

平成 30 年度
卒業研究報告

研究題目

中赤外光の波長掃引時の強度安定化

指導教員 由井 四海

富山高等専門学校
電子情報工学科

若松 悠果

平成 31 年 2 月 21 日提出

目次

第1章 序論	4
1. はじめに	4
2. 光と物質	5
2.1. 光とは	5
2.2. スペクトル	6
2.3. 分光法	6
3. 中赤外光を使った分光法の特徴	7
第2章 レーザー	7
1. 概要	7
2. 原理	8
3. レーザー光の性質	8
4. 半導体レーザーの発光方法	9
5. 分布帰還形レーザー(DFB-LD : distributed feedback Laser Diode)	10
第3章 理論	11
1. 分極と光の発生	11
2. 差周波発生	11
3. 位相整合	12
4. 周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN:)	13
第4章 波長掃引時の中赤外光の強度安定化	13
1. 目的	13
2. 実験装置	14
2.1 使用機器	14
2.2. コリメートレンズ	15
2.3. バントパスフィルタ	15

3. 光源の特性	16
3.1. DFB レーザーの波長特性	16
3.2. DFB レーザーの強度特性	18
3.3. アイドラー光の波長特性.....	19
3.4. アイドラー光の強度特性.....	19
4. 手法・手段	20
4.1. 実験構成図.....	20
4.2. アイドラー光の強度と波長の制御方法	21
4.3. 組み合わせを導出するプログラムのアルゴリズム	22
5. 結果	24
5.1. PPLN の温度によるアイドラー光の強度変化.....	24
5.2. アイドラー光を強度一定で波長掃引.....	26
第 5 章 まとめ	27
1. まとめ及び考察	27
謝辞.....	28
参考文献.....	28

第1章 序論

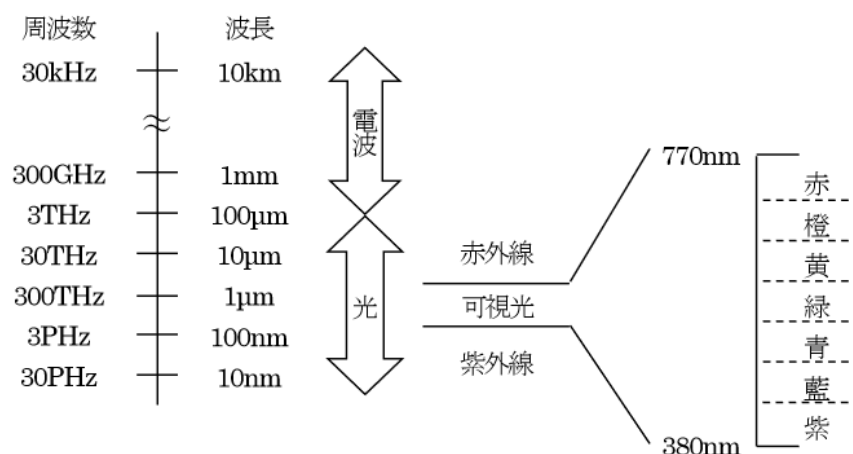
1. はじめに

気体の濃度を測定する方法のひとつに、レーザーを使って吸収線スペクトルをとる方法がある。その中でも $3\text{-}8\ \mu\text{m}$ を扱う中赤外分光法は、ほとんどの分子が中赤外における基本振動によって引き起こされる強く特徴的な吸収線を持っているので、基礎科学、応用物理、および生物医学での研究のための有効的な方法であった。気体分子の吸収線をレーザー光によって測定する際に、理想ではレーザー光の強度が一定でレーザー光の強度変化に影響を受けることなく気体分子の吸収線を測定することができる。しかし、実際は波長掃引することによってレーザー光の強度が変化し、気体分子の吸収線とレーザー光の強度の変化と区別できなくなる場合があった。そこで、気体分子の吸収線がレーザー光の強度変化に影響を受けないようにするため、レーザー光の強度を一定にする方法について考える。

2. 光と物質

2.1. 光とは

光は「電磁波」の一種であり、ある波長範囲にある電磁波を光と呼んでいる。電磁波を波長または種は数で区分したものを図 1.1 に示す。特に目に見える電磁波を可視光という。単に光というときは可視光を意味する。可視光の中でも最も長い赤色の光の波長は 770nm 程



度で、赤、橙、黄、緑、青、藍、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。太陽光のようにすべての可視光を含む光を発色光といい、一つの波長をも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ダ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。光を波長によって分類するように、スペクトルも光の波長範囲によって可視スペクトル、赤外スペクトル、紫外スペクトル、X線スペクトルなどに分類される。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。このような暗線を含むスペクトルを吸収スペクトルという。

2.3. 分光法

分光法とは、物質の（反射、散乱、吸収、透過、蛍光）スペクトルを得て、その物質の特性（構造、濃度、組成など）を知る方法のことである。また、その学問のことを分光学という。

光を物質に当てると、反射、散乱、吸収、透過が起こる。反射とは光が物質と境界面で跳ね返ることをいう。散乱とは、光が物質に当たり元の方向から反れることをいう。吸収とは、光

が物質を通過するときにエネルギーが物質とらえられる現象のことをいう。透過とは、光が物質の内部を通り抜けることをいう。

3. 中赤外光を使った分光法の特徴

中赤外分光法はエネルギーの低い電磁波を用いるので、試料を損傷することがほとんどなく、人体にもほとんど影響を及ぼすことがなく、個体、粉体、繊維、ペースト、液体、容態、気体などいろいろな状態にある資料に適用することができる。また、最大の特徴として中赤外分光分析は官能基分析で、C=O や C=N といった官能基の種類を見分けるだけでなく、それらが置かれている環境についての情報も知ることができ、分子の指紋のようなものを与えてくれる領域と言える。さらに、中赤外分光法は近赤外にくらべて各段に大きな吸収特性を有するので、微量、微小試料の分析に有効で、近赤外では到底およばない ng(ナノグラム:1g の十億分の一)オーダーの微量物質、 μm (ミクロン:1mm の千分の一)オーダーの微小試料を容易に分析することができる。しかし、中赤外域では一般に吸収が大きいため光路長を非常に短くする必要がある[1]。

第2章 レーザー

1. 概要

レーザーは、原子などの放射の誘導放出により放出する光を増幅させる装置である。1961年にアメリカのメイマンがルビーレーザーの発振に成功したことに始まる。レーザーから発する

光は、数 km 先の物体を照らし出したり、きわめて高い単色性によって理論限界近くまで小さく集光できたりと、自然光とは大きく異なる特性をもつ。レーザー光は自然界では決して発生することはなく、人類が作り出した全く新しい光である。

2. 原理

レーザー媒質中に安定状態（基底状態）で存在する原子が外部からのエネルギー（光等）を吸収すると、電子がいったん外側の起動に飛び（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（色）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（ポンピング）、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。この状態で外からおなじ周波数の光信号を送ると、励起状態の原子が連鎖反应的に同一方向に向けて光を放出し、より強い信号が得られる。

レーザー媒質を 2 枚のミラーで挟み込み、その間で光を往復させることにより、光はさらに増幅する。増幅された光は片側の部分反射ミラーからレーザー光として取り出される [2]。

3. レーザー光の性質

レーザー光の特徴として、指向性、干渉性、集光性、単色性、そして制御性がある。指向性とは、光がほとんど広がらずにまっすぐ進むことをいう。干渉性は、光の位相（波の山と谷）が揃っているため、狭いスリットを通すと、光の強弱の縞模様が鮮明に見えることを言う。集光

性とは光をレンズを用いて光を周流させる場合において1点に集中させやすいことを言う。単色性とは、レーザー光にいろいろな光が混じり合わずに純粋な一つの色（波長、周波数）の光であることを言う。また、制御性とは外部から信号を加えることによってその振幅や位相を変えることができることを言う。

レーザーは原子の中の電子エネルギー状態の変化を利用するので、発振できる光の波長（周波数）は利用する原子の種類によって決まってしまう。レーザーとして利用できる原子の種類には限りがあるので、レーザー光として手に入れることができる波長には限りがある。ある特定の波長のレーザー光を使いたいとしても、みあたらない場合が多い。しかし、非線形光学効果を利用することによって、レーザー光から波長の異なったレーザー光を作ることができる。

4. 半導体レーザーの発光方法

半導体レーザーの基本的な構造を図2.1に示す。半導体レーザーは活性層（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します。この光はまだレーザー光ではありませんが、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込められ、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（位相の揃った強い光が発生する現象）を生じてレーザー発振が起こる。活性層内を光が往復して誘導放出が起こるかどうかが半導体レー

ザーと発光ダイオードの違いで、発光ダイオードの場合は発光した光がそのまま外部に放出される[3]。

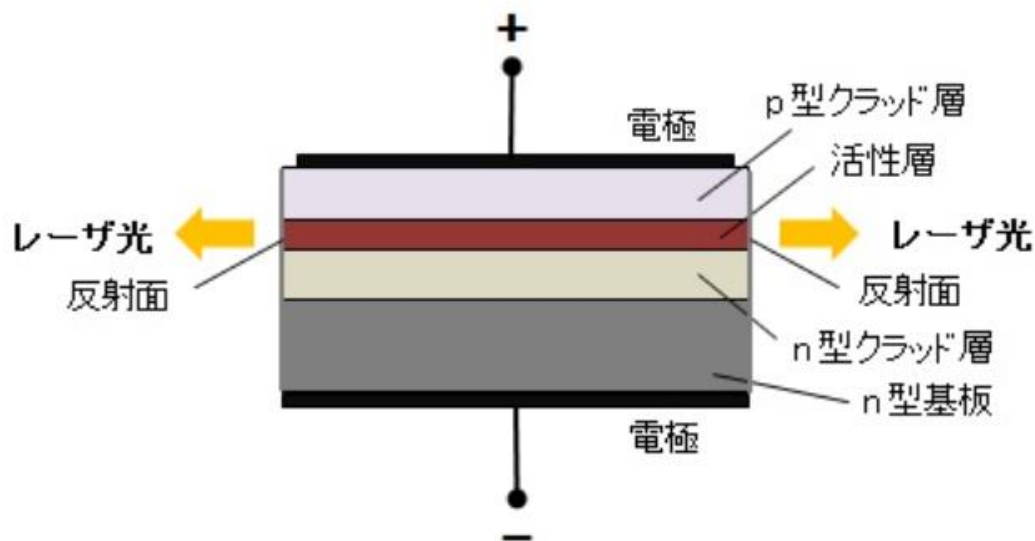


図 2.1 半導体レーザーの基本的な構造

5. 分布帰還形レーザー(DFB-LD : distributed feedback Laser Diode)

半導体レーザーの中でも、本研究では分布帰還形レーザーを用いた。

分布帰還形レーザーは波長選択性のある回折格子でレーザーの共振器鏡を構成することで、特定の軸モードを選んでレーザー発振させることができ、単一軸モード動作を現実できる。そのため、分光法に適している。反射する位置が共振器鏡の位置できめられている通常のレーザーとは異なり、回折格子全体で反射される。吸収線幅と比べるとレーザー光のスペクトル幅(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が、各波長で違う分布帰還形レーザーを必要とする。

第3章 理論

1. 分極と光の発生

物質の中には無数の原子、すなわち電気双極子が存在しています。そこで、単位体積あたりの電気双極子密度のことを「分極」と呼びます。光の電解による力を受けて電子が変位した場合、電気双極子も同じ回数だけその向きを逆転させる。すなわち、分極が光の振動数で振動します。

分極の大きさは電解によって変わるので、分極の大きさ P は電解の強さ E に比例する。式で書くと、

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E$$

となる。 ϵ_0 は「誘電率」とよばれる量で、物質の電氣的性質を表す。 $\chi^{(1)}$ は「電気感受率」と呼ばれる量で、電解をかけたときにどれくらい分極するかを表す。光が強くなると、電解が大きくなる。

2. 差周波発生

$\chi^{(1)}$ の 2×10^7 分の一程度の大きさである二次非線形感受率 $\chi^{(2)}$ をもつ非線形光学結晶の中に、 ω_1 と ω_2 の二種類の波長（エネルギー）の光が入射した場合を考える。入射する光の電解を

$$E = E_1 \sin(\omega_1, t) + E_2 \sin(\omega_2, t)$$

と書くと、二次非線形分極 P_{NL} は

$$P_{NL}^{(2)} = \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2$$

となるので、

$$\sin^2(\omega_1, t), \sin^2(\omega_2, t), \sin(\omega_1, t), \sin(\omega_2, t)$$

などの項が現れる。三角関数の公式を使って、積の項を分解すると、

$$2\omega_1, 2\omega_2, \omega_1 + \omega_2, \omega_1 - \omega_2$$

となり、これらの周波数で変化する項が含まれていることになる。この第四項が差周波発生となる。差周波発生は波長が長い赤外レーザー光を作るのに便利である[4]。

3. 位相整合

二種類の異なる周波数の光を非線形光学結晶に入れた場合、非線形光学結晶の中には三種類の光波が存在している。しかし、波長の異なる光が同時に出てくることはありません。結晶の方位と電解の向き（偏光）の条件が満たされたものだけが強調して出できます。これは「位相整合」と呼ばれるもので、粒子の場合の運動量に相当する量である。結晶の方位や温度を制御することによって、得られる波長を変えることができる。

位相整合条件は、二つの光の位相速度が一致することであり、光の強度を I 、非線形媒質の長さを L 、入射光電解によって発生した光の波数と、新しく発生した光の波数の差を Δk とすると、

$$I \propto L^2 \frac{\sin(\Delta k L / 2)}{(\Delta k L / 2)^2}$$

となる。光の強度 I は電解の二乗に比例するので、光の強度は L^2 に比例して増大する。 $\Delta k=0$ の場合は I は L^2 に比例して増大するが、 $\Delta k \neq 0$ の場合は $\Delta k L / 2 = \pi / 2$ のときに最大値を取り、この値を与える媒質超 $L_C = \pi / \Delta k$ をコヒーレンス長と呼ぶ。 $\Delta k \neq 0$ なら媒質長をいくら長くしても、

最大値は $(2L_C/\pi)^2$ にしかない。このように Δk の値が非線形光学波の発生に大きく影響している[4]。

4. 周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN:)

LN(ニオブ酸リチウム: LiNbO_3)は、最も有名な光学決勝の1つである。高い非線形光学定数を持っており、応用範囲の広い結晶である。透過波長利用域は、420-5200nm にあり、主に1 μm 以上でのSHG発生などに使用されている。LNは典型的な強誘電体で、電解を加えることによって極性が反転する。数 μm の周期構造で数十mmの大きさのPPLNができています。反転周期を変えることで、ほぼ全透過波長領域にわたって位相整合の利用が可能である。

PPLNは、ニオブ酸リチウム(LiNbO_3)単結晶が持つ高い光学的異方性(非線形性)を利用し、主に可視域での波長変換素子として用いられる。

第4章 波長掃引時の中赤外光の強度安定化

1. 目的

2台の分布帰還形(DFB: Distributed Feedback)レーザーと、周期的分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate)を組み合わせて差周波発生により中赤外光の生成するシステムを構築する。さらに、その中赤外光の強度を一定で波長掃引するための制御方法について検討する。

2. 実験装置

本研究で使用した機器とその特性について述べる。

2.1 使用機器

名称	型番	仕様	メーカー
DFB-LD	NLK 1 L5EAAA	波長:1589nm	NTT エレクトロニクス
DFB-LD	QLD1061	波長:1064nm	Redfern Integrated Optics
LD 電流ドライバー (1589nm)	LDC202C	変調係数:20mA/V ± 5% 帯域幅:0-250kHz	THORLABS
LD 電流ドライバー (1064nm)	LDC205C	変調係数:50mA/V ± 5% 帯域幅:0-50kHz	THORLABS
集光レンズ	LA5763	焦点距離:50.0mm	THORLABS
コリメートレンズ	C036TME-E	焦点距離:4.00mm	THORLABS
プリアンプ	PIP-DC-200M-F-M4		FIT リーディングテックス
赤外線検出器	PIV-4TE-3.4-1×1	素子:HgCdTe	FIT リーディングテックス
電熱クーラー・コントローラ	PTCC-01-BAS		FIT リーディングテックス
光チョッパーシステム	MC200B		THORLABS
パワーメーター	PM100USB		THORLABS
偏波保持シングルモードパッチケーブル	P3-1064PM-FC-1	MFD:7.7μm	THORLABS
偏波保持シングルモードパッチケーブル	P3-1550PM-FC-1-D-JP	MFD:10.5μm	THORLABS
偏波保持シングルモードパッチケーブル	SM98-PR-U25D-H	MFD:6.6μm	THORLABS
波長変換モジュール(PPLN)	WD-3218-000-A-B-C	変換効率:26%/W	NTT エレクトロニクス
偏波保持ファイバーアダプタ	ADAFCPM2		THORLABS
偏波保持波長分割多重ケーブル	WD202APM-APC		
IR バンドパスフィルタ	F B 3250-500	CWL:3.25μm 半値全幅:0.5 ± 0.1μm	THORLABS
凹面ミラー (金)	CM508-200-E04	f:200.0mm	THORLABS
ロックインアンプ	SR830DSP Lock-in Amplifier	時定数:30ms	Stanford Research System

A/D コンバータ	NIUSB-6221	サンプリングレート:250kS/s ビット数:16-bit	NATIONAL INSTRUMENTS
-----------	------------	----------------------------------	-------------------------

2.2. コリメートレンズ

レーザーの光をより遠くまで届かせるためには、長い距離を伝搬しても拡がったり、収束したりしないように平行な光束にする必要がある。そのため、ミラーによる反射やレンズによる屈折を用いてビーム光が平行状態になるように光学調節を行う。この調節をコリメートという。P P L Nモジュールからの出力光はコリメートされていないので、コリメートレンズ[5]を用いてビーム光を調節する。

2.3. バンドパスフィルタ

P P L Nモジュール出口にシリコンフィルターが装着されており、波長 1064nm の励起光はカットされる構造になっている。しかし、波長 1589nm の信号光は光軸調整光として、シリコンフィルターを通過してモジュール出口から出力される。信号光はガスセルなどに中赤外光を透過させる場合には不要になるため、バンドパスフィルタ[6]を使用して除去する。本研究で用いたバンドパスフィルタの波長ごとの透過率を図 3.1 に示す。

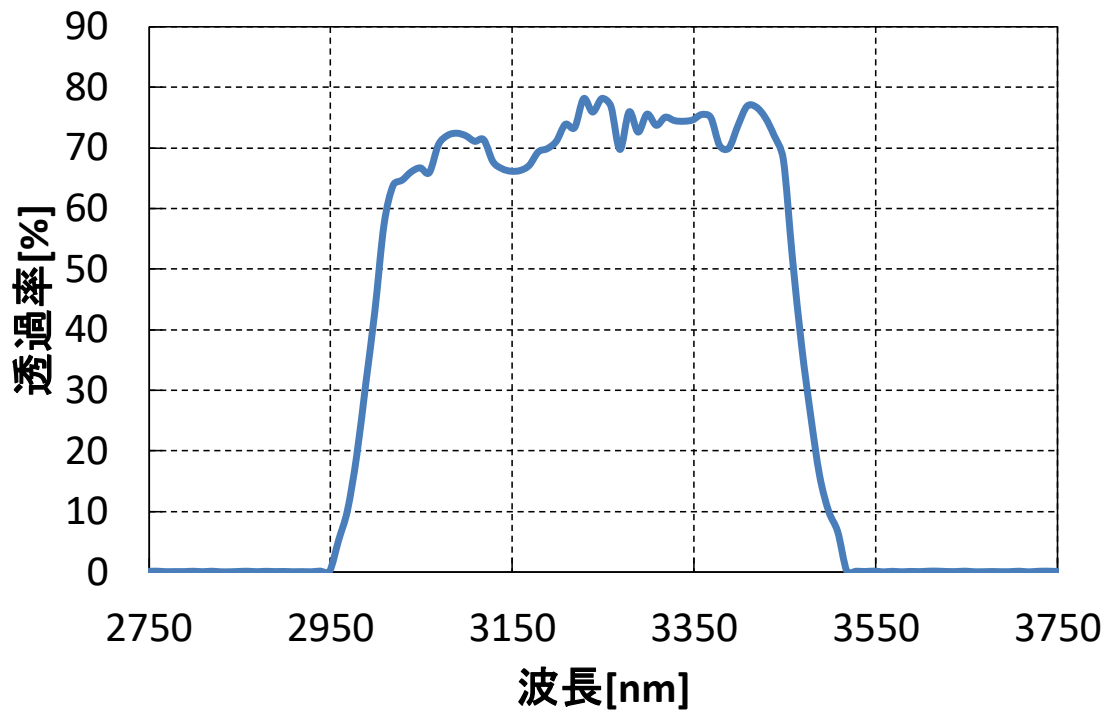


図 3.1 バンドパスフィルタの波長ごとの透過率

3. 光源の特性

2つのDFBレーザー（シグナル光と、ポンプ光）、アイドラー光の性質について述べる。

3.1. DFBレーザーの波長特性

DFBレーザーの波長はDFBレーザーの電流および温度によって決まる。各DFBレーザーの電流と温度を変化させたときの各DFBレーザーの波長特性を図3.2と図3.3に示す。シグナル光もポンプ光も同様に温度を大きくすると、波長も大きくなることが分かる。これは半導体のエネルギーギャップが小さくなり、発光波長が大きくなるからである。また、電流を大きくするとでも波長が大きくなることが分かる。

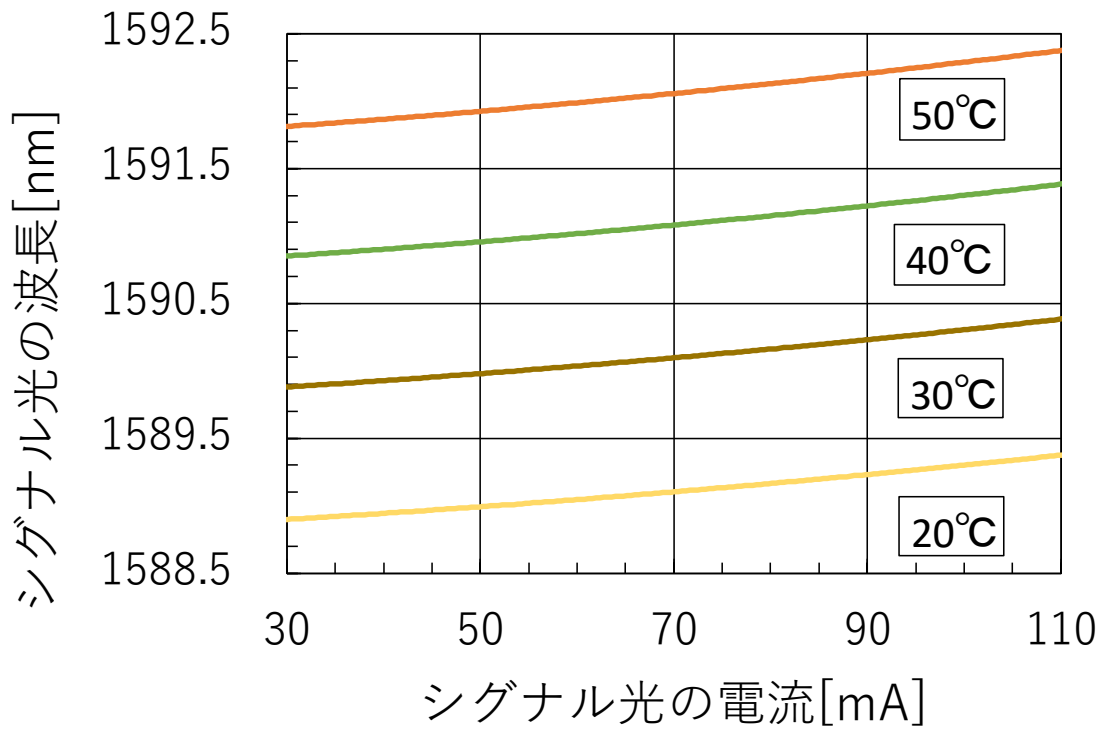


図 3.2 シグナル光の温度ごとの電流-波長特性

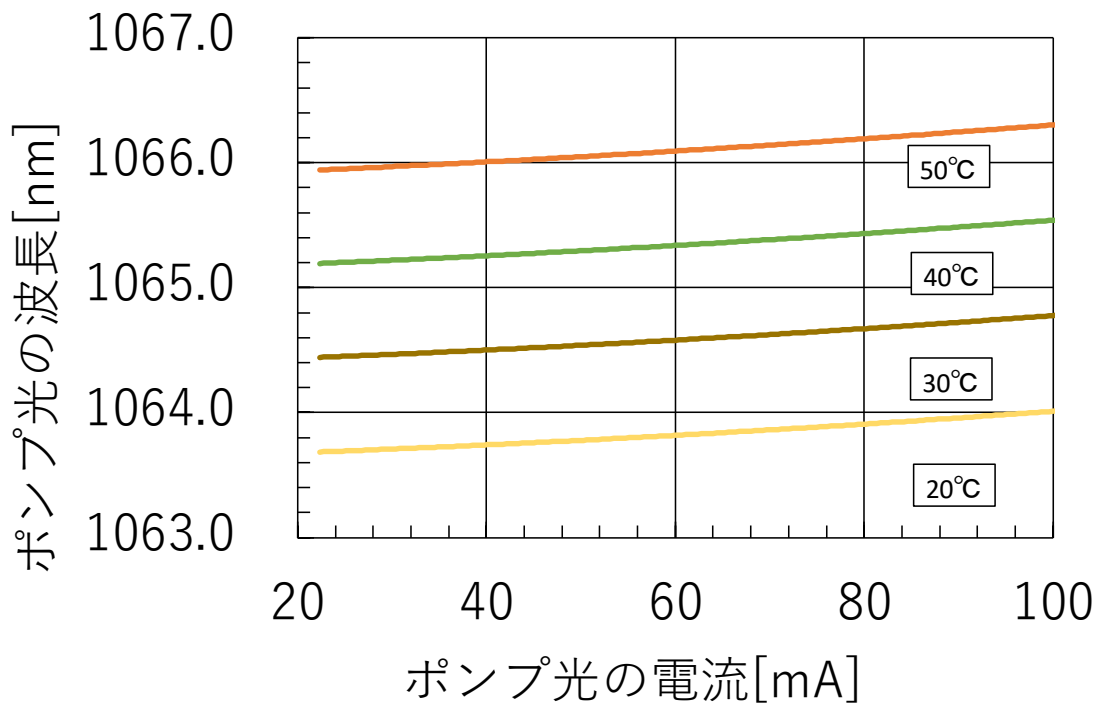


図 3.3 ポンプ光の温度ごとの電流-波長特性

3.2. DFB レーザーの強度特性

DFB レーザーの強度は DFB レーザーの電流および温度によって決まる。各 DFB レーザーの電流と温度を変化させたときの各 DFB レーザーの強度を特性した。強度特性を図 3.4 と図 3.5 に示す。シグナル光もポンプ光も同様に温度を大きくすると、強度が小さくなることが分かる。これは温度上昇に伴って電子や正孔の運動が活発になり活性領域からオーバーフローすることによって半導体内部の発光効率が低下し、強度が小さくなったからである。また、電流を大きくするとでも強度も大きくなることが分かる。

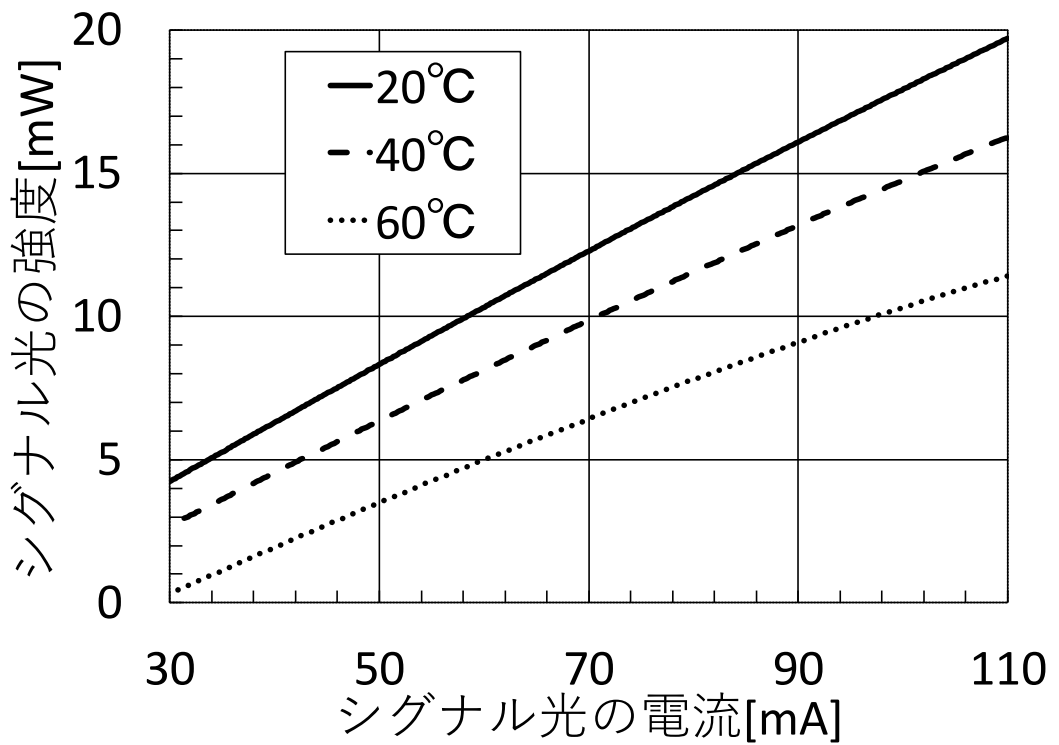


図 3.4 シグナル光の温度ごとの電流-強度抑制

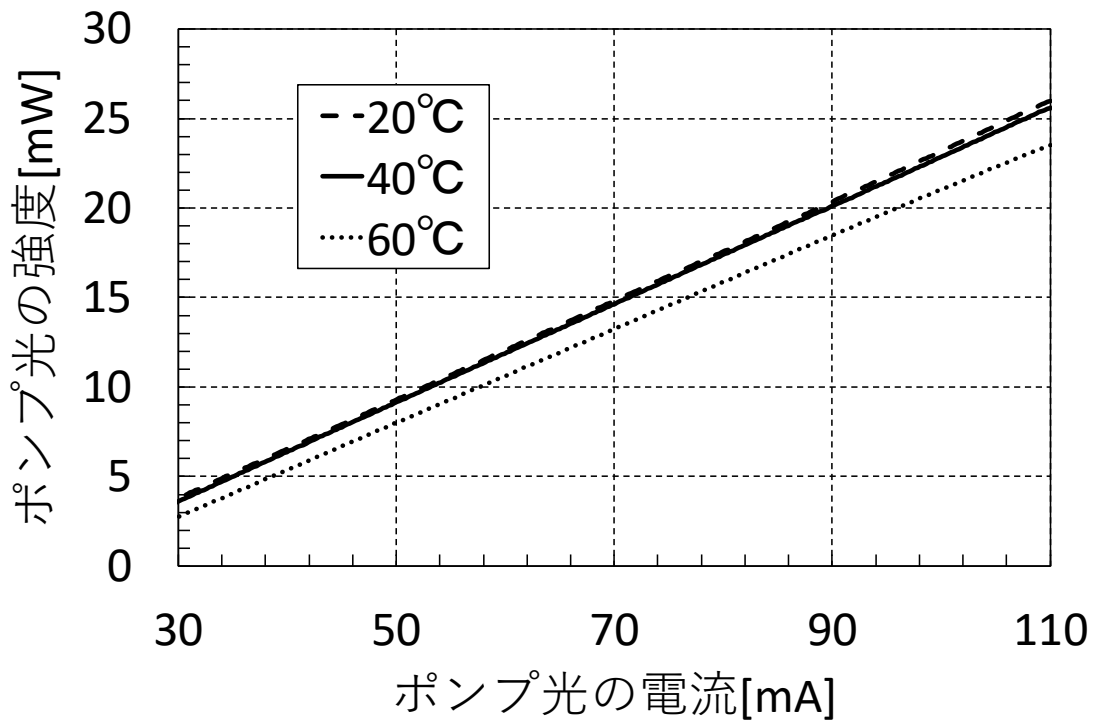


図 3.5 ポンプ光の温度ごとの電流-波長特性

3.3. アイドラー光の波長特性

アイドラー光の波長 λ_i はシグナル光の波長を λ_s 、ポンプ光の波長を λ_p とすると、

$$\lambda_i = \frac{\lambda_s \lambda_p}{\lambda_s - \lambda_p}$$

となる。各 DFB レーザーの電流と温度を制御して各 DFB レーザーの波長を変化させることによってアイドラー光の波長が決定する。

3.4. アイドラー光の強度特性

アイドラー光の強度 P_i はシグナル光の強度を P_s 、ポンプ光の強度を P_p 、PPLN の変換効率を η とすると、

$$P_i = P_s P_p \eta$$

となる。この式より、各DFBレーザーの電流と温度を制御して各DFBレーザーの強度を変化させることによってアイドラー光の強度が決定する。

変換効率 η は各DFBレーザーの温度と各レーザー光の波長によって変化する。分極周期を Λ 、屈折率を n_e 、PPLNの温度を T とすると、疑似位相整合 Δk は、

$$\Delta k = 2\pi \left[\frac{n_e(\lambda_p, T)}{\lambda_p} - \frac{n_e(\lambda_s, T)}{\lambda_s} - \frac{n_e(\lambda_i, T)}{\lambda_i} - \frac{1}{\Lambda(T)} \right]$$

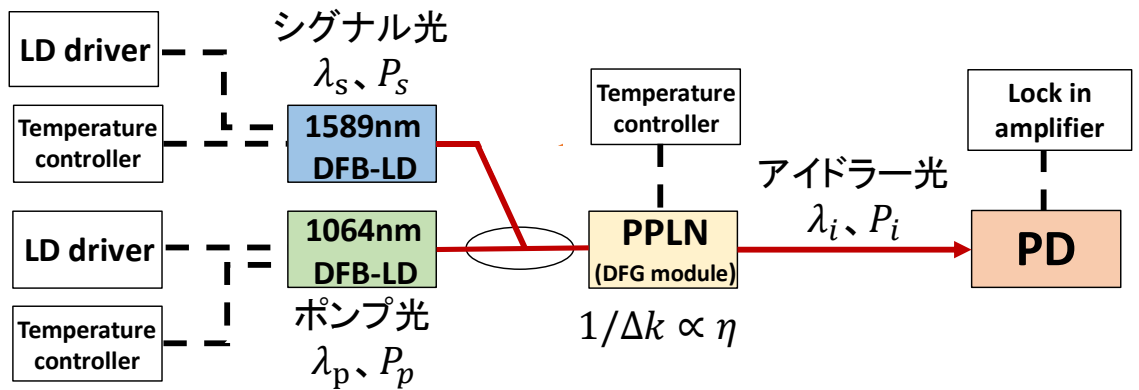
となる。なお、本研究で用いたPPLNは Δk が0となる時、変換効率 η が最大の26%となる[8]。

また、PPLNの温度によって屈折率と分極周期が変化する。

4. 手法・手段

4.1. 実験構成図

実験構成図を図3.6に示す。大きく分けると、2つのDFBレーザーと、PPLNモジュールから構成されている。波長1589nmのシグナル光と1064nmのポンプ光を偏波保持型カップラに入射して合波し、それをPPLNに入射することにより差周波発生を用いて、3221nmのアイドラー光を出力した[7]。そのアイドラー光をファイバーを通して光検出器(PD: Photodiode)により受光しロックイン増幅器(LIA: Lock In Amplifier)で検波する。各DFBレーザーは半導体レーザー(LD:laser diode)用電流ドライバーと温度コントローラーによって電流と温度が制御され、PPLNモジュールは温度コントローラーが接続され、温度が制御されている。



図

図 3.6 実験構成図

4.2. アイドラー光の強度と波長の制御方法

電流と温度、に対する波長と強度の関係について表 2 に示す。アイドラー光の波長と強度各 DFB レーザーの電流と温度、PPLN の温度の 5 つのパラメーターで変化する。アイドラー光の波長と強度は各パラメーターによって変化の仕方が異なるので、いくつかのパラメーターを組み合わせることによってアイドラー光の強度を一定で波長掃引することができる。本研究では、アイドラー光の強度を一定のまま波長掃引することができるシグナル光の電流と PPLN の温度の 2 つのパラメーターの決定方法を検討し、制御を行う。シグナル光の強度を大きくしてアイドラー光の強度を大きくし、PPLN の温度を大きくしてアイドラー光の強度を小さくするパラメーターを決定し、アイドラー光の強度を一定で波長掃引する。

表 2 電流と温度に対する波長と強度の関係

	I_s ↗	I_p ↗	T_s ↗	T_p ↗	T_{PPLN} ↗
λ_s	↗	—	↗	—	—
λ_p	—	↗	—	↗	—
P_s	↗	—	↘	—	—
P_p	—	↗	—	↘	—
λ_i	↘	↗	↘	↗	—
P_i	↗	↗	↘	↘	↔

4.3. 組み合わせを導出するプログラムのアルゴリズム

まず、強度を光検出器によって電気信号に変換してロックインアンプで検波した 30mA から 110mA の強度を、パソコンで読み取り、csv ファイルで保存したものをプログラムで読み取る。

一定にしたい強度（設定値）を決める。次に電流の値を読み取る変数 ma に 30、設定値に一番近い値を調べる変数 c に 10、エクセルの行数を調べる変数 i に 0 を初期値として代入する。 i 行に桁がある場合、 ma の値が変化しない間、変数 a に i 行の強度から設定値引いたものを代入し、変数 b に a の絶対値を代入する。 c より b の値のほうが小さかったら、 c に b の値を代入して、一番設定値に近い強度がある行を調べる変数 d に i を代入して i に 1 を足して、電流の値が変化するか調べる分岐に戻る。 c より b の値が大きい場合は、 i に 1 を足して電流の値が変化するか調べる分岐に戻る。行が変わった時に電流の値が変化した場合、 ma に変化後の電流を代

入して、d 行の電流と強度を出力して、i 行に値があるかの分岐に戻る。i 行に値がなくなったら d 行の電流と強度を出力して処理を終了する。このプログラムによって設定値に一番近い電流と強度の組み合わせが 30mA から 110mA まで出力される。

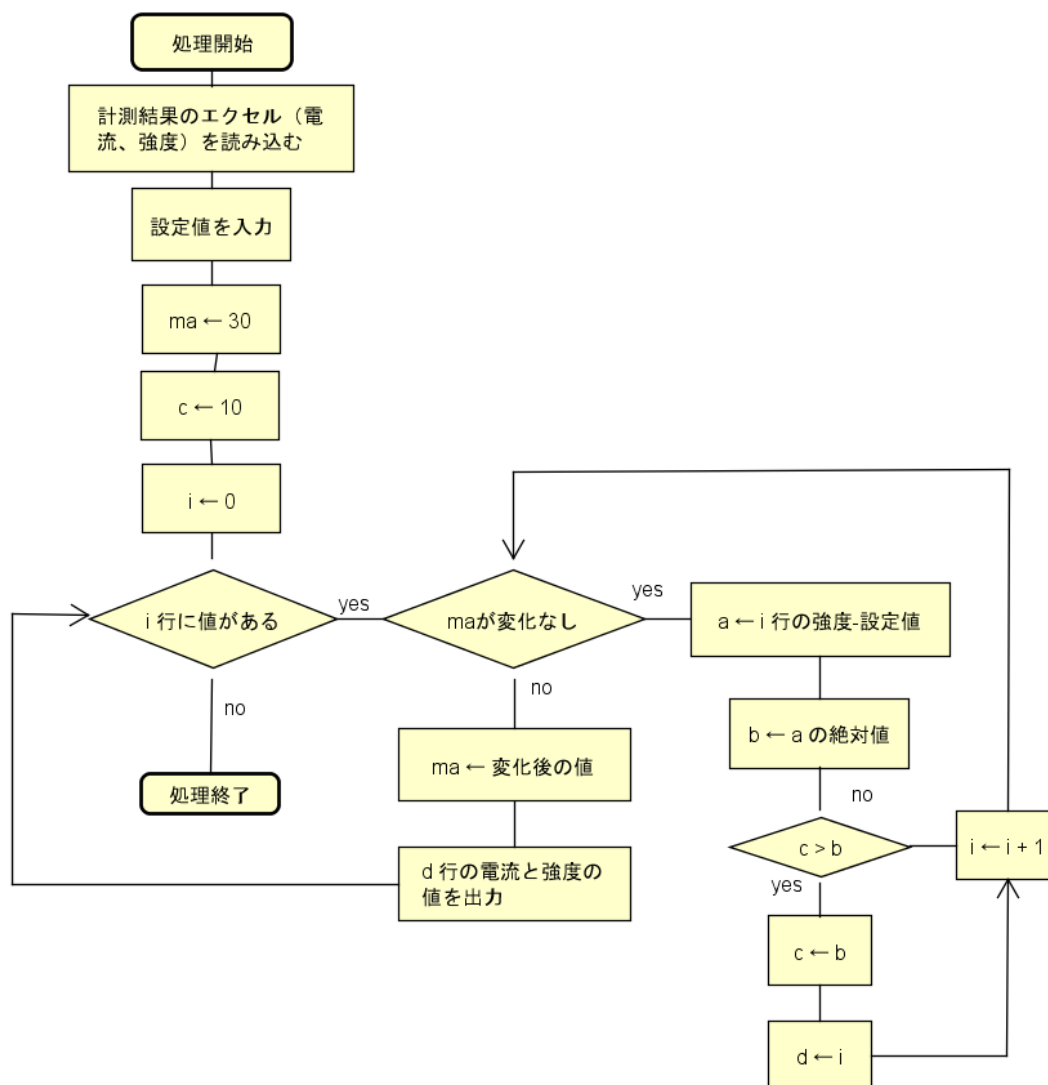


図 3.7 用いたプログラムのアルゴリズム

5. 結果

5.1. PPLN の温度によるアイドラー光の強度変化

PPLN は温度によってアイドラー光の強度が大きくなる場合と小さくなる場合がある。シグナル光の電流ごとの PPLN の温度とアイドラー光の強度の関係についてのグラフを図 3.7 に示す。PPLN の温度を大きくしながらアイドラー光の強度を小さくするための温度が分かった。30mA から 110mA までシグナル光の電流を大きくした場合 30mA の時に強度が一番弱くなる。30mA での最大強度が $7.38 \mu\text{W}$ であった。グラフより、 $7.38 \mu\text{W}$ の強度に一番近くなるような、30mA から 110mA の 1mA ごとのシグナル光の電流と PPLN の温度の組み合わせを 4.3 のプログラムによって求めた。強度一定のシグナル光の電流と P P L N の温度の組み合わせを図 3.8 に示す。図 3.8 の点線のグラフシグナル光の電流を 30mA から 110mA まで大きくすると同時に P P L N の温度を約 46°C から 50°C まで大きくすることによってアイドラー光の強度を一定で掃引できることが分かった。また、図 3.8 の実線グラフより求めた組み合わせでのアイドラー光の強度は $7.38 \pm 0.25 \mu\text{W}$ になることが分かった。

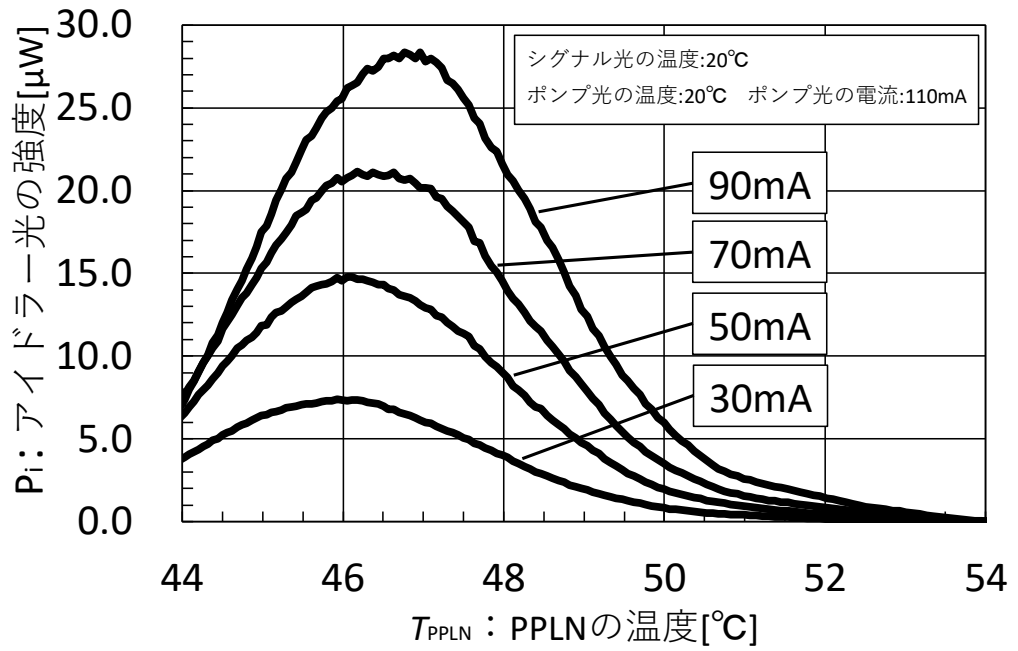


図 3.7 PPLN の温度とアイドラー光の強度の関係

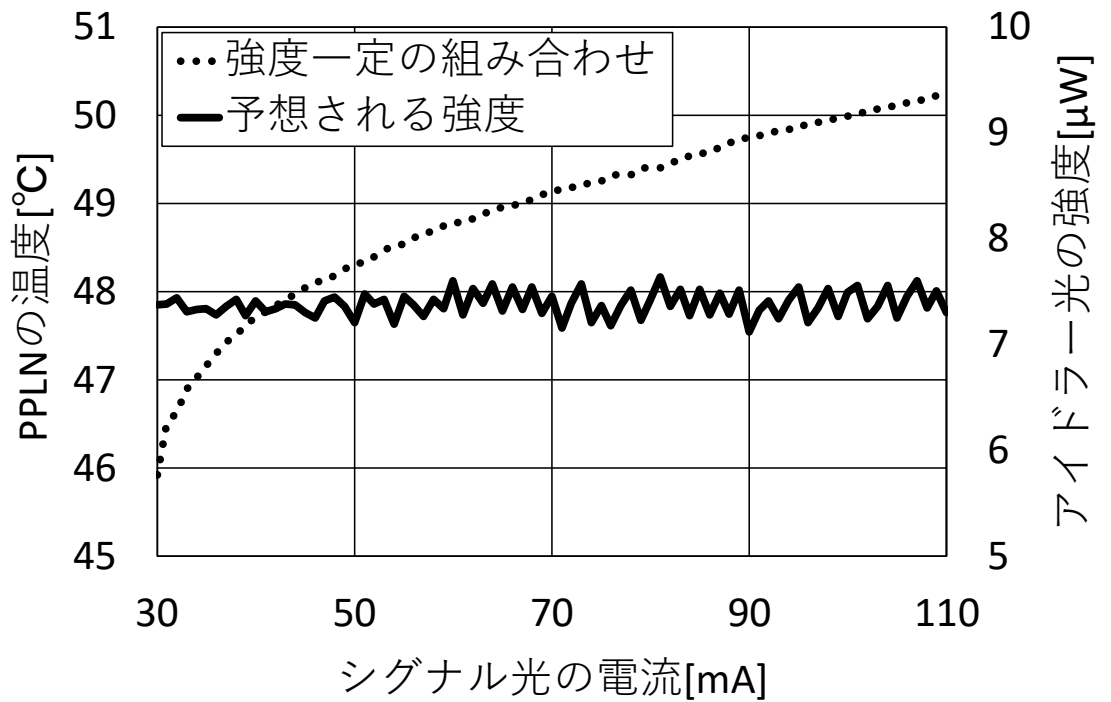


図 3.8 強度一定の組み合わせ

5.2. アイドラー光を強度一定で波長掃引

図 3.8 で求めた組み合わせで掃引した結果を図 3.9 に示す。電流を 30mA から 110mA まで変化させることによって、波長を約 2nm 掃引することができた。実線のグラフは PPLN の温度を変化させずにシグナル光の電流を大きくしたものである。PPLN の温度を制御しないと、3219.4nm から 3221.4nm にかけて約 $19\mu\text{W}$ 小さくなった。点線のグラフはシグナル光の電流と PPLN の温度を同時に制御したものである。3219.4nm から 3221.1nm にかけて $10.2\pm 0.25\mu\text{W}$ で一定になり、3221.1nm から 3221.4nm にかけて約 $3\mu\text{W}$ 小さくなった。しかし、PPLN を制御しなかった場合に比べ、シグナル光の電流と PPLN の温度を同時に制御することによって、アイドラー光の強度を一定で掃引することができた。

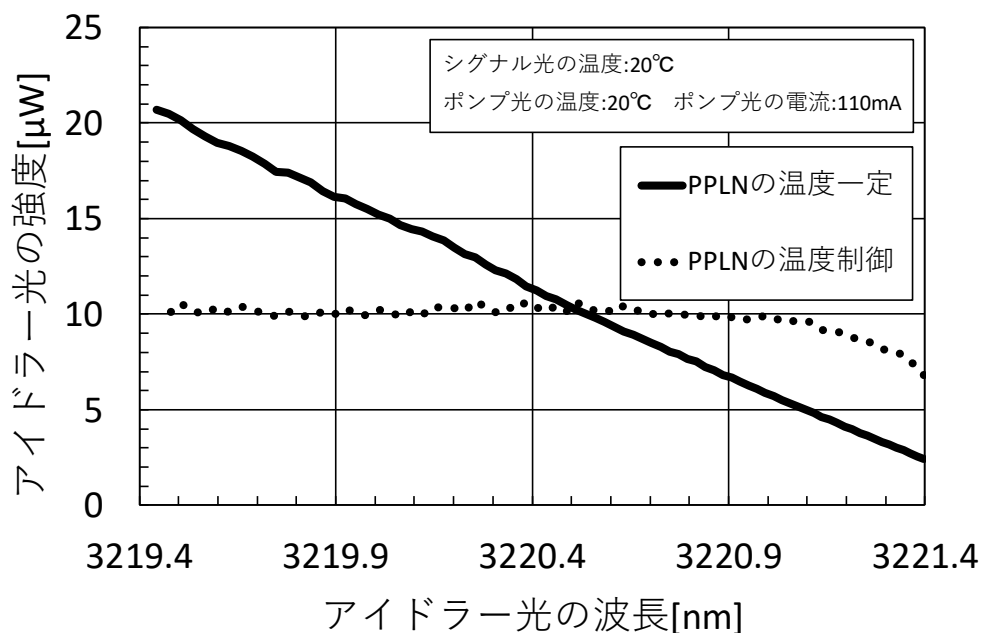


図 3.9 アイドラー光の強度一定で波長掃引

第5章 まとめ

1. まとめ及び考察

アイドラー光の強度を一定で掃引するために、アイドラー光の強度と波長を変化させる各DFBレーザーの電流と温度、PPLNの温度との関係を調べた。5つのパラメーターのうち、シグナル光の電流とPPLNの温度の2つのパラメーターを使ってアイドラー光の強度を一定で掃引することができる組み合わせを決定した。シグナル光の電流とPPLNの温度を同時に変化させることによって $10.2 \pm 0.5 \mu\text{W}$ で強度一定のまま約1.7nm波長掃引できることが確認できた。

本研究によってレーザーの強度を一定にすることが可能となり、強度一定のまま波長掃引をして吸収線を測定できると考える。また、本研究ではシグナル光の電流とPPLNの温度の2つのパラメーターを使用しているが、その他のシグナル光の温度とポンプ光の電流温度の3つのパラメーターも使用して、掃引幅を長くして波長掃引できることができると考える。

謝辞

本研究に際して、国立高等専門学校、由井四海教授にご指導ならびに様々な経験をする機会を頂きました。心より深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 環境メカトロニクス営業部「赤外線の話」
- [2] TOWA レーザーフロント株式会社 「レーザーの基礎知識」
- [3] ファイバーラボ株式会社 「半導体レーザ(LD)・レーザーダイオードとは」
- [4] 黒澤宏 「入門まるわかり非線形光学」オプトロニクス社 2018
- [5]
- [6] THORLABS 赤外域(IR)バンドパスフィルタ FB3250-500
- [7] M.Abe,*et al.* , Dual wavelength 3.2- μm source for isotope ratio measurements of $^{13}\text{CH}_4/^{12}\text{CH}_4$
Optics Express,23,21788,2015.
- [8] NTT Electronics Corporation,PPLN module data sheet.