力光を周波数変動することで、レーザー光の周波数差に応じた干渉信号が検出されたと考えられる。ここで、干渉信号の周波数が大きくなったときに、干渉信号の振幅が小さくなっているが、使用したオシロスコープの検出帯域によって、干渉信号の検出強度が制限されたためであると考えられる。ビート周波数が 1GHz 変化する時間と、LD2 の周波数が 8GHz 変化する時間の比は 7.60 で、2 つの独立したレーザー光が干渉することによって生じる信号であることがわかる。ここで、ビート周波数が 1GHz 変化する時間の理論値と約 $23\mu s$ の差が生じた。これは、共振器の縦モードは、LD2 の周波数にのみ依存するが、ビート周波数は、LD2 の周

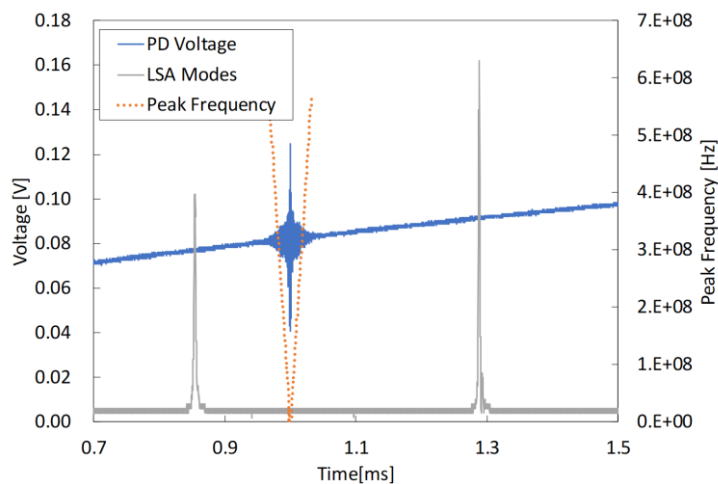


Figure 28 Photo diode voltage and optical resonance modes

波数に加え、LD1 の周波数の時間変動にも依存するためであると考えられる。ビート信号の拡大図、ビート信号の移動平均(遮断周波数約 2MHz)を Fig.29, Fig.30 に示す。本研究では、5GHz の周波数帯域を有する PD の出力電圧を、300MHz の周波数帯域を有するオシロスコープによって、1GS/s でサンプリングする。Fig.29 より、ビート信号の平均値は約 0.2V で安定しているが、ビート周波数が 0 付近で大きく変動している。Fig.30 より、ビート周波

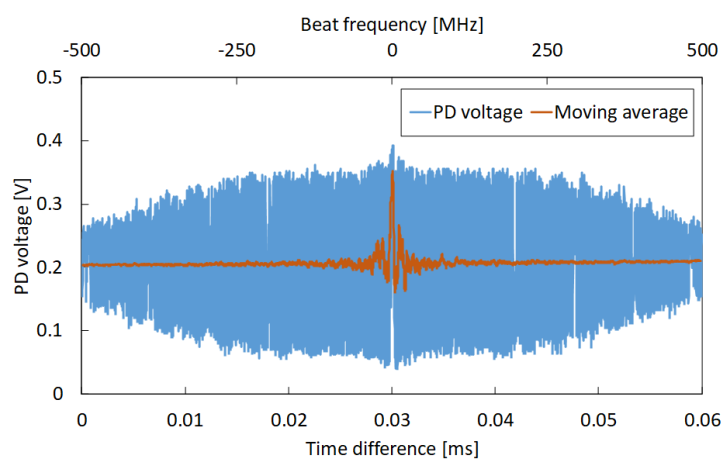


Figure 29 Photo diode voltage and moving average (Time range 0.06ms)

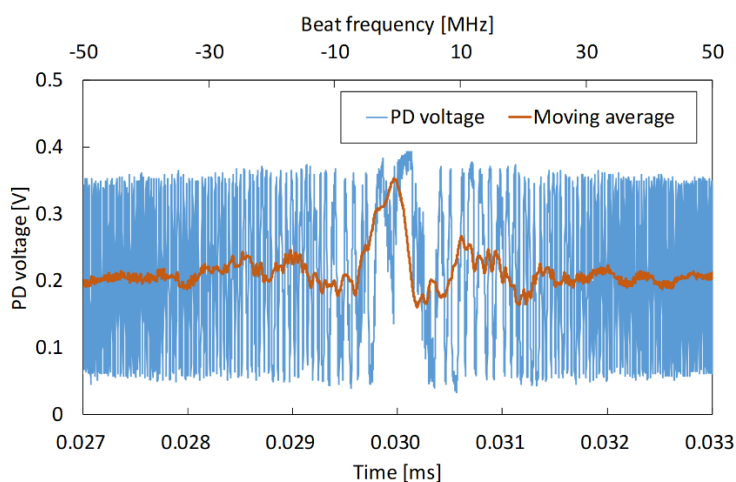


Figure 30 Photo diode voltage and moving average (Time range 0.006ms)

数が約 30MHz 以下になったとき、ビート信号の平均値が変動していることがわかる。ここで、移動平均によって、レーザー光の周波数差に応じたビート信号は除去されており、2つのレーザー光の周波数が互いの光スペクトル線幅内で一致することで、互いのレーザー光の一部が結合され、結合するレーザー光の位相差によって生じた信号であると考えられる。Fig.31 にレーザーの光スペクトル線幅が 21MHz であるときの、2つのレーザー光の周波数差と結合するビームの強度の関係のシミュレーション結果を示す。また、本実験におけるビート信号の移動平均の絶対値を示す。Fig.31 より、ビート信号の移動平均における、各周波数差におけるピークの包絡線と、シミュレーション結果の概形が一致しており、レーザー光の周波数が互いのスペクトル線幅内であることが、2つのレーザー光をビーム結合させるための周波数条件だと分かった。

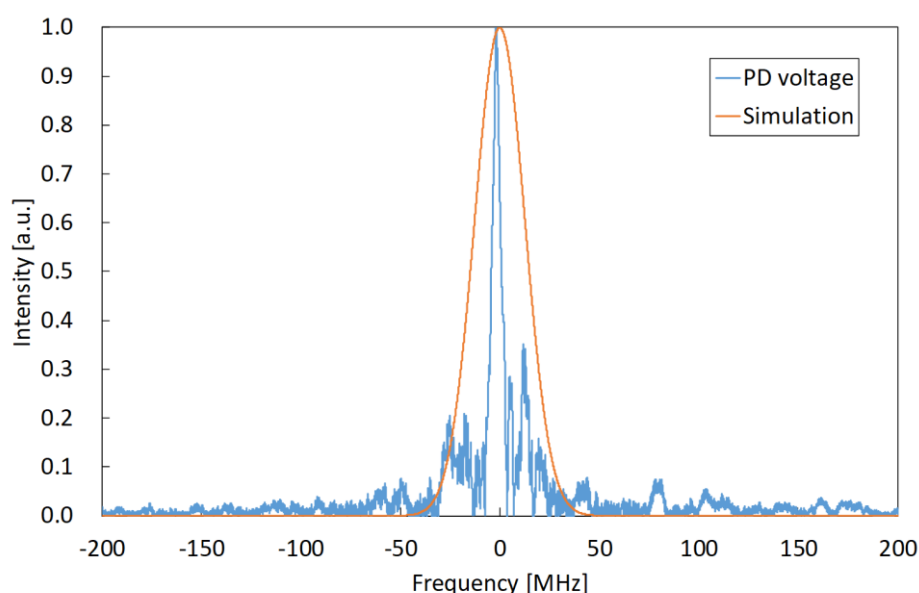


Figure 31 Intensity of beam combining

第4章 レーザー光の周波数安定化の実験

4.1 理論

第3章において、2つの独立したレーザー光同士が干渉することが確認され、2つのレーザー光の周波数が互いの光スペクトル線幅内であることが、2つのレーザーをビーム結合するための条件だと分かった。本研究で使用したレーザー光は、最大で約100MHzの周波数変動がある。また、レーザー光のスペクトル線幅は、約30MHz以下であることから、レーザー光は、ビーム結合のための周波数条件を満たさない。したがって、本実験では、レーザー光が、ビーム結合のための周波数条件を常に満たすようにすることを目的として、アンモニアの吸収線を利用し、2つのレーザー光の周波数を安定化するシステムの構築を試みた。分子の吸収線は物質固有のもので、その吸収周波数にそれぞれのレーザーの光周波数を合わせることで2つのレーザーの光周波数を一致させる。HITRAN データベース[9]より算出した、本研究で使用したレーザー光の波長域におけるアンモニアの吸収線を Fig.32 に示す。

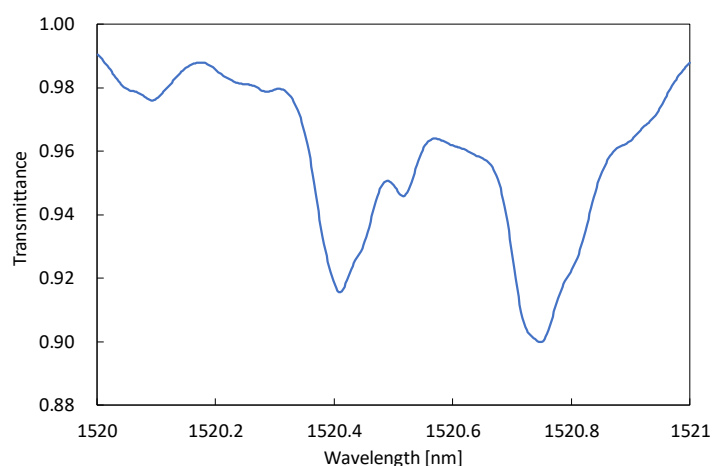


Figure 32 Ammonia transmittance

本実験では、1520.4nm にピークを持つ吸収スペクトルを利用した。この吸収スペクトルは、[10]におけるライン番号が 500、 $(J, K) = (6, 3) \leftarrow (6, 4)$, a 遷移[10]で、 $2\nu_4 + \nu_1$ バンド[11]の吸収線である。また、1520nm 帯におけるアンモニアの強い吸収は、アンモニア分子の N-H 結合の変角振動によるものである[12]。

4.2 実験内容

本実験では、2つのレーザー光の周波数を一致させるために、アンモニアの吸収線を利用して光周波数を安定化するシステムの構築を試みた。基準となる吸収線でのレーザー光の周波数変化に伴う透過率の変化を誤差信号として利用し制御を行う。

Fig.33 に安定化システムの概要を示す。レーザー光は、FC によってそれぞれ3つに分けられる。そのうち2つは、それぞれアンモニアの透過前と透過後に PD で検出されたのち、除算器によって透過率が出力される。そして、残りの1つが光周波数を安定化した光出力となる。ここでは、透過率が一定となるように LD の駆動電流をフィードバック制御した。透過率を用いることで、LD の電流変化に伴うレーザーの光強度の変化に影響されことなく光周波数を制御できる。

LD 駆動電流にエラー信号をフィードバックするための回路を Fig.34 に示す。FC の波長依存性や、PD の受光感度の違いによって、透過率の出力に用いる2つのレーザー光の検出

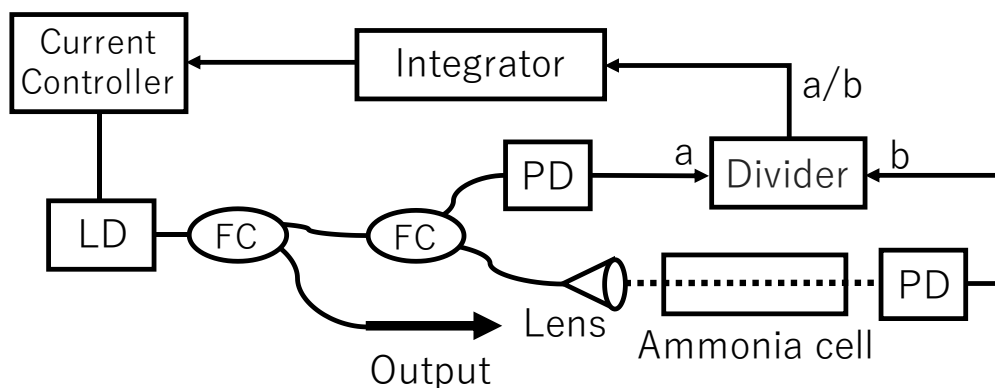


Figure 33 Laser frequency stabilization system

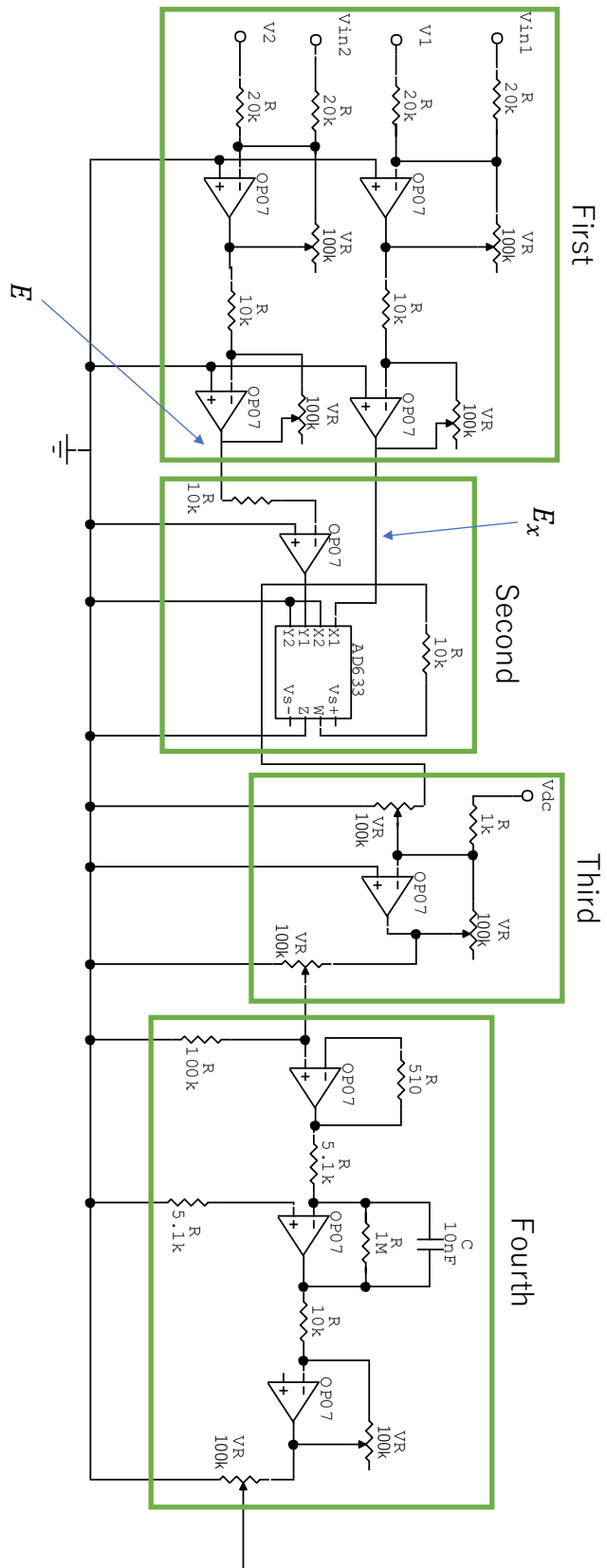


Figure 34 Schematics of the feedback system

信号には、強度差が生じている。したがって、Fig.34 の回路によって、以下の手順で強度を合わせ、透過率を出力した。ここで、Fig.34 の回路は大きく 4 段で構成される。1 段目は、アンモニア透過前後のレーザー光の PD の検出信号強度を合わせる回路である。2 段目は、アンモニア透過前後の検出信号から、透過率を出力する除算器である。3 段目は、目標の透過率において、エラー信号を 0 にするための減算回路。4 段目は、エラー信号を LD の駆動電流に帰還するための積分回路である。

まず、LD の駆動電流を、100Hz, 20-100mA の三角波で変調する。この時、レーザー光の波長は約 1520.1~1520.5nm に変化する。このときのアンモニア透過前と透過後の PD によるレーザー光の検出信号を Fig35 に示す。アンモニア透過前の検出信号強度は、LD の駆動電流と比例して変化している。アンモニア透過後の検出信号は、アンモニアの吸収線によって、検出強度が変化していることがわかる。2 つの検出信号を、Fig.34 の 1 段目によって、

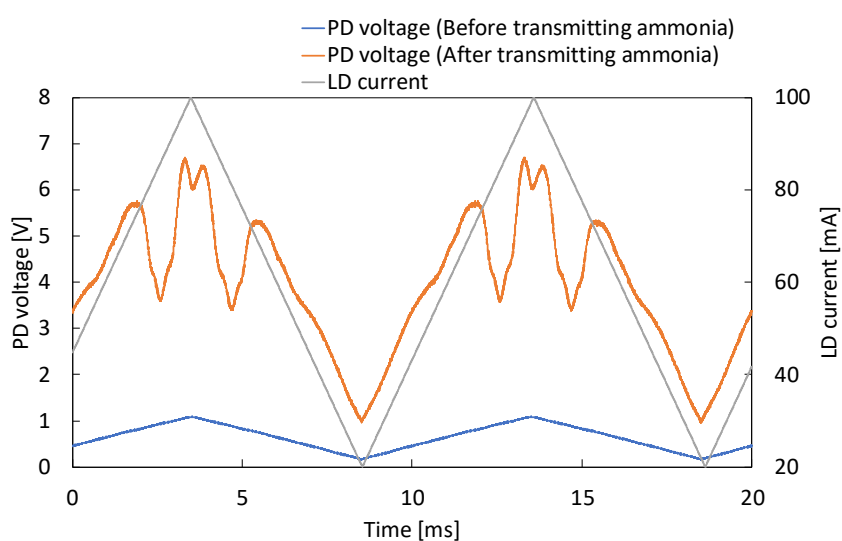


Figure 35 Photo diode voltage

強度を合わせる。Fig.34 の 1 段目の回路の出力を Fig.36 に示す。次に、強度を合わせた 2 つの信号を Fig.34 の 2 段目の除算器に入力する。除算器は、

$$V_{out} = -(10V) \frac{E}{E_x} \quad (26)$$

の電圧 V_{out} を出力する[13]。したがって、アンモニアの透過率 T は、

$$T = -\frac{1}{10}V_{out} \quad (27)$$

となる。除算器によって出力される電圧を Fig.37 に示す。次に、Fig.34 の 3 段目の加算回路によって、目標とする透過率を 0 となるように、透過率から負の電圧を加算した。Fig.34 の 3 段目の回路の出力を、Fig.38 に示す。ここで、Fig.32 の 1520.4nm にピークを有するアンモニアの吸収線と概形が一致していることがわかる。レーザー光の周波数の変動に対するエラー信号を Fig.39 に示す。レーザー光の周波数が変化し、透過率が目標値からずれたとき、ずれに応じたエラー信号が出力されることとなる。エラー信号は、4 段目の積分回路

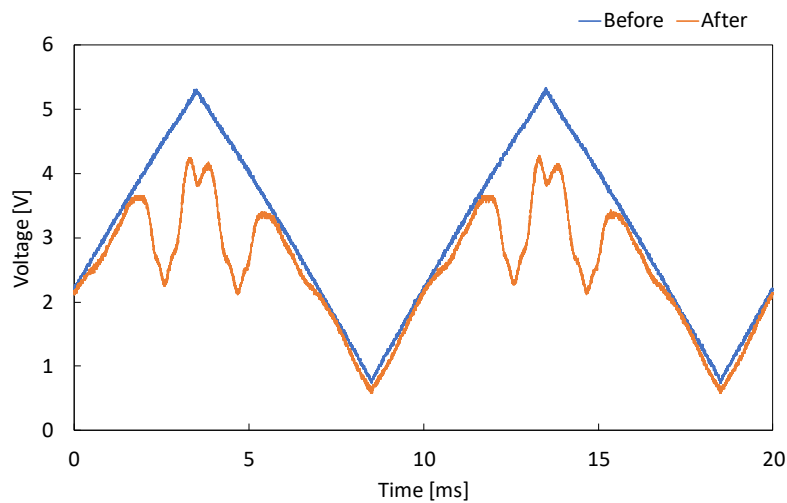


Figure 36 Voltage after intensity matching of photo diode voltage

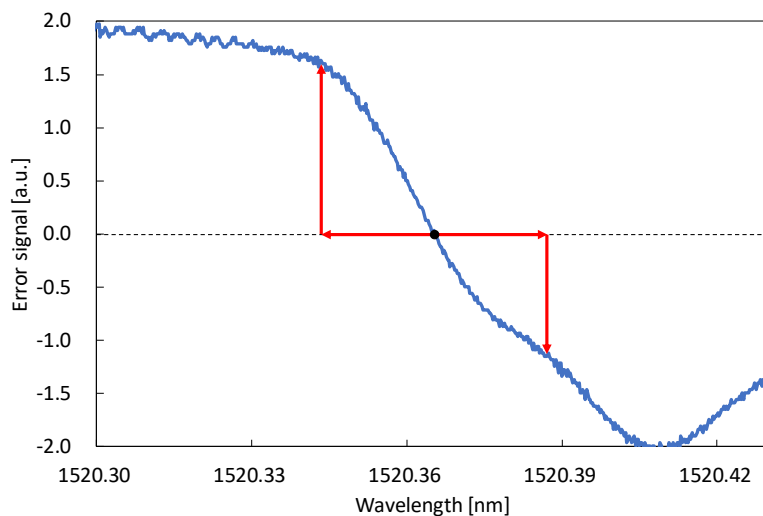


Figure 39 Error signal

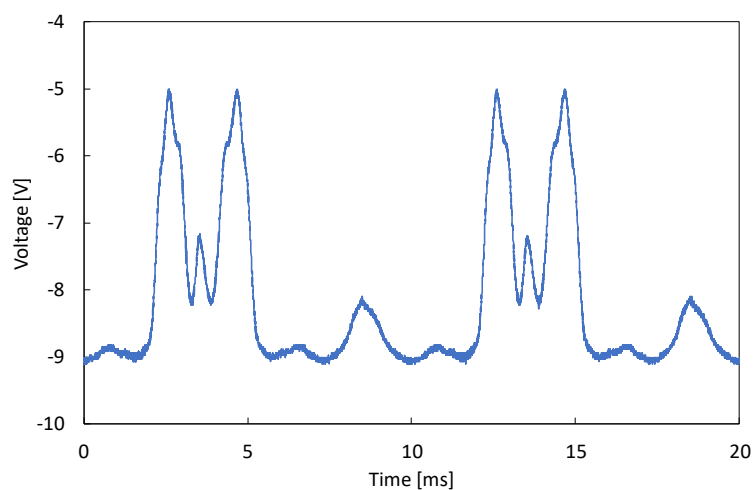


Figure 37 Output from dividing circuit ((-10V)*transmittance)

によって、LD の駆動電流に帰還される。ここで、安定化システムの応答周波数帯域は、積分回路によって制限され、積分回路の時定数は、10ms である。以上の操作によって、目標値おけるエラー信号を 0 とするフィードバック系の構築が可能となった。本実験では、2つのレーザーについて、同様の周波数安定化システムを構築し、それぞれのシステムからの出力光を FC で合波する。Fig.40 に実験構成図を示す。本実験では、アンモニアセルを Herriot

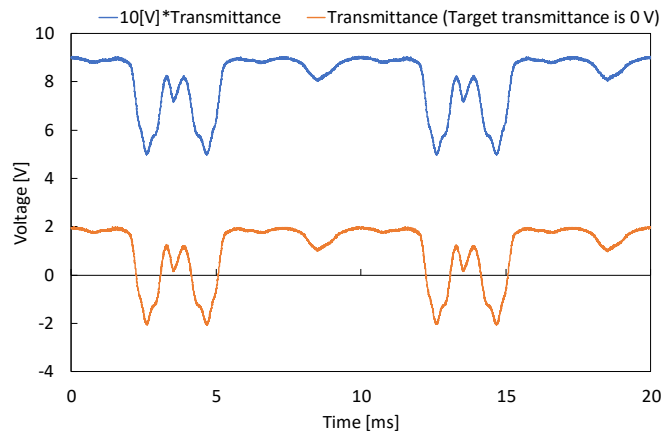


Figure 38 Transmittans after setting offset voltage

型マルチパスセル[14] 内に設置することで、レーザー光がアンモニアを透過する光路長を長くし、周波数変動の好感度検知を図った。マルチパスセルに入射される 2 つのレーザー光は、偏光状態がそれぞれ P 偏光、S 偏光であり、偏光ビームスプリッター(Polarized Beam Splitter : PBS)によって 2 つのレーザー光の光路が 1 つに合わさる。ここで、レーザー光はマルチパスセル内を複数回(本実験においては、約 10 回)反射することから、マルチパスセ

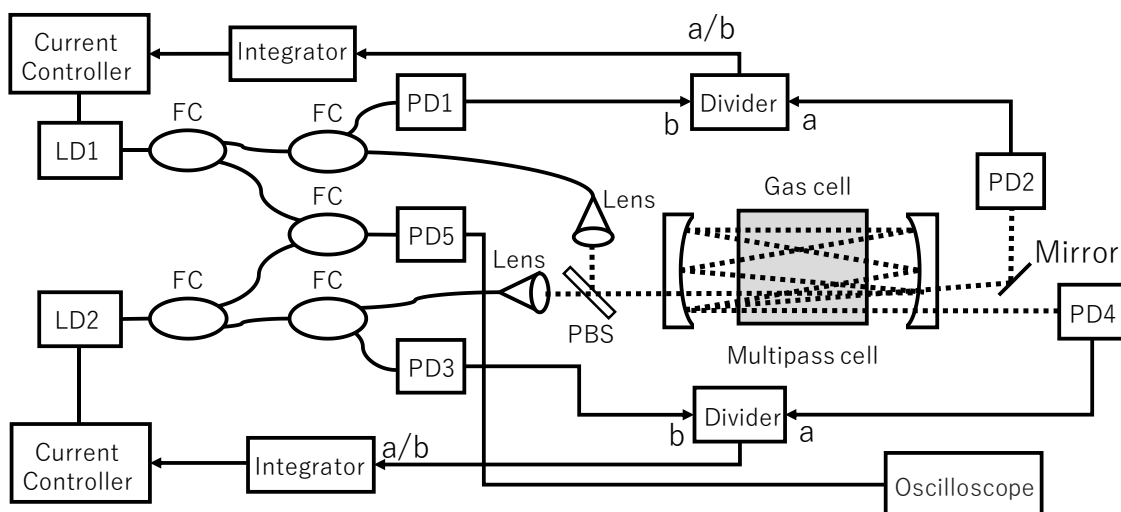


Figure 40 Configuration of constructed system

ルから出射されるレーザー光の偏光状態は、マルチパスセルを入射した状態とは変化すると考えられる。また、LD1,LD2 それぞれのレーザーで独立に周波数の変化を検出する必要があるため、マルチパスセル透過後、2つのレーザー光は、再び分ける必要がある。したがって、2つのレーザー光の光路を完全に一致させると、マルチパスセルから出射するレーザー光の光路も一致するため、LD1,LD2 それぞれのレーザー光を、PBS を用いて再び分けることは困難となる。そこで、2つのレーザー光のマルチパスセルへの入射角を変えることで、2つのレーザー光の出射角も変わり、LD1,LD2 のレーザー光をそれぞれ独立に検出することができるよう光軸の調整を行った。2つのレーザーが干渉することで生じるビート信号はFFT でスペクトル解析される。また、周波数安定化を行ったときと行わないときの各周波数の相対度数を測定した。

4.3 実験結果

ピーク（ビート）周波数の時間変動の一例を Fig.41 に示す。安定化していない場合と比べて、ビート信号の周波数が小さいことがわかる。Fig.42 に各周波数におけるビート周波数の相対度数を示す。周波数の安定化を行ったことによって、ビート周波数が0を最大として、分布幅が小さいことがわかる。このとき、ビート信号の周波数の平均値は3.9MHzであり、これはレーザーの光スペクトル線幅よりも小さく、ビーム結合における周波数条件を満たすことができたと考えられる。ここで、ヒストグラムの階級幅は、スペクトルの周波数分解能とした。

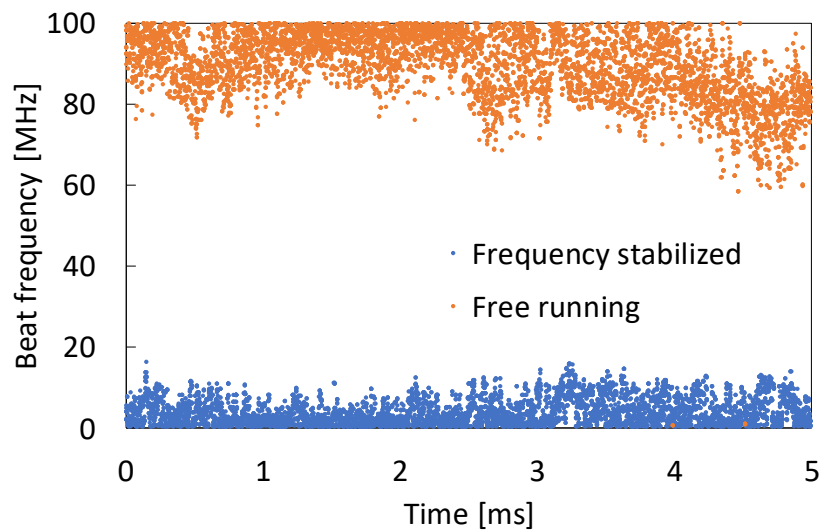


Figure 41 Fluctuation of beat frequency

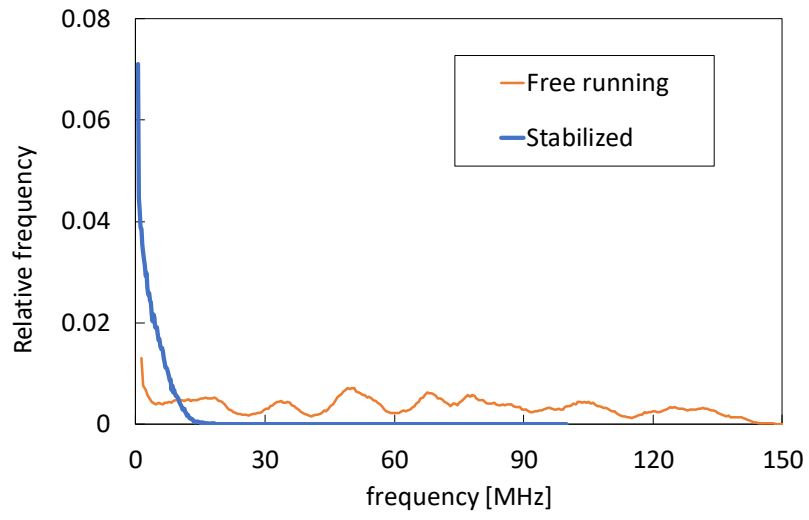


Figure 42 Relative frequency of beat signal

第5章 まとめ

光増幅器を利用せずに、2台の独立したDFBレーザーからの出力光のコヒーレント結合について検討を行った。

まず、レーザー光の位相を制御することで、1つのマスターレーザーを用いたCBCが可能であることを確認した。

次に、2つの独立したレーザー間の干渉とともに、ビート周波数が光スペクトル線幅内において、ビームが結合されていることが確認された。また、アンモニアの吸収線を利用したレーザー光の周波数の安定化を行った結果、ビート周波数はレーザー光のスペクトル線幅以下となり、ビームが結合するための周波数条件が満たされた。今後、本研究での周波数制御に加え、位相制御を行うことで、両条件が常に満たされ、2つの独立したレーザー光の結合が期待される。

謝辞

本研究に際して、国立富山高等専門学校 由井四海准教授に、3年間にわたってご指導ならびに様々な経験をする機会を与えていただきました。心より深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Hayashida, K. Takashi, T. Sato, T. Igarashi, H. Kuze, “Isotope separation of ^{17}O by photodissociation of ozone with near-infrared laser irradiation”, *Journal of Applied Physics*, 111, (2012)
- [2] A. Brignon, “Coherent Laser Beam Combining”, WILEY-VBH (2013)
- [3] E.Hecht, ”Scham’s Outline of Theory and Problems of Optics”, McGraw-Hill
- [4] K.Edamatsu, “Development of Single and Correlated Photon Sources”, *Kogaku*, 37, pp 440-446 (2008)
- [5] C.K.Hong, Z.Y.Ou, L.Mandel, “Measurement of sub-picosecond time intervals between two photons by interference”, *Phys. Rev. Lett*, 59, 2044 (1987)
- [6] K. Edamatsu, ”Single Photons and entangled photons –fundamentals of quantum optics and technology-, Kyoritsu-pub. (2018)
- [7] P.A.M. Dirac: *Quantum Mechanics*, 4th ed, p. 9, Oxford University Press, London (1958)
- [8] G.Magyar, L.Mandel, “Interference fringes produced by superposition of two independent maser light beams,” *Nature*, 198, pp.255-256 (1963)
- [9] I.E.Gordon, L.S.Rothman, C.Hill, et al. “The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database”, *J Quant Spectrosc Radiat Transfer* 203 pp 3-69 (2017)
- [10] L.Lundberg-Nielsen, F.Hegelund, F.M.Nicolaisen, “Analysis of the High-Resolution

Spectrum of Ammonia ($^{14}\text{NH}_3$) in the Near-Infrared Region, 6400-6900 cm^{-1} ”, Journal of Molecular Spectroscopy, 162, pp230-245 (1993)

[11] L.H.Xu, Z.Liu, I.Yakovlev, M.Yu.Tretyakov, R.M.Lees, “External cavity tunable diode laser NH_3 spectra in the 1.5 μm region”, Infrared Physics & Technology, 45, pp31-45 (2004)

[12] Y.Sakai, S.Sudo, T.Ikegami, “Frequency Stabilization of Laser Diodes Using 1.51-1.55 μm Absorption Lines of $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ and $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ”, IEEE Journal of Quantum Electronics, 28, pp 75-81 (1992)

[13] AD633, Analog Devices, Datasheet

[14] D.Herriott, H.Kogelnik, R.Kompfner, “Off-Axis Paths in Spherical Mirror Interferometers”, Appl. Opt. 3, pp 523-526 (1964)