

富山高等専門学校 専攻科
平成30年度

特別研究報告



研究題目 爆薬蒸気検出用中赤外レーザー

光源システムの開発

指導教員 由井 四海

提出者 制御情報システム工学専攻

今井 大志

平成31年2月27日 提出

内容

第1章 序論	4
1. はじめに.....	4
2. 光と物質.....	4
2.1. 光とは.....	4
2.2. スペクトル.....	5
2.3. 分光法.....	6
3. 爆発について.....	7
3.1. 定義.....	7
3.2. 爆燃・爆ごう.....	7
3.3. 爆発物・爆薬の分類と特性.....	8
4. 従来のガス検知方法.....	9
4.1. テロ対策のための爆発物探知.....	10
4.2. トレース検知.....	11
4.2.1. 爆発物探知犬.....	12
4.2.2. 抗原抗体反応.....	13
4.2.3. イオンモビリティ.....	14
4.2.4. マイクロセンサー.....	15
4.3. バルク探知.....	15
4.3.1. X線2調波.....	16
4.3.2. X線後方散乱.....	17
4.3.3. 近赤外光.....	17
4.3.4. 蒸気圧.....	18
第2章 レーザー	21
1. 概要.....	21
2. 原理.....	21
3. レーザー光の性質.....	22
4. 半導体レーザーの発光方法.....	23
5. 半導体レーザーの種類.....	23
5.1. ファブリ・ペローダイオードレーザー.....	23
5.2. 分布帰還型(DFB)レーザー.....	24
5.3. 外部共振型ダイオードレーザー(EC-LD).....	24
第3章 理論	26
1. 赤外線検出.....	26

1. 1. 放射源	26
1. 2. 伝達系	27
1. 3. 光学系	28
1. 4. 検出素子.....	30
1. 5. 信号処理.....	30
2. 検出素子の性能評価について	30
2. 1. 受光感度.....	30
2. 2. 雑音等価電力(NEP:Noise Equivalent Power)	31
2. 3. D^* について	31
3. 赤外線検出素子の種類	32
4. 分子吸収線データベース	34
5. 差周波発生 (DFG : Difference Frequency Generation)	34
5. 1. 概要.....	34
5. 2. 原理.....	34
5. 3. 位相整合.....	36
5. 4. 疑似位相整合	38
6. 周期的分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN : Periodically Poled Lithium Niobate) ...	39
7. 光吸収分光法.....	39
8. ジニトロベンゼン (DNB) について.....	40
8. 1. 化学構造体・化学式	40
8. 2. DNB の異性体の吸収線.....	40
第4章 実験	42
1. 目的	42
2. 実験装置.....	42
2. 1. 使用機器.....	42
3. 光源の特性	43
3. 1. レーザーの電流-波長特性	43
3. 2. レーザーの電流-強度特性	45
3. 3. バンドパスフィルター	47
3. 4. レーザー光による光ファイバの損傷.....	47
3. 5. ガウシアンビームの集光.....	51
3. 6. PPLN の変換効率.....	51
4. 手法・手段	53
5. 研究内容	54
5. 1. アイドラー光の波長の補正	54
5. 2. アイドラー光を強度一定で連続波長掃引.....	55

6. 結果	58
6.1. アイドラー光の波長の補正	58
6.2. アイドラー光を強度一定で連続波長掃引	60
第5章 まとめ及び考察	64
第6章 謝辞	64
参考文献	65

第1章 序論

1. はじめに

アメリカ同時多発テロ事件以降、各国では空港での保安調査の強化に取り組んできた。

しかし、最近の調査では95%の確率で武器や爆発物を発見できていないことが判明した[1]。

一般に、爆発物検知では複数の装置が組み合わせられ使用されるが、一部の装置では検査の過程で時間がかかり、荷物の全数調査を行う事が出来ていない[2]。しかし、光吸収分光法を用いたガス計測を行えば、サンプリングが不要で高速な測定が実現できる。

爆発物検知には、爆薬に広く使用されるトリニトロトルエン(TNT)の検知を目標とするが、本研究では、TNTの取り扱いが困難なことから、吸収スペクトルのピーク波長が近く、比較的取り扱いの容易なジニトロベンゼン(DNB)を光吸収分光法によって測定する光源システムの開発を行う。

2. 光と物質

2.1. 光とは

光とは基本的には、人間の目を刺激して明るさを感じさせるものである。17世紀には、光は微少な粒子の流れであるとするニュートンの量子説と、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周波数で区別したものを図 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ながい赤色の波長は 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は異なり、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。

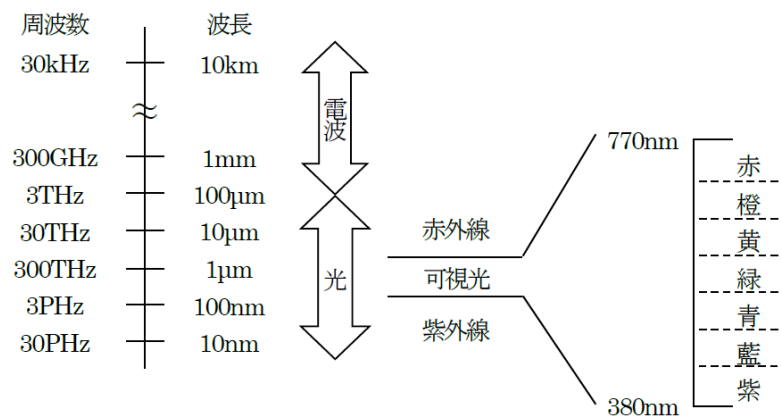


図 1 光の波長と周波数[3]

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。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。

図2に光と物質の関係を示す。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、光が物質との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に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。

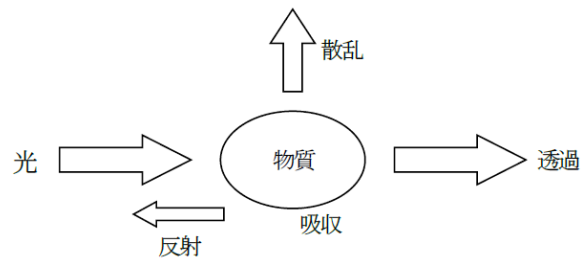


図2 光と物質の関係

3. 爆発について

3.1. 定義

爆発とは、エネルギーの短時間で急激な開放のことである。その結果、熱、光、音などと共に破壊作用が伴う。爆発のエネルギー源として、急激な化学反応、高圧ガス容器の破壊、核反応などがある。

3.2. 爆燃・爆ごう

化学爆発は、その反応の速さによって爆燃と爆ごうの2つに分類される。反応面の伝播する速度が毎秒100m以下の比較的遅い爆発のことを爆燃といい、伝搬速度が毎秒数kmと高速な爆発を爆ごうという。爆ごう反応は、化学反応帯と呼ばれる部分で化学反応がきわめて短時間で完結し、そこは高温、高圧となり超音速で伝播し、衝撃波を伴う。

爆ごう波面で発生する圧力は数10万気圧（数10GPa）なので、爆発の破壊力は極めて大きくなる。図3に爆薬の化学爆発を示す。

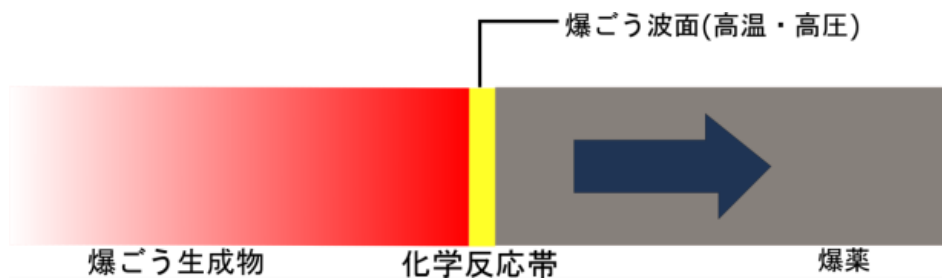


図3 爆薬の化学爆発

3.3. 爆発物・爆薬の分類と特性

爆燃物質は、解放状態では、ほぼ大気圧で緩やかに燃焼する。この場合、熱や光は発生しない。しかし、これを密閉強度の高い容器に詰めて着火すると内圧が上昇し、反応面の伝播速度は急激に大きくなり、容器は破壊され、生成ガスは容器外部に急激に膨張して、大きな音を伴う爆発となる。なお、開放状態にあっても、爆燃物質が大量に存在すると、重力が密閉効果を生み、爆燃から爆ごうへと移転することがある。また、爆薬の分類として、一次爆発、二次爆発、三次爆発が存在する。一次爆薬は、非常に鋭感であり、通常取り扱いで容易に起爆して爆ごうを起こす物質のことをいい、二次爆薬は、弱いエネルギーでは爆発を起こさず、一次爆薬により起爆された場合に爆ごうを起こす物質、三次爆薬は、二次爆薬の爆ごうなどにより、大きなエネルギーを与えることで爆ごうを起こすような鈍感な物質のことをいう。表1に爆発物の分類と特性を示す。

表 1 爆発物の分類と特性

分類	爆燃物質	爆ごう物質		
	火薬	一次爆薬	二次爆薬	三次爆薬
物質例	黒色火薬 無煙火薬	有機過酸化物 アジ化鉛 DDNP	TNT RDX ニトログリセリン ダイナマイト 含水爆薬	硝酸アンモニウム ニトロメタン
圧力(気圧)	容器の密閉強度に 依存する	数1,000～数100,000		
用途	推進薬、発射薬	発破などの破壊作用に利用する 地雷、魚雷		

4. 従来 of ガス検知方法

図 4 に TNT の吸収線を示す。図 4 より、TNT には 6.4 μm 付近で吸収度の大きいスペクトルが見られる。吸収スペクトルは周期的に存在するため、本研究では、光学的特性を総合的に比較して 3.2 μm 付近の中赤外領域の DNB の吸収の測定する光源のシステムの構築とその開発を目標とする。また、TNT のような爆発物を測定するためには様々な手法がある。ここでは、その方法と特徴を述べる。

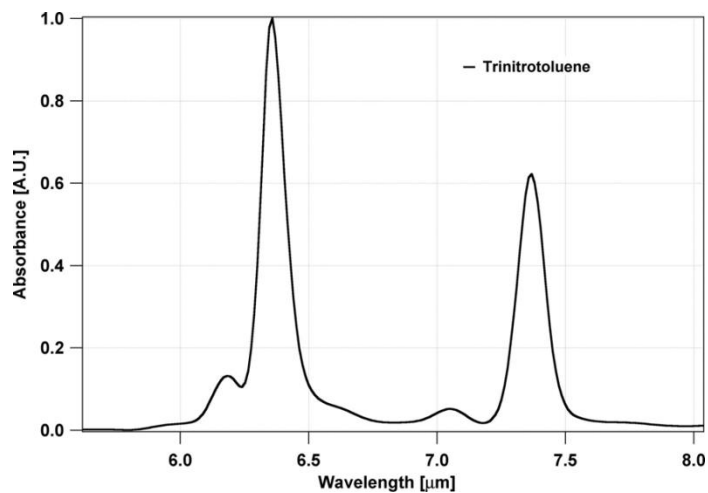


図 4 TNT の吸収度

4.1. テロ対策のための爆発物探知

図 5 に爆発物探知の種類、図 6 に現在、実用化されているものや、実用化のための研究がなされているものの爆発物探知装置の分類を示す。

テロ対策のための爆発物探知は、航空機の乗客の手荷物や、液体物の検査、重要施設入口で爆発物が持ち込まれてないかの検索など、それぞれの目的に応じた探知装置、システムを用いることになる。その中で爆発物探知は大きく 2 つに分けることができる。爆薬蒸気や指紋などとして付着する微量の爆薬成分を対象に高感度分析を行うトレース探知と、爆薬のかたまりそのものをみつけるバルク探知がある。トレースは「痕跡、あるいは極微量」、バルクは「固まり」という意味である。テロで使用される爆発物は、その種類も広範にわたり 1 つの探知装置で全てカバーできるわけではない。さらに、液体爆薬のように新たな脅威として出てくるものもある。そこで、複数の装置を組み合わせる必要があると考えられる。

爆発物がある場合は高い確率で発見し、爆発物がない場合の誤報を低減する高選択性、高検出率、低誤報率などが求められる。例えば、空港でのスーツケースなどに対して、X 線 CT 装置に送り、そこでさらに危険と判断したら、トレース検知や X 線回折などによる爆薬の同定を行う。これらを人が画像などで判断するのではなく、一連の流れとしてコンピューター処理による全自動判定システムが提案検討されている。すでに国内国際空港でも、スーツケースなどをベルトコンベア上で流しながら、これらの検査を自動的に行うインラ

イン検査システムが導入されている。

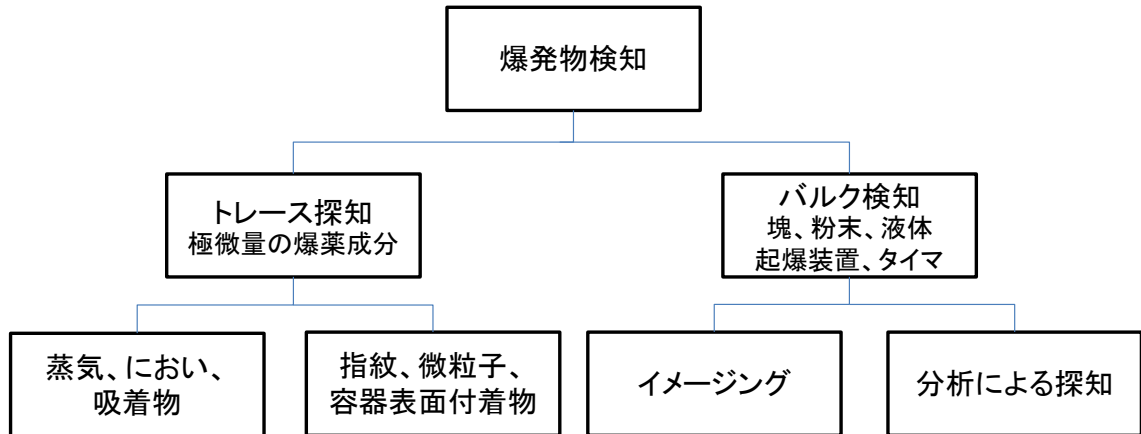


図5 探知の種類

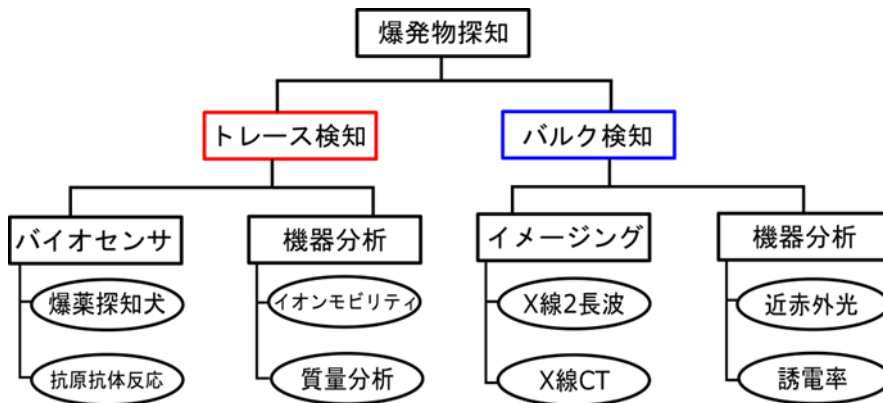


図6 爆発物探知装置の分類

4.2. トレース検知

トレース検知は、分析化学的な手段によって、重さで言えば、ng や pg という単位で化学物質の痕跡を探す。濃度で言えば ppb から ppt の単位であり、例えとして、50m の競技用プールに砂糖小さじ一杯を溶かした濃度が 1ppb である。

爆薬を取り扱えば、取り扱った人物の手や服などに爆薬の痕跡(粒子やにおい)が残る。また、この人物の手や服などが触れた部分にも、次々と痕跡が転写されていく。これらの痕跡を調べることで、検査対象者が最近爆薬を取り扱ったかどうかや爆薬を隠していないか見分けることができる。

トレース検知に用いられる手法は多種多様であるが、すべての手法には一長一短がある。以下では、前項の探知装置の分類について紹介をするとともに、実用化されているものについて手法を中心に詳しく示す。

4.2.1. 爆発物探知犬

犬の鼻がどの程度の能力を持っているかについては、諸説あってはっきりしておらず、においの種類によっても異なると考えられている。犬の嗅覚はレセプターに1fmol(10⁻¹⁵mol)の物質が付着するとにおいを感じるとされており、濃度感度で表すと概ね1ppb程度とされている。また、爆発物を見つける場合、犬は爆薬の主成分を嗅いでいるのではなく、爆発物の製造工程で用いられる独特の有機溶剤や添加剤などを嗅いでいるのではないかとする報告もある。

例えば、花火のように無機物からなるものは、蒸気圧は極端に低いため、トレース探知は蒸気検知でも微粒子探知でも困難であるが、犬の場合、何か花火に共通のにおいで嗅ぎ分けられる可能性も考えられる。

犬の優れている点は、不審に思われる部分に自ら接近し、直接センサー(鼻)を近づけると
いう点である。高性能のセンサーでも、蒸気発生源から離れて使用したのでは、蒸気が大
気中に拡散して薄まるので、十分な能力を発揮できないが、犬は経験により場所を自ら判
断することが可能である。

一方、犬の欠点は、当然生き物であるため、個体差があることである。実際に訓練して
も、成績の高いものとそれほど高くないものが存在する。また、時間、気分などにも影響
されると考えられる。

4.2.2. 抗原抗体反応

爆薬分子と選択的に結合する抗体および鑄型分子認識膜を、表面センサーと組み合わ
せてセンサーシステムとする。捕集方法は各種考えられるが、例えば、手荷物などを専用の
フィルターで拭き取り、サンプルを採取する。付着したサンプルを溶媒に溶かし、センサ
ーにより測定を行う。

一例として、表面プラズモン共鳴センサーは、金薄膜状に鑄型分子法や抗体で認識膜を
作ることで、微量のターゲットとした爆薬分子の検出を可能とする。このセンサーは屈折
率計として使用し、金薄膜状の微量な質量変化を屈折率の変化としてとらえる。

しかし、燃料をいったん溶媒に溶かすため、測定に時間を要することや、反応が特異的
なので多種の爆薬に対する抗体をそれぞれ作る必要や、センサー寿命などの問題点がある。

4.2.3. イオンモビリティ

イオンモビリティ法(Ion Mobility Spectroscopy :IMS)は、ガス成分の簡易分析法の1つである。IMSに基づく爆発物探知機は、トレース探知装置としては、最も広く使われている。

まず、資料ガスを吸引し、ガス成分や粒子を捕集材に付着させる。捕集材はヒーターによって加熱され、捕集材から離脱した成分は反応領域に送られ Ni の β 線などのイオン源によってイオン化される。得られたイオンは、ゲートにより、一定時間ごとに加速電場が形成されているドリフト領域に導入される。イオンは対向ガス流(ドリフトガス)の中を移動して検出電極にて検出される。電圧を印加してイオンをドリフト領域に導入した時間を基準に、信号が得られるまでの移動に要する時間を計測する。各々のイオンの質量や大きさ、形により、電界中での加速度やイオンが受ける空気抵抗が異なるので、検出電極への移動時間にずれが生じる。この時間をドリフトタイムというが、ずれは数 ms から数 10ms 程度である。このように、IMS ではイオンが大気中を移動する際の移動度(Mobility)の違いにより物質を識別する。機種によっては、イオン化効率を高めたり、識別性を高めるために、反応性のドーパントガスを導入するものもある。

IMS の長所は、反応が速いことと、真空が不要で装置が小型・安価で携帯性に優れていることである。爆発物探知の場合、ガスの吸引から 5 秒程度で信号が得られる。

一方、IMS の短所は、選択性の範囲は分子量に変換すると約 10 程度であり、似たような成分が存在した場合には、誤報を発することになることである。

4.2.4. マイクロセンサー

最近のナノテクノロジーの進歩により、センサーの汎用化、小型化がすすめられており、プロトタイプも次々と発表されている。においの検出が主であるが、吸引した空気を濃縮、成分分離、検出するといった一連のプロセスを 1 枚の基板上に作り上げるものである。これにより、小型化であり、持ち運び可能にしてかつ多種類の爆薬に適当な感度及び選択性をもって対応可能にし、低価格化を目指している。

検出部分は、マイクロセンサー(microsensors)とよばれ、半導体製造技術の応用により、技術開発が進められている。超小型イオンモビリティ検出器や表面弾性波検出器(SAW)などが実用機として出てきている。

4.3. バルク探知

バルク探知は、人、手荷物や貨物などの中に、爆薬が隠されていないかを調べるもので、主に透過的な方法で爆薬の固まりがあるかをみる方法が使用されている。

X 線透過像による保安調査が昔から使用されているが、これは銃器、刀剣類などの金属製品の所持を調べるものである。花火のような無機塩を成分とするものは除いて、ダイナマイトや TNT のような大部分の爆薬は有機物であり、X 線は透過するため、像として捕えることはできない。これを識別可能にするため X 線を用いた方法として、エネルギーの異なる X 線を用いて、その吸収率の差から実効原子番号を求め判別したり、軽元素に感度のあ

る X 線後方散乱や、断層画像を解析可能な X 線 CT により材質識別を行う方法、爆薬の結晶構造から識別する X 線回折などの新しい方法が実用化されてきている。最近でもさらにバッグ内の液体爆薬を開披しないで調べる方法などが開発、改良されてきている。

一方、人の検査などでは、X 線を照射することが問題とされることがあり、別の電磁波を用いた検査方法が使用されてきている。さらに、新たな危機として、液体物などには、分光学的な方法や、他の物理的方法により回査することなく一般の飲料と識別する方法が実用化されてきている。

なお、バルク検知における化学的分析は、トレース探知と異なり、ある程度の量がないと識別困難である。イメージングによる装置を含めて、どのくらいの検出下限限界量が必要であるかについては、装置の使用目的、脅威物の使われ方などによるが、一般的には、おおよそ 100g 前後からそれ以上の爆薬を見つけることをバルク探知とする。

4.3.1. X 線 2 調波

1 つの波長(エネルギー)だけの X 線像からは、X 線の吸収が物質の密度、厚み(透過距離)、実効原子番号の因子から像の濃さが決まるために、材質の識別は困難である。これを例えれば検出器の前にフィルターを置いて異なる波長区分で像をそれぞれ得ることができると、波長により物質の吸収度合いが異なることから材質のある程度の識別が可能となる。実際の装置では、有機物、無機物および金属の識別を行い、それぞれに画面上で色をつけて違

いをわかりやすくした装置が使用されている。さらには、これを応用して、X線源をさらに複数使用して、その像の形状をみやすくしたり、材質識別の精度を上げた、AT機とよばれるものが出てきている。これにより、より簡単な装置で爆薬の判定制度をあげ、誤報率を下げるのが可能となっている。

4.3.2. X線後方散乱

X線の透過では、銃器や刃物のような金属、ガラス瓶などはみられても、爆薬や樹脂などの有機物は原子番号が低く、吸収が少ないため像としてとらえられることは難しい。

そこで、透過するX線を画像化するのではなく、コンプトン散乱したX線を画像化するX線後方散乱法が使われている。コンプトン散乱X線は主に、有機物などの軽元素との相互作用によって多く発生するので爆薬についても可視化することができる。つまり金属のような原子番号の大きい物質は、X線の吸収により透過像で高いコントラストを得ることができるのに対して、爆薬のような原子番号の小さい物質は、効果的にX線が散乱するので、この散乱像を得ることにコントラストの高い像を得ることができる。後方散乱X線を用いることにより、有機物の存在する場所及び形状をあきらかにすることができる。

4.3.3. 近赤外光

光を液体に照射して、液体中を散乱、反射して戻ってくる光の液体物による波長 $1\mu\text{m}$ 付

近の近赤外光の吸収スペクトルを解析することにより、物質の同定、濃度の推定を行う装置が開発検討されている。もともとこの装置は、近赤外光の波長が糖の分子の振動エネルギーに相当するので、果実を傷つけずに果実内部の糖度を測る装置に応用されている。容器の材質、形状、内容物の濃度など、データベースとのスペクトルデータ処理を行って成分とその濃度が推定可能となる。

4.3.4. 蒸気圧

爆薬の蒸気(におい)として探知する際には、室温付近での爆薬の蒸気圧が重要である。表 2 に爆薬成分の分子量と 25°Cでの蒸気圧を示す。ニトログリセリン、ニトログリコールおよび DMNB は室温(25°C)で ppn(10⁻⁶,10⁻¹Pa)レベルの蒸気圧を示す。ダイナマイト、無煙火薬、プラスチック爆薬、の探知材などの成分として使用されており、蒸気探知は容易であるといえる。TNT、硝安、硫黄などは、室温における蒸気圧は ppb(10⁻⁹,10⁻⁴Pa)レベルで、蒸気による探知はやや難しくなる。この蒸気濃度は、TNT で約 0.1ng・cm⁻³ であり、指紋 1 個には約 1,000ng 程度付着していることが知られており大きな差がある。そのため探知装置の感度によっては蒸気による探知は困難で、拭き取りによる爆薬粒子の探知を行う事になる。TNT は軍用爆薬では最も多く使用されており、蒸気の探知ができるようにすることは重要である。

黒色火薬、花火などは無機成分からなり、蒸気による探知は難しいが、硫黄が成分とし

て含まれることが多く、硫黄の蒸気を探知可能にすれば、これらの火薬の探知に応用できる。

RDX、PETN、Tetryl は ppt レベルとなり、蒸気による探知は非常に困難となる。これらはプラスチック爆薬としても使われるが、その蒸気による探知の困難さのために、探知剤が添加されることになったものである。

爆薬成分の気温による蒸気圧の変化を図 7 に示す。単一化合物の温度と蒸気圧は、Clapeyron-Clausius の関係が知られており、温度上昇と共に蒸気圧も上昇する。例えば室温付近では、20°C変化すると数十倍、40°Cの温度上昇では百倍前後も蒸気圧が変化する。このことは冬の屋外など低温での蒸気探知について注意が必要である。また、探知すべき物の表面に温風を吹き付けることにより、蒸気圧を上げて探知感度を上げることに応用されている。

現在の探知装置では、ppt レベルの爆薬蒸気探知が限界であり、TNT などでは気温が高ければ、蒸気探知も可能であるが、低温になると粒子探知でないと装置の感度によっては探知不可能になることになる。

表 2 爆薬成分の分子量と 25°Cでの蒸気圧

物質	記号	分子量(式量)	25°Cの蒸気圧[Pa]
硫黄	S	256.52	0.00022
ジニトロトルエン	2,4-DNT	182.13	0.028
ニトログリコール	EGDN	152.06	10.4
硝酸アンモニウム	AN	80.04	0.0013
ジニトロブタン	DMNB	176.17	0.276
トリアセトントリ パーオキシサイド	TATP	222.24	7.87
ニトログリセリン	NG	227.09	0.073
ヘキサメチレンペル オキシジアミン	HMTD	208.17	0.027
トリニトロトルエン	TNT	227.13	0.0012
ピクリン酸	PA	229.1	2.55E-05
ヘキソーゲン	RDX	222.12	2.31E-06
オクトーゲン	HMX	216.96	3.80E-13
テトリル	Tetryl	287.14	7.60E-07
ペンスリット	PETN	316.14	7.05E-07

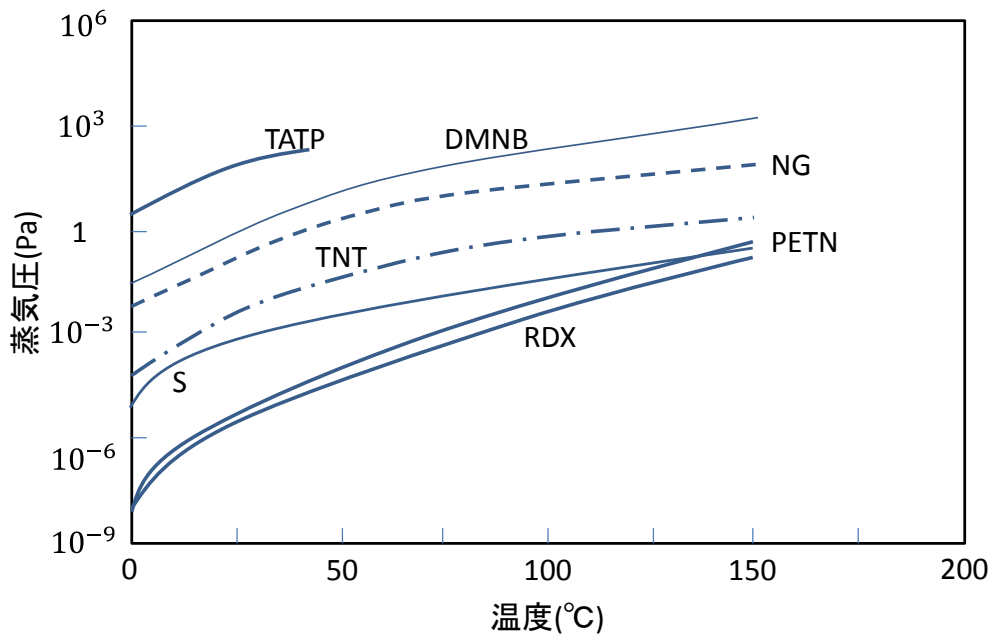


図 7 爆薬成分の蒸気圧-温度曲線

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たものである。1960年にアメリカのセオドア・ハロルド・メイマンはルビーを使って 694.3nm の光の発振に初めて成功した。現在では非常に多くの物質でレーザー発振が実現されており、その発振波長も 100nm 付近から数 mm までの広い範囲に及んでいる。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、および半導体レーザーなどに分類される。半導体レーザーの媒質は固体であるが、励起方法とエネルギー準位が他の固体レーザーと異なるため、固体レーザーと分けて考える。

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、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。

3. レーザー光の性質

レーザー光の特徴として、指向性、可干渉性、集光性、単色性、制御性がある。指向性とは、光がほとんど広がらずに真っ直ぐ進むことをいう。干渉性とは、光の位相がそろ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いう。集光性とは、光をレンズを用いて光を集中させる場合において容易に 1 点に集中させることができることを言う。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光（波長、周波数）の光であることをいう。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任意に変えることが可能であることをいう。

レーザーは原子の中の電子の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る。レーザーとして利用できる原子の種類には限りがあるため、ある特定の波長のレーザー光を使いたくても、見あたらない場合が多い。レーザー光の性質である単色性は長所である一方で、レーザーの最大の欠点でもある。しかし、非線形光学効果を利用することで、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ようになる。

4. 半導体レーザーの発光方法

近赤外域半導体レーザーは主に CD や MD などの光記録媒体との情報の読み出し、書き込み用光源として市販されている。LD は、p-n 接合ダイオードからできている半導体素子である。ダイオードに順方向バイアスが印加されると、n 形領域からは電子、p 形領域からは正孔がそれぞれ活性領域に注入される。注入された電子と正孔が再結合して消滅する際に活性領域のバンドギャップエネルギーにほぼ相当する波長の発光が起こる。市販の LD の活性材料には一般的に GaAlAs 結晶などの直接遷移型半導体が用いられる。光共振器には、p-n 接合に垂直な 2 枚の反射鏡からなるファブリ・ペロー共振器で構成される。また、市販の LD では一般的にダブルヘテロ構造が用いられている。クラッド材料を活性材料より広いバンドギャップを持つ材料を選ぶことで、バンドギャップ差によって生じたエネルギー障壁のために電子・正孔は活性層内 ($\approx 0.1\mu\text{m}$) に閉じ込められる。また、活性・クラッド材料間の屈折差から、光は増幅作用のある活性領域に導波される。これらの理由より、低閾値・高効率の発振が可能となる。

5. 半導体レーザーの種類

5.1. ファブリ・ペローダイオードレーザー

レーザー発振が最も簡単な共振器構造がファブリ・ペロー発振器である。ファセットミラーとなる反射率の鏡を 2 枚対向させ、フィードバックをこれらの鏡で行わせてレーザー

発振を起こす。出力する光信号の幅が広く、構築費用が比較的安価である。

5.2. 分布帰還型 (DFB) レーザー

図 8 に DFB レーザーの概念図を示す。DFB レーザーは、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。しかし、各波長で違う分布帰還型レーザーを必要とする。なお、DFB レーザーは、本研究で使用するレーザーである。

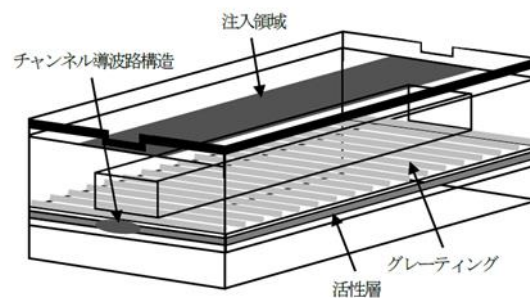


図 8 DFB レーザーの概念図[4]

5.3. 外部共振型ダイオードレーザー (EC-LD)

図 9 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、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。

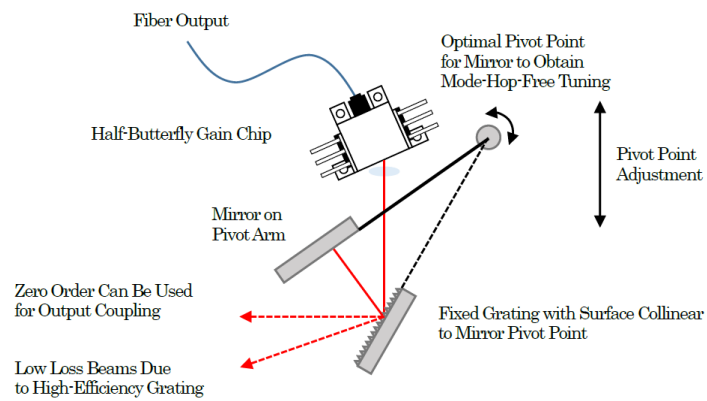


図9 リットマン型外部共振器型半導体レーザー構成[5]

第3章 理論

1. 赤外線検出

赤外線とは、可視光より長い波長 $0.75\mu\text{m}$ から、 $1000\mu\text{m}$ までの電磁波をいう。 $0.75\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ の波長を近赤外光、 $3\mu\text{m}\sim 6\mu\text{m}$ の波長を中間赤外光、 $6\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ の波長を遠赤外光と称されることがある[6]。

赤外線には、人間の目には見えない、エネルギーが小さい、波長が長い、絶対温度が 0K 以上の全ての物質から放射されているといった特色がある。

赤外線を利用する分野は広く、新しい用途が次々に開拓されている。赤外線の検出系は、一般には図 10 のような構成になる。

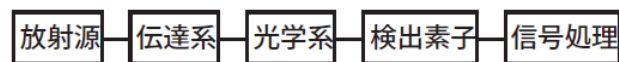


図 10 赤外線の検出系

1.1. 放射源

前に述べたように、絶対温度 0K 以上の物体はすべて赤外線を放射している。例えば、 $310\text{K}(37^\circ\text{C})$ の人体は 10μ 付近にピーク波長をもつ赤外光を放射している。放射源としては、黒体炉、タングステンランプなどの発熱体が用いられる。また、特定波長の赤外線だけを放出する赤外線レーザーもある。

放射源について注意しなければならないのは、放射源以外に地上では 300K の背景放射が

あることである。3 μm 以上の測定系では、この背景放射のゆらぎを無視できなくなる。こ

の種の雑音を小さくするためには、コールドシールドやコールドフィルタを使用する。

図 11 に主な赤外線レーザーの発振波長領域を示す。

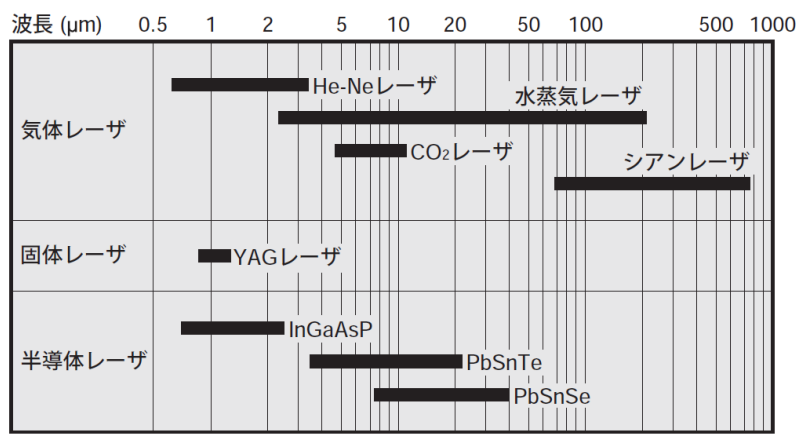


図 11 主な赤外線レーザーの発振波長領域

1.2. 伝達系

伝達系としては、真空、大気、光ファイバが考えられる。大気では H₂O、CO₂ などによって特定波長に吸収がある。吸収の少ない 3~5 μm 帯、8~12 μm 帯は大気の窓と呼ばれ、リモートセンシングに使われている。図 12 に光ファイバの理論伝送損出を示す。図 12 より、光ファイバのうち石英系の光ファイバは減衰率がほぼ理論値に達している。

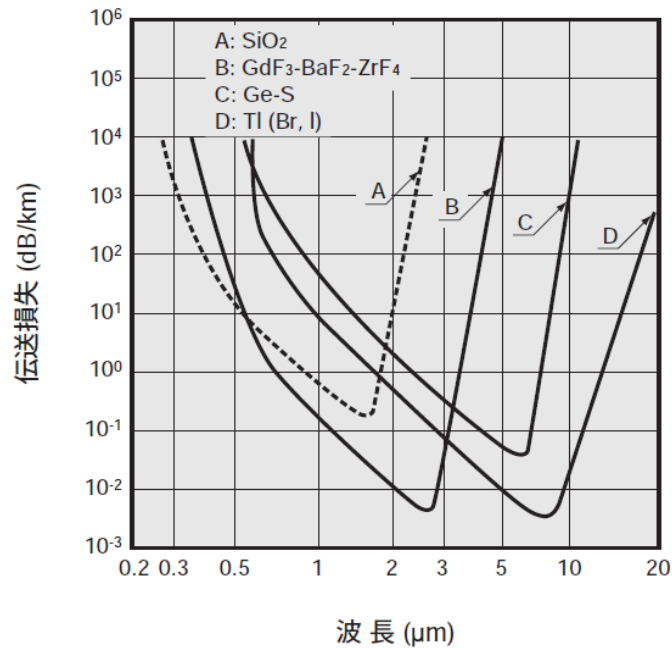


図 12 光ファイバの理論伝送損失

1.3. 光学系

赤外線を集光用としては、波長によって石英、CaF₂、Ge、ZnSe あるいはポリエチレンのフレネルなどのレンズ、さらに Al、Au などのミラーが使われる。また、特定波長だけを利用するためのバンドパスフィルターや赤外線を ON-OFF するためのチョップなどが必要な場合もある。

バンドパスフィルターを設計する時には、中心波長、半値幅(FWHM)、5%透過率幅のほか、サイドバンド、使用する波長以外での 2 次的透過波長、透過率も考慮する必要がある。なお、これらの特性は使用する温度や、入射する光の角度によっても変化する。

図 13 に主な赤外線用光学系の透過率、図 14 にバンドパスフィルターの透過特性を示す。

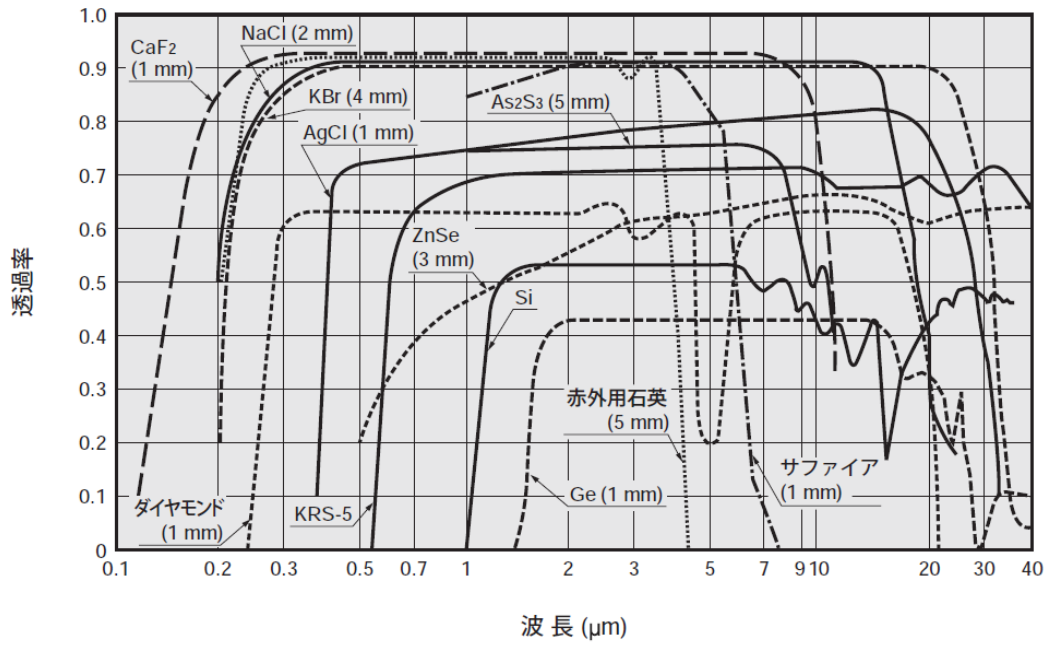


図 13 主な赤外線用光学系の透過率

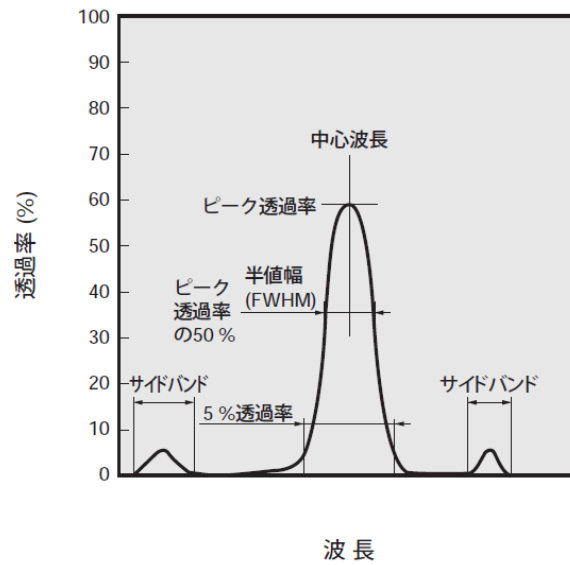


図 14 バンドパスフィルターの透過特性

1.4. 検出素子

検出素子には波長依存性のない熱型と、波長依存性のある量子型がある。プランク定数を h 、光速を c 、波長を λ 、とした時の赤外線のもつエネルギーは式(1-1)で表される。

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} [\text{eV}] \quad (1-1)$$

赤外線は、 $1\mu\text{m}$ で 1.24eV 、 $10\mu\text{m}$ で 0.12eV と紫外線や可視光に比べエネルギーが小さいので、検出効率を上げるためには検出素子を冷却する必要がある。また、検出素子の性能を示すものに、受光感度、NEP、 D^* がある。

1.5. 信号処理

検出素子からの信号出力は極めて小さいため、増幅する必要がある。増幅器の設計にあたっては、検出器とのインピーダンス整合、低雑音、帯域に留意する必要がある。入射光がチョッパなどによって変調されている場合には、同調増幅器を使用することが有効である。また、検出素子が冷却されている場合には、増幅器の冷却も有効である。

2. 検出素子の性能評価について

2.1. 受光感度

受光感度は雑音を考慮しないときの 1W あたりの出力電圧である。出力信号電圧を S 、入射エネルギーを $P (\text{W}/\text{cm}^2)$ 、検出素子の受光面積を $A(\text{cm}^2)$ とした時の受光感度 R は式(1-2)で

表される。

$$R = \frac{S}{PA} [V/W] \quad (1-2)$$

なお、光起電力素子の場合、一般的に信号は光電流として取り出すため、受光感度の単位は A/W である。

2.2. 雑音等価電力 (NEP: Noise Equivalent Power)

NEP は雑音量に等しい入射光量、つまり信号対雑音(S/N)が 1 となる時の入射光量で示す。ノイズ出力電圧を N 、雑音帯域幅を Δf としたとき NEP は式(1-3)で表される。

$$NEP = \frac{PA}{S/N \cdot \sqrt{\Delta f}} [W/Hz^{1/2}] \quad (1-3)$$

2.3. D^* について

D^* は 1W の光入力があった時の、検出素子の交流的な S/N がどれだけあるかを示す。検出素子の面積によらずに材料の特性そのものを比べられるように検出素子面積 1cm^2 、雑音帯域 1 Hz で規格化されている。 D^* の表示は一般に $D^*(A,B,C)$ のように表し、A は光の光源の温度[K]または、波長[μm]、B はチョッピング周波数[Hz]、C は雑音帯域幅[Hz]を意味する。単位は $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ で、 D^* が高いほど、よい検出素子であるといえる。信号を S 、雑音を N 、入射エネルギーを P 、受光面積を A 、雑音帯域幅を Δf [Hz]とした時 D^* は式(1-4)で表される。

$$D^* = \frac{S/N \cdot \Delta f^{1/2}}{P \cdot A^{1/2}} \quad (1-4)$$

また、 D^* と NEP の間には式(1-5)の関係が成り立つ。

$$D^* = \frac{A^{1/7}}{NEP} \quad (1-5)$$

なお、検出素子の選択の際は、検出感度の他、使用波長、応答特性、冷却方法、素子面積、形状、素子数を考慮する必要がある。

3. 赤外線検出素子の種類

赤外線検出素子を大きく分けると、熱型と量子型に分類できる。熱型検出素子は感度に波長依存性がなく、冷却を必要としない。しかし、応答速度が遅く、検出能力はあまり良くないといったデメリットもある。また、量子型検出素子は、検出能力が高く、応答速度が速い反面、感度に波長依存性があり、近赤外域の検出素子を除いて一般に冷却して使用しなければならない。図 15 に赤外線検出素子の分類と特性を示す。図 16 に赤外線検出素子の分光感度特性を示す。

分類		検出器	波長範囲 (μm)	動作温度 (K)	D* (cm · Hz ^{1/2} /W)	
熱型検出素子	サーモカップル・サーモパイル ボロメータ ニューマチックセル 焦電素子	ゴーレイセル、コンデンサマイクロホン PZT, TGS, LiTaO ₃	窓材による	300	D* (λ, 10, 1) = 6 × 10 ⁸	
				300	D* (λ, 10, 1) = 1 × 10 ⁸	
				300	D* (λ, 10, 1) = 1 × 10 ⁹	
				300	D* (λ, 10, 1) = 2 × 10 ⁸	
量子型検出素子	真性型検出素子	光導電型	PbS	1~3.6	300	D* (500, 600, 1) = 1 × 10 ⁸
			PbSe	1.5~5.8	300	D* (500, 600, 1) = 1 × 10 ⁸
			InSb	2~6	213	D* (500, 1200, 1) = 2 × 10 ⁹
			HgCdTe	2~16	77	D* (500, 1000, 1) = 2 × 10 ¹⁰
		光起電力型	Ge	0.8~1.8	300	D* (λp) = 1 × 10 ¹¹
			InGaAs	0.7~1.7	300	D* (λp) = 5 × 10 ¹²
			Ex. InGaAs	1.2~2.55	253	D* (λp) = 2 × 10 ¹¹
			InAs	1~3.1	77	D* (500, 1200, 1) = 1 × 10 ¹⁰
	不純物型検出素子	Ge: Au Ge: Hg Ge: Cu Ge: Zn Si: Ga Si: As	1~10	77	D* (500, 900, 1) = 1 × 10 ¹¹	
			2~14	4.2	D* (500, 900, 1) = 8 × 10 ⁹	
			2~30	4.2	D* (500, 900, 1) = 5 × 10 ⁹	
			2~40	4.2	D* (500, 900, 1) = 5 × 10 ⁹	
		1~17	4.2	D* (500, 900, 1) = 5 × 10 ⁹		
		1~23	4.2	D* (500, 900, 1) = 5 × 10 ⁹		

図 15 赤外線検出素子の分類と特性

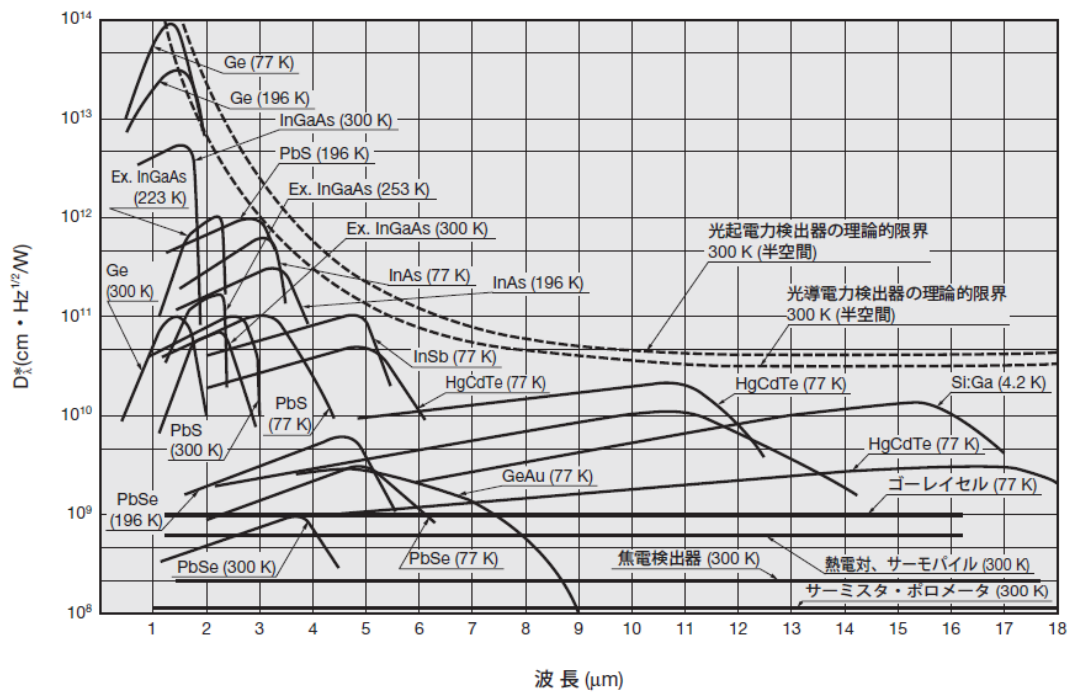


図 16 赤外線検出素子の分光感度特性

4. 分子吸収線データベース

気体検出のために、一本一本の吸収線に関する詳細な情報は必要不可欠なものである。

本研究では、水蒸気の吸収線を調べるために HITRAN データベース[7]、DNB の吸収線を調べるために NIST データベース[8]を利用した。HITRAN データベースは、High-resolution TRANsmission molecular absorption database の名前から簡略化された頭文字であり、大気成分を中心とした分子吸収線データベースのことである。

5. 差周波発生 (DFG : Difference Frequency Generation)

5.1. 概要

本研究で扱う PPLN は非線形光学効果のひとつである差周波波発生を利用し、波長 1064nm の励起光、1589nm の信号光に対し、3.2 μ m 帯の DFG 光を発生させるように設計されている。波長変換モジュールの構成は PPLN 導波路と、ペルチェ素子、サーミスタからなっており、温度コントローラを用いて精密温度制御することにより、所定の位相整合条件が実現される。

5.2. 原理

二次非線形感受率 $\chi^{(2)}$ を持つ非線形光学結晶の中に、 ω_1 と ω_2 の 2 種類の波長の光が入射した場合、 ω_1 と ω_2 の電界をそれぞれ E_1 、 E_2 とすると、入射する光の電界 E は式(5-1)で表さ

れる。

$$E = E_1 \sin(\omega_1 t) + E_2 \sin(\omega_2 t) \quad (5-1)$$

また、真空の誘電率を ϵ_0 とすると、二次非線形分極 P_{NL} は(5-2)式で表される。

$$P_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 \quad (5-2)$$

(5-1)式を(5-2)式に代入すると $\sin^2(\omega_1 t)$, $\sin^2(\omega_2 t)$, $\sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)$ の項が現れ、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、周波数で変化する項が含まれている。二種類の異なる周波数の光を結晶に入れた場合、第一項と第二項は第二高調波発生、第三項は和周波発生、第四項が本研究で用いる現象の差周波発生となる。

差周波発生とは、非線形光学媒質に周波数の異なる2つの光 ω_1, ω_2 を入射すると、その差周波数に相当する $\omega_3 (= \omega_1 - \omega_2)$ が発生する現象である。図17に差周波発生の配置とエネルギー関係を示す。なお、本研究では、 ω_1 (1589nm 帯)をポンプ光、 ω_2 (1064nm 帯)をシグナル光、 ω_3 (3.2 μm 帯)をアイドラー光と呼ぶ。

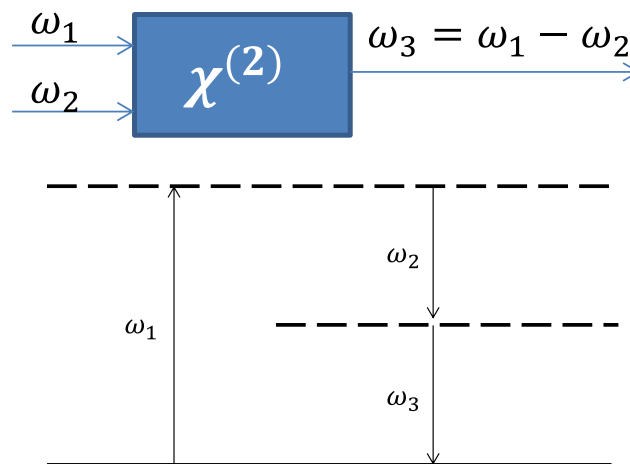


図17 差周波発生とエネルギー関係

5.3. 位相整合

分極 P は、 ϵ_0 を真空の誘電率、 $x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)} \dots$ をそれぞれ、線形感受率、二次非線形感受率、三次非線形感受率、光の電界を E とした時、一般的に式(5-3)で表すことができる。

$$P = \epsilon_0(x^{(1)}E + x^{(2)}EE + x^{(3)}EEE + \dots) \quad (5-3)$$

これらの非線形分極をまとめて P_{NL} とした時、分極 P は式(5-4)で表される。

$$P = P_L + P_{NL} \quad (5-4)$$

この非線形分極から生じる電界を E_{NL} とすると、非線形光学媒質に入射したレーザー光の電界が、媒質中に非線形分極 P_{NL} を発生させ、それが源となって新しく光電界 E_{NL} が発生する。このことは式(5-5)で表すことができる。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)E_{NL} - \epsilon\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}E_{NL} = \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}P_{NL} \quad (5-5)$$

非線形分極は、入射した光電界によって作られるので、媒質中を伝わる波として表すことができる。非線形分極波は角周波数 ω_{NL} 、波数 k_{NL} で z 軸方向に伝播すると仮定し、振幅を P_{NL0} とした時、非線形分極 P_{NL} は式(5-6)で表される。

$$P_{NL} = P_{NL0} \exp\{i(\omega_{NL}t - k_{NL}z)\} \quad (5-6)$$

波数は大きさと伝搬する方向を持っており、ベクトルで表される量となるが、今の場合は z 方向に伝搬する波として考えているため、角周波数が ω_{NL} における非線形媒質の屈折率 $n(\omega_{NL})$ とした時、式(5-7)で表される。

$$k_{NL} = 2\pi/\lambda_{NL} = n(\omega_{NL})\omega_{NL}/c \quad (5-7)$$

式(5-5)は、位相速度 ω_{NL}/k_{NL} でz方向に伝搬する波を表しているが、同時に新しい波の源を与えている。この分極 P_{NL} によって発生した光電界 E_{NL} は式(5-8)で表される。

$$E_{NL} = E_{NL0} \exp\{i(\omega_{NL}t - k(\omega_{NL})z)\} \quad (5-8)$$

式(5-6)と式(5-8)を式(5-5)に代入して発生した光電界の振幅 E_{NL0} は式(5-9)で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_{NL0} - 2ik(\omega_{NL}) \frac{\partial}{\partial z} E_{NL0} \\ = \mu_0 \omega_{NL}^2 P_{NL0} \exp\{i(k(\omega_{NL}) - k_{NL})z\} \end{aligned} \quad (5-9)$$

振幅の変化は小さいと仮定した時の光電界の振幅 E_{NL0} は式(5-10)で表される。

$$\frac{\partial}{\partial z} E_{NL0} = \frac{\mu_0 \omega_{NL}^2}{2k(\omega_{NL})} P_{NL0} \exp(i\Delta kz) \quad (5-10)$$

この式(5-10)は、非線形媒質の長さ L とにおいて積分した時式(5-11)で表される。

$$E_{NL0} = \exp\left(\frac{i\Delta kL}{2}\right) \frac{\mu_0 \omega_{NL}^2}{2k(\omega_{NL})} P_{NL0} \frac{\sin(\Delta kL/2)}{\Delta kL/2} \quad (5-11)$$

ここで、式(5-12)となる。

$$\Delta k = K_{NL} - k(\omega_{NL}) \quad (5-12)$$

この式(5-12)は入射光電界によって発生した非線形分極波の波数 K_{NL} と新しく発生した光電界の波数 $k(\omega_{NL})$ の不一致、すなわち両方の波の位相の不一致を表す量である。両方の波の位相速度が一致すると、伝搬する非線形分極波から生じる新しい光波が正に重ねあわさることになり、その振幅は非線形媒質の長さに比例して大きくなる。光の強度は電界の二乗 E_{NL}^2 に比例するので、光の強度は L^2 に比例して増大することを意味する。すなわち、式(5-13)と表すことができる。

$$I \propto L^2 \frac{\sin(\Delta k L/2)}{(\Delta k L/2)^2} \quad (5-13)$$

式(5-13)は、 $\Delta k = 0$ の場合、 I は L^2 に比例して増大することを意味するが、一方 $\Delta k \neq 0$ の場合、 $\Delta k L/2 = \pi/2$ の時に最大値を取り、この値を与える媒質長 $L_c = \pi/\Delta k$ をコヒーレンス長と呼ぶ。すなわち、 $\Delta k \neq 0$ なら、媒質長をいくら長くしても式(5-13)の最大値は $(2L_c/\pi)^2$ にしかならない。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おり、この式を位相整合条件と呼ぶ。

5.4. 疑似位相整合

非線形光学結晶による差周波発生において、屈折率が波長によって異なることによって光電界（基本波）と差周波の伝搬速度が異なる結果、結晶内で発生した差周波は同じ位相にならない。コヒーレンス長の距離までは差周波の光電界は大きくなるが、その距離を過ぎると減少することになる。しかし、減少が始まる点において、その点における分極を反転させることで同位相にすることができる。

非線形分極すなわち非線形光学定数の符号を反転させるには、コヒーレンス長の長さのブロックを作り、強誘電体としての分極を反転させた構造を作ることによって実現できる。疑似位相整合を利用することで、複屈折などの自然に任せた制限を受けることなく、結晶の長さに応じて光電界を増大させることができ、非線形光学特性を最大限に利用することが可能となる。

6. 周期的分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN : Periodically Poled Lithium Niobate)

PPLN は、ニオブ酸リチウム (LiNbO₃) 単結晶が持つ高い光学的異方性を利用し、主に可視域での波長変換デバイスとして用いられる。半導体レーザーがカバーしにくい波長 470nm から 600nm のレーザー光を、その倍の波長である 940nm から 1200nm の光から直接生成することもできる。本研究では、非線形光学素子として PPLN による差周波発生によって、光源である 2 台の半導体レーザーの波長変換を行った。

また、LN は最も広く知られている光学結晶の一つである。高い非線形光学定数を持っており、さらに複屈折位相整合も擬似位相整合も可能なので、応用範囲の広い結晶である。透過波長域は 420-5200nm にあり、主に 1 μ m の以上での第二高調波(SHG)発生などに利用されている。PPLN では反転周期を変えることで、ほぼ全透過波長域にわたって位相整合の利用が可能になる。また、PPLN の温度によって屈折率が変化するため PPLN の変換効率は全体的に左右にシフトする。

7. 光吸収分光法

光が物質を通過するとき光強度は減衰する。この原理を応用し物質を透過する光の減衰量を計測することで吸収媒体の量を求めることができる。レーザーによる測定の特長としては、変動に対する追従性がよくリアルタイムに測定可能、その場測定可能、広範囲を測定可能、測定対象ガスと非接触で測定可能、メンテナンスが簡単などがある。

8. ジニトロベンゼン(DNB)について

8.1. 化学構造体・化学式

DNB の化学式は $C_6H_4N_2O_4$ 、分子量 168.1、蒸気圧 $2.6644E-3Pa$ の薬品である。また、1,2-DNB、1,3-DNB、1,4-DNB の 3 つの異性体が存在する。 図 18 に 1,2-DNB、1,3-DNB、1,4-DNB を示す。

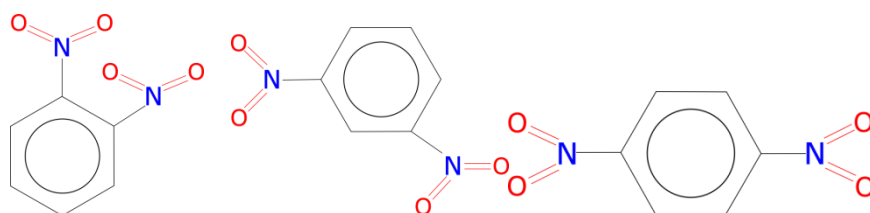


図 18 1,2-DNB(左)、1,3-DNB(中央)、1,4-DNB(右)

8.2. DNB の異性体の吸収線

DNB には 1,2-DNB、1,3-DNB、1,4-DNB の 3 つの異性体が存在し、それぞれの異性体によって吸収強度が最大となる波長が異なる。そのため、爆薬蒸気検知のシステムを構築する際、目標となる爆発物の吸収線を明確にしておく必要がある。

DNB の各異性体の吸収線を可視化するため、NIST データベースを元にグラフ化した結果を図 19 に示す。

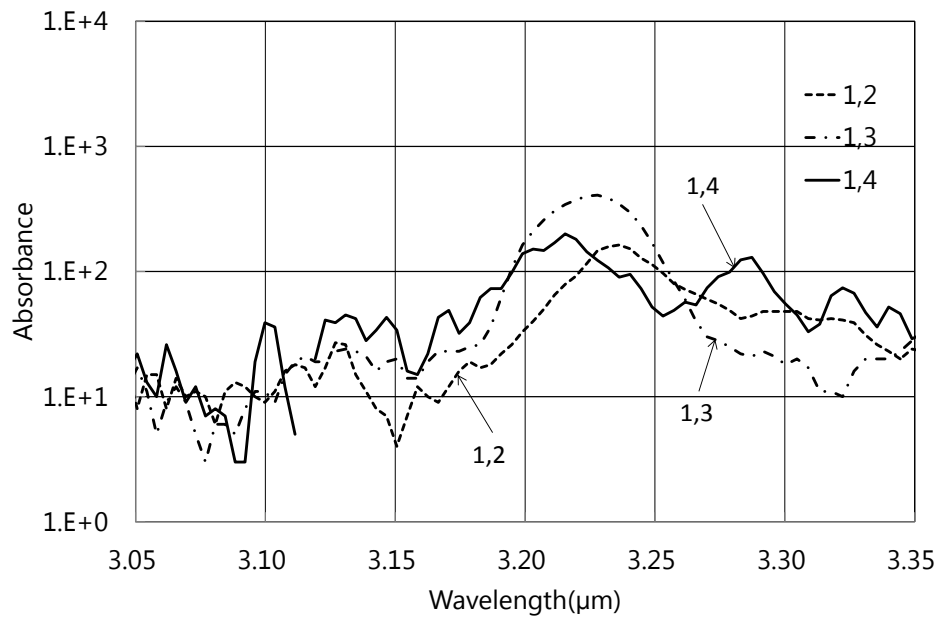


図 19 DNB の各異性体の吸収線

第4章 実験

1. 目的

波長 1589nm と 1064nm の 2 台の半導体レーザーと非線形光学素子(PPLN)による差周波発生により 3.2 μ m 帯の中赤外光を生成する光源システムを開発する。さらに、爆薬蒸気の吸収スペクトルを確認できるようにするために、広い波長範囲において光強度を一定としたまま波長を連続掃引するために必要な 2 台の半導体レーザーの電流と温度、PPLN の温度のパラメータを決め、制御することを目的とする。

2. 実験装置

2.1. 使用機器

表 3 に本研究で使用した機器の一覧を示す。

表 3 仕様機器一覧

品名	メーカー	型番	仕様
DFB-LD	NTTエレクトロニクス	NLK1L5EAAA	波長:1589nm スペクトル線幅:2MHz
DFB-LD	Redfern Integrated Optics	QLD1061	波長:1064nm スペクトル線幅:10MHz以下
LDドライバ(1589nm)	THORLABS	LDC202C	変調係数:20mA/V \pm 5% 帯域幅:0-250kHz
LDドライバ(1064nm)	THORLABS	LDC205C	変調係数:50mA/V \pm 5% 帯域幅:150kHz
温度コントローラ	THORLABS	TED200C	温度分解能:1 Ω 温度安定性:0.002 $^{\circ}$ C以下
プリアンプ	FITリーディングテックス	PIP-DC-20M-F-M4	
赤外線検出器	FITリーディングテックス	PVI-4TE-3.4-1x1	素子:HgCdTe
電熱クーラー・コントローラ	FITリーディングテックス	PTCC-01-BAS	
光チョッパーシステム	THORLABS	MC2000B	
波長変換モジュール(PPLN)	NTTエレクトロニクス	WD-3218-000-A-B-C	変換効率:29%W (49.6 $^{\circ}$ C)
パワーメーター	THORLABS	PM100USB	
偏波保持シングルモード パッチケーブル	THORLABS	P3-1064PM-FC-1	MFD:7.7 μ m
偏波保持シングルモード パッチケーブル	THORLABS	P3-1550PM-FC-1-D=JP	MFD:10.5 μ m
偏波保持シングルモード パッチケーブル	THORLABS	SM98-PR-U25D-H	MFD:6.6 μ m
偏波保持ファイバーアダプタ	THORLABS	ADAFCPM2	
偏波保持波長分割多重コプラ	THORLABS	WD202APM-APC	
非球面レンズ	THORLABS	C036TME-E	焦点距離:4.00mm
非球面レンズ	THORLABS	LA5763	焦点距離:50.0mm
IRバンドパスフィルタ	THORLABS	FB3250-500	CWL:3.25 μ m 半値前幅0.5 \pm 0.1 μ m
凹面ミラー(金)	THORLABS	CM508-200-E04	f:200.0mm
エタロン	LightMachinery	OP-2638-8311	シリコン 直径:25.4mm, 厚さ:8.31mm
ロックインアンプ	Stanford Research System	SR830 DSP Lock-in Amplifier	時定数:30ms
A/Dコンバータ	NATIONAL INSTRUMENTS	NI USB-6221	サンプリングレート:250kS/s ビット数:16-bit

3. 光源の特性

3.1. レーザーの電流-波長特性

レーザーから出射される光の波長はレーザーの温度と、電流によって波長が変化します。

その特性を用いて DFB レーザーの電流、温度が変化した時の波長を調べることができる。

図 20, 21 にシグナルと、ポンプの DFB レーザーの電流波長特性を示す。図 20, 21 からシグナルとポンプのレーザーともに電流又は、温度が大きくなった時に波長が長くなることが確認された。また、シグナルのレーザーの電流の可変範囲は 30~110mA、温度の可変範囲は 20~70°C、ポンプのレーザーの電流の可変範囲は 30~110mA、温度の可変範囲は 20~60°C のため、シグナルのレーザーの波長の可変領域は 1588.5nm~1592.5nm、ポンプのレーザーの波長可変領域は 1063.5nm~1066.5nm となる。これによりアイドラー光の波長可変領域は 3207.5nm~3249.1nm となる。

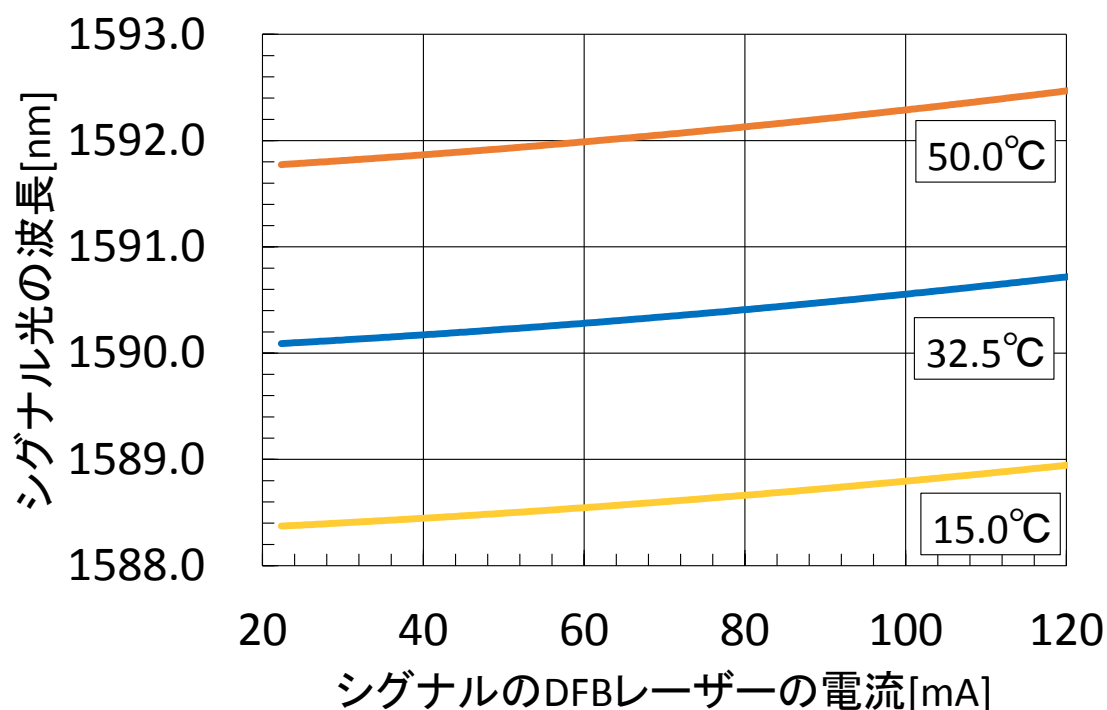


図 20 シグナルのレーザーの電流-波長特性

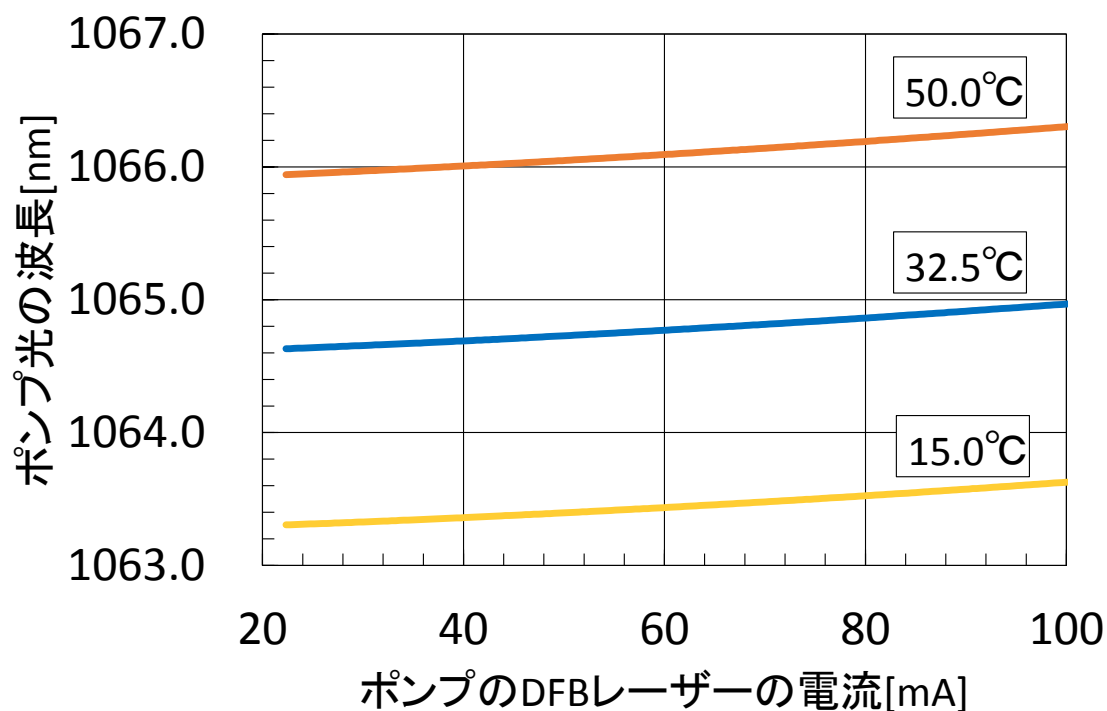


図 21 ポンプのレーザーの電流-波長特性

3.2. レーザーの電流-強度特性

レーザーから出射される光の強度も波長と同様にレーザーの温度と、電流によって変化する。その特性から DFB レーザーの電流、温度が変化した時の強度の傾向を調べることができる。

図 22, 23 にシグナルと、ポンプの DFB レーザーの電流-波長特性を示す。図 22, 23 より、シグナルとポンプのレーザーはともにレーザーの電流が大きい時または、レーザーの温度が小さい時に強度が大きくなることが確認された。

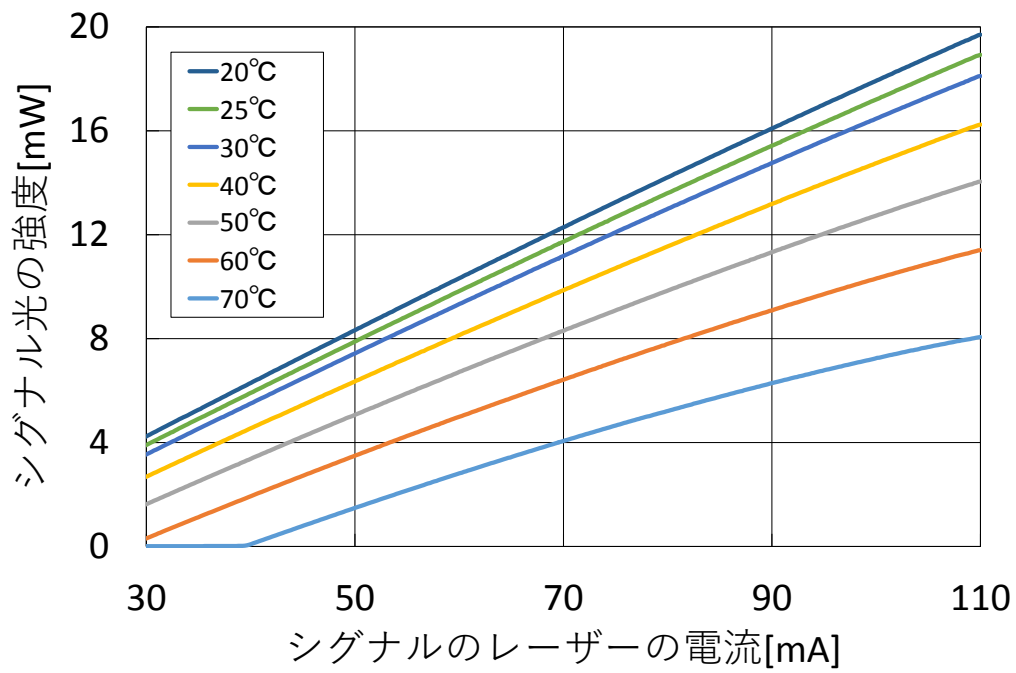


図 22 シグナルのレーザーの電流-強度特性

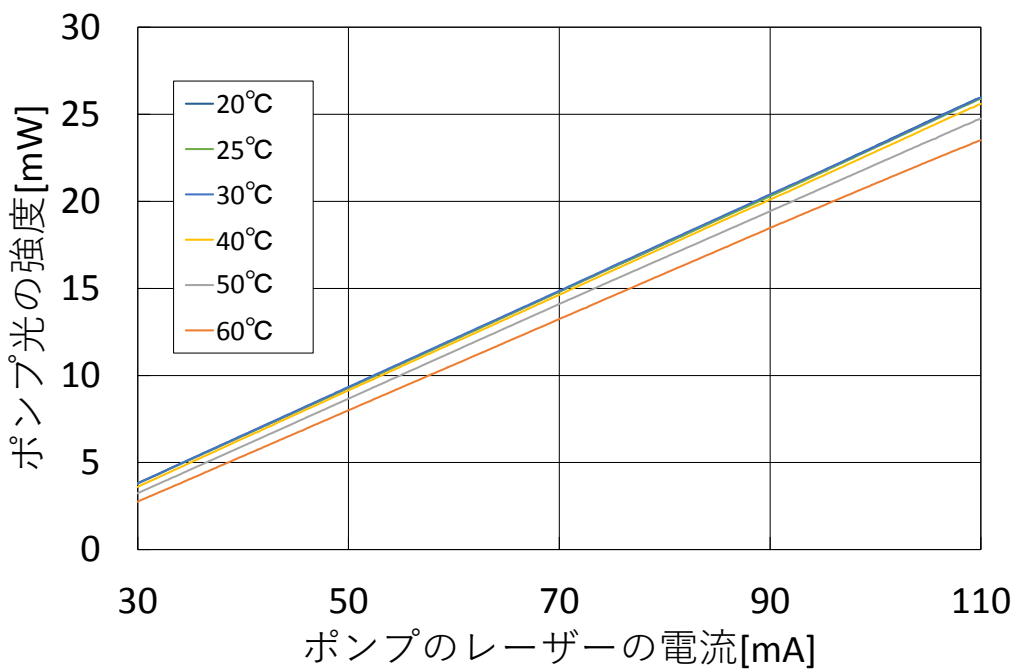


図 23 ポンプのレーザーの電流-強度特性

3.3. バンドパスフィルター

PPLN モジュール出口にはシリコンフィルターが装着されており、波長 1064nm のポンプ光はカットされる構造となっている。しかし、1589nm のシグナル光は光軸調整用としてシリコンフィルターを通過してもモジュールから出力されるため、ガスセルを通過させる場合はこの 1589nm 帯のシグナル光が不要になる。そこで、1589nm 帯のシグナル光と背景雑音を除去するため、バンドパスフィルター[9]を用いる。

図 24 に本研究で使用した、バンドパスフィルターの周波数ごとの透過率を示す。

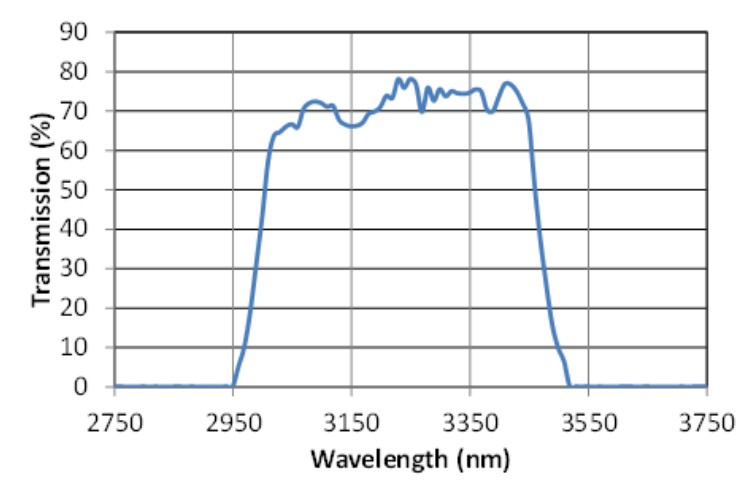


図 24 バンドパスフィルターの透過率

3.4. レーザー光による光ファイバの損傷

一般にシングルモード光ファイバは円形の断面を持っているため、どのような偏光状態の光でも伝送できるが、これは光ファイバの利点であると同時に欠点でもある。光ファイバを少しでも動かすと、内部の光の偏光状態が変わってしまうのである。その結果、偏波

モード分散や偏波依存性を持つデバイスとの接続の不具合といった好ましくない影響がでてくる。そこで開発されたのが偏波保持ファイバ(Polarization Maintaining Fiber : PMF)である。このファイバは複屈折ファイバとも呼ばれ、複屈折のランダムな揺らぎが光の偏光を大きく変えないように、デザインを工夫して意図的に大きな複屈折を持つように設計されている。本研究では、この偏波保持型光ファイバを用いる。しかし、シングルモードファイバ(SM)の空気とガラスの界面の表面積とビーム径は、大型光学素子と比べて非常に小さいので、損傷閾値も非常に小さくなる。そのため、レーザー光の強度が光ファイバの損傷閾値より大きくならないように制御する必要がある。

ファイバ素線の損傷発生メカニズムは、大型の光学素子と同様であり、UV 溶融石英(UVFS)基板の標準的な損傷閾値を石英ファイバに当てはめることができる。シングルモードファイバの実効面積は、ファイバ内で光が伝搬する実効断面積であるモードフィールド径(MFD)によって定義される。自由空間光を高い結合効率でファイバに入射するためには、この MFD の約 80%内に自由空間光を集光しなければならない。MFD は、波長の増加とともにリニアに大きくなるが、損傷閾値は2乗に比例して大きくなる。また、シングルモードファイバに入射される典型的なビームのプロファイルはガウス分布に似ているので、ビーム端よりも中心部の方がパワー密度が高くなる。よって均等のパワー密度を想定して損傷閾値を計算する場合、安全余裕を見込む必要がある。図 25 に安全余裕の表を示す。

Silica Optical Fiber Maximum Power Densities		
Type	Theoretical Damage Threshold	Practical Safe Value
CW (Average Power)	1 MW/cm ²	250 kW/cm ²
10 ns Pulsed (Peak Power)	5 GW/cm ²	1 GW/cm ²

図 25 光ファイバの安全余裕

最大パワー密度には、ガウスの強度分布、結合のミスアライメントの可能性、ならびにファイバ端の汚染物や欠陥を加味し、図 25 の Practical Value(実用値)を用いる。

ポンプのレーザー(QLD1061)光を入射する光ファイバ 1(P3-1064PM-FC-1)は MFD=7.7 μ m、シグナルのレーザー(NLK1L5EAAA)光を入射する光ファイバ 2(P3-1550PM-FC-1-D-JP)は MFD=10.5 μ m として計算を行った。図 26、27 に QLD1061 と、NLK1L5EAAA の電流-電力特性を示す。

その結果、光ファイバ 1 の損傷閾値は 74.5mW、光ファイバ 2 の損傷閾値は 138.5mW となった。図 26、27 の QLD1061 と、NLK1L5EAAA の電流-電力特性よりポンプ光の出力は 100mA の時、約 30mW であるため、2 倍程度の電流を流しても光ファイバ 1 は損傷することなくレーザー光を入射することができ、シグナル光の出力は 100mA の時、約 22mW であるため、5 倍程度の電流を流しても光ファイバ 2 は損傷することなくレーザー光を入射することができる。しかし、偏波保持波長分割多重カップラに接続されている光ファイバ 3(SM98-PR-U25-H)は MFD=6.6 μ m であり、損傷閾値が 54.7mW となる。そのため、シグナルとポンプのレーザーに 110mA 以上の電流を印加した場合、ポンプ光とシグナル光のパワ

一の総和が光ファイバ3の損傷閾値の54.7mWを超えることになる。そのため、本研究ではシグナルとポンプのDFBレーザに印加する電流の上限は110mAとする。

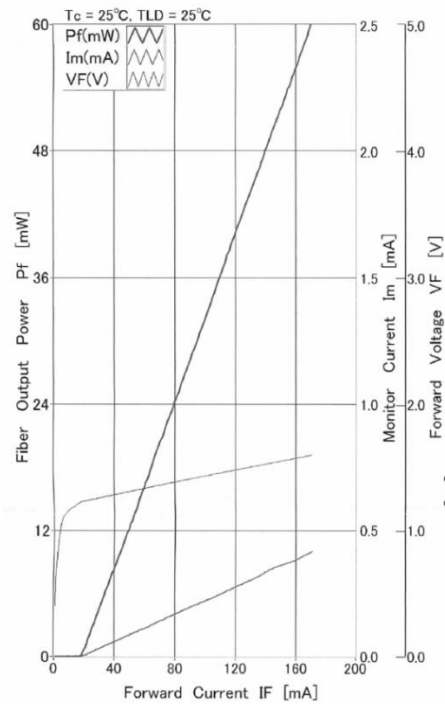


図 26 QLD1061 の電流-電力特性[10]

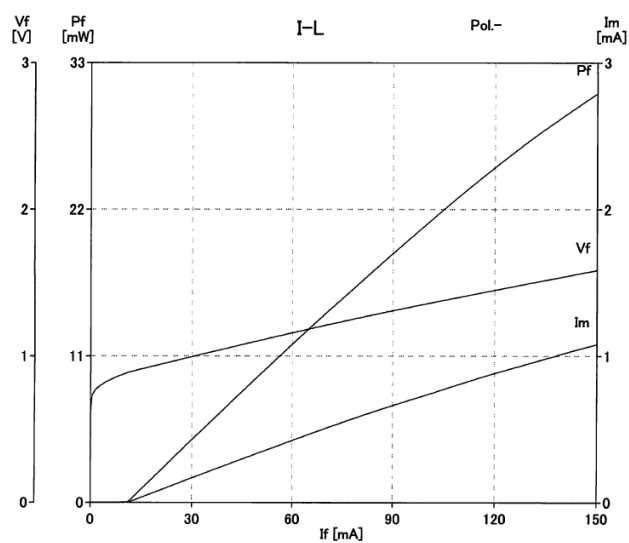


図 27 NLK1L5EAAA の電流-電力特性[11]

3.5. ガウシアンビームの集光

図 28 に 2 枚のレンズを用いてレーザー光の集光を行った概略図を示す。薄肉レンズによるビームウェストの計算を行う。焦点距離 f は 50mm、波長 λ は 3 μm 、入射光のビーム曲率半径 w_{01} は 3mm としてビームウェストの計算を行った。式(3-1)にビームウェストの計算式を示す[12]。

$$\frac{w_3}{w_{01}} = \frac{f\lambda/w_{01}^2n}{\sqrt{1 + (f\lambda/w_{01}^2n)^2}} \quad (3-1)$$

式(3-1)により、薄肉レンズのビームウェストの計算を行った結果、ビームウェスト w_3 は 15.91 μm となった。入射光のビーム曲率半径 w_{01} は 3mm のため、集光されたビームウェストのサイズは約 1/200 程度となった。実際にパワーメータで計測を行うと、集光する前のパワーは 1 μW 、集光後は 117 μW となったため、集光することによって 100 倍以上の光強度が得られていることが確認された。

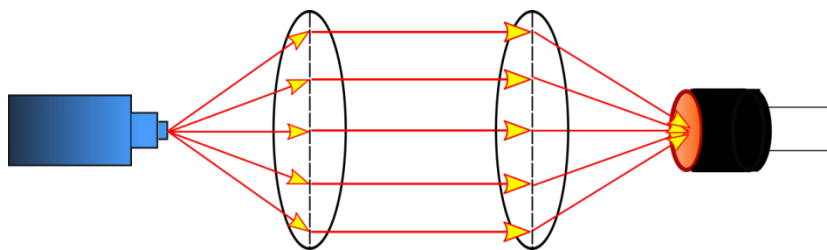


図 28 2 枚のレンズを用いた集光方法の概略図

3.6. PPLN の変換効率

アイドラー光の強度が最も大きくなる PPLN の温度を求めるため、シグナルとポンプのレーザーともに 25 $^{\circ}\text{C}$, 100mA として PPLN を温度変化させたときのアイドラー光の強度を測定

した。図 29 に PPLN を温度変化させたときのアイドラー光の強度を示す。また、PPLN の変換効率 $\eta\%/W$ を(3-2)式より求める。なお、シグナル光、ポンプ光、アイドラー光のパワーは P_s 、 P_p 、 P_i である。

$$\eta = \frac{P_i}{P_s P_p} \times 100 \quad (3-2)$$

アイドラー光の強度が最も大きくなる PPLN の温度を求めるため、PPLN を温度変化させたときのアイドラー光の強度を計測した結果、アイドラー光の強度は、50.61°C のときに最大であるという結果が得られた。

次に、それぞれのレーザーに印加する電流が 100mA のとき、 P_s は 15.65mW、 P_p は 28mW、 P_i では 117 μ W となり、PPLN の変換効率は 26.7%/W となった。なお、PPLN のデータシート[13]に記載されている変換効率は 29%/W である。

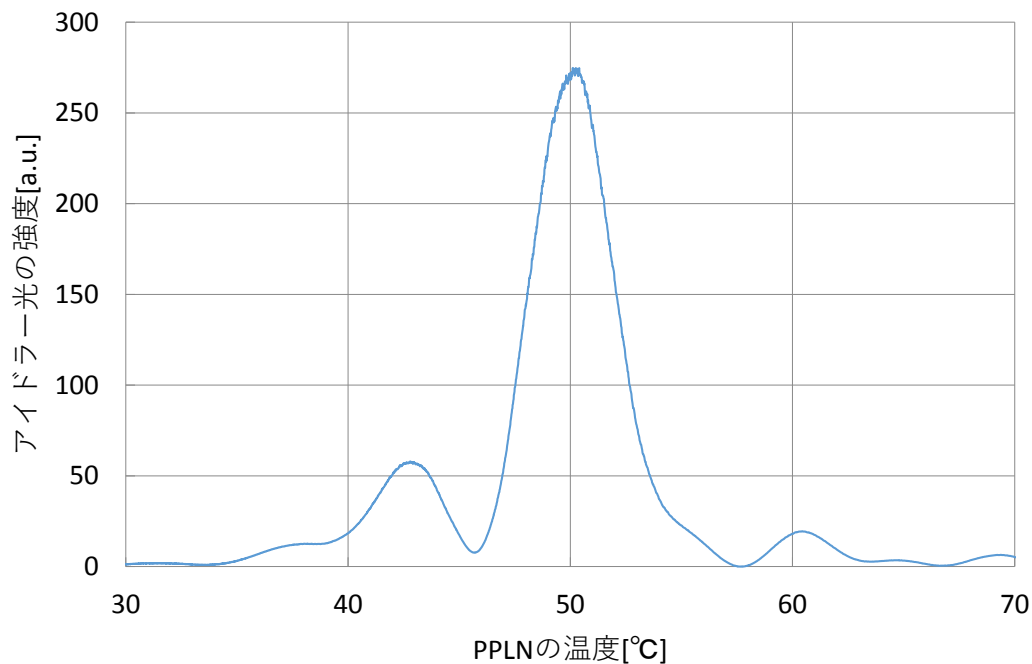


図 29 PPLN の温度ごとのアイドラー光の強度

4. 手法・手段

図 30 に光吸収分光法により爆薬蒸気を検出するための光源のシステムを示す。半導体レーザーからの波長 1589nm のシグナル光と 1064nm のポンプ光を偏波保持型カップラで合波し、その光を PPLN に入射することで、差周波発生により 3.2 μ m 帯(中赤外)のアイドラー光が生成される。アイドラー光の波長と強度は、2 台の半導体レーザーのそれぞれの電流と温度、PPLN の温度の計 5 つのパラメータで決定されるため、最初にそれぞれのパラメータに対する波長と強度の関係を測定によって調べる。アイドラー光の強度は光検出器によって電気信号に変換されたのち、背景光と区別するためにロックインアンプで測定される。アイドラー光の絶対波長については大気中の水蒸気の吸収線と比較し、相対波長についてはエタロンの透過特性を測定することで確認を行う。そして、波長を連続掃引するために必要となる各パラメータの決定方法について検討し制御を行う。

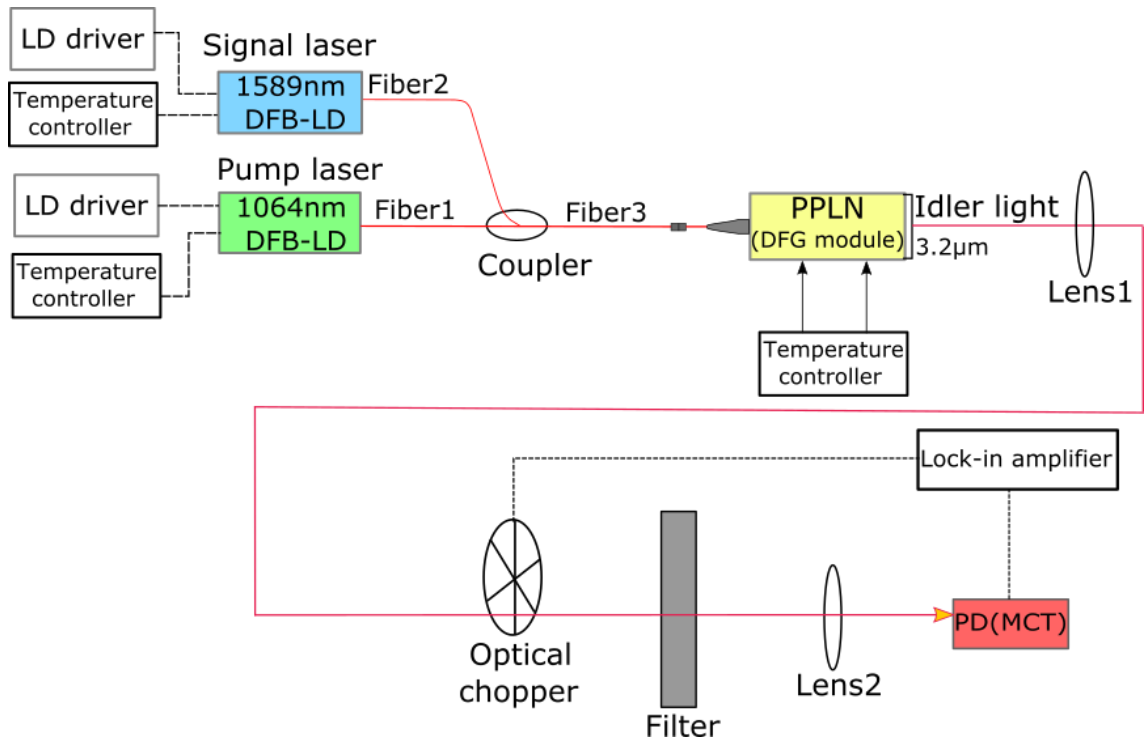


図 30 光源のシステム

5. 研究内容

5.1. アイドラー光の波長の補正

シグナルの半導体レーザーの電流を変化させることによって、アイドラー光の波長を掃引し、その時の強度の変化を測定することで $3.2\mu\text{m}$ 帯の水蒸気の吸収スペクトルを測定する。アイドラー光の波長は近似計算によって求めているため、誤差が含まれている。そこで、HITRAN データベースの水蒸気の吸収スペクトルと、測定によって得られた吸収スペクトルを比較することにより、アイドラー光の波長を補正する。図 31 に波長補正前の測定によって得られた水蒸気の吸収スペクトルと HITRAN データベースの水蒸気の吸収ス

クトルを示す。

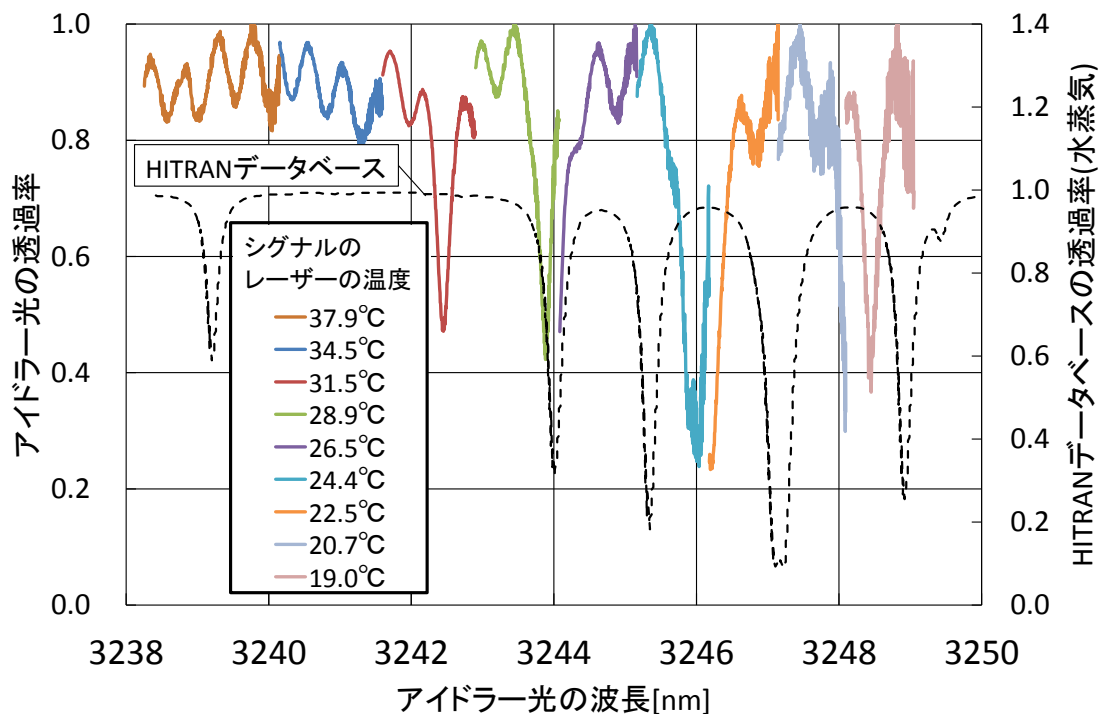


図 31 波長補正前の水蒸気の吸収線

5.2. アイドラー光を強度一定で連続波長掃引

シグナル又は、ポンプのレーザーの電流、温度を変化させることによってアイドラー光の波長は掃引することが可能である。しかし、1つのパラメータのみを変化させてアイドラー光の波長を掃引した際に、アイドラー光の強度に変化が生じる。そこで、シグナルとポンプの半導体レーザーのそれぞれの電流と温度、PPLNの温度の計5つのパラメータに対する波長と強度の関係を明らかにし、波長を強度一定のまま連続掃引するように5つのパラメータを制御する。

図 32 に波長を連続掃引する際の LabVIEW の入力画面を示す。ミリ秒待機時間にはデータの間隔の時間、LIA sensitivity(V)にはロックインアンプの sensitivity を入力し、ファイルパスにはアイドラー光の波長を強度一定のまま連続掃引するシグナルとポンプの半導体レーザーのそれぞれの電流と温度、PPLN の温度の計 5 つが入力された CSV ファイルを参照する。これにより、制御された 5 つのパラメータとロックインアンプの出力を CSV ファイルとして出力する。また、画面左のサブセット削除後の配列には参照した CSV ファイルの 5 つのパラメータを表示し、画面右の配列には、シグナルとポンプのレーザーの温度コントローラの抵抗(Ω)と、PPLN の温度コントローラの抵抗(Ω)、ロックインアンプの出力電圧(V)を表示する。なお、本研究ではミリ秒待機時間は 500ms とし、sensitivity は 200mV として測定を行った。

図 33 にシグナルのレーザーの電流のみを変化させてアイドラー光の波長を掃引した時のアイドラー光の強度を示す。

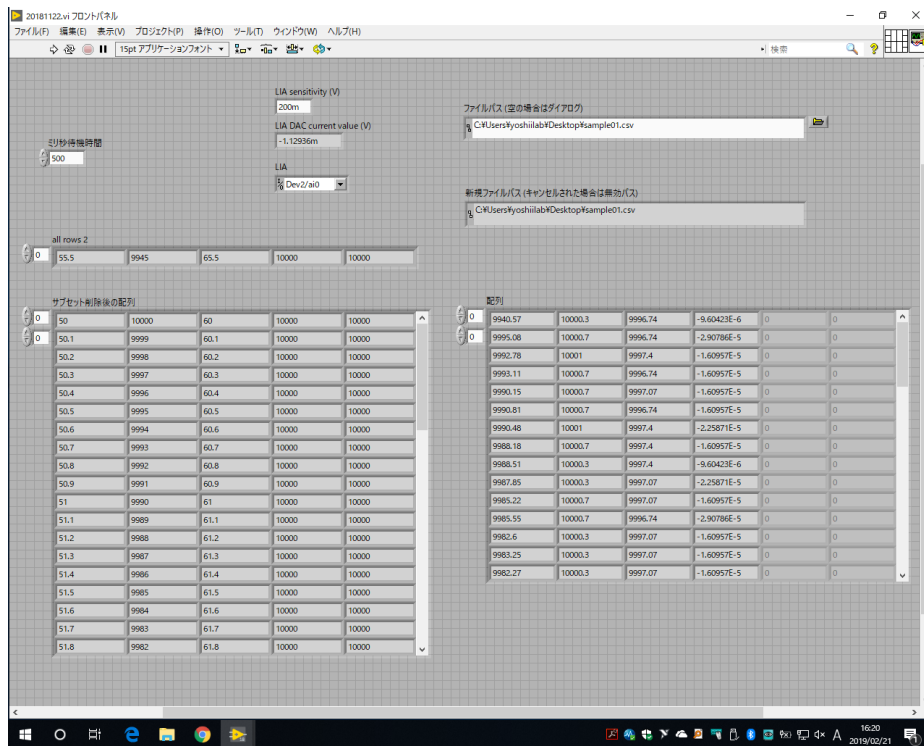


図 32 波長を連続掃引する際の入力画面

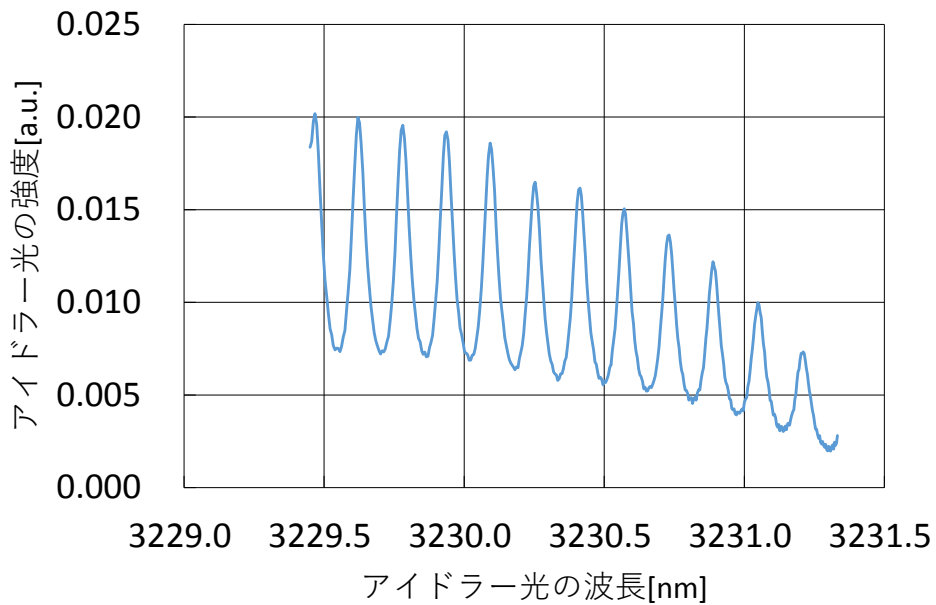


図 33 シグナルのレーザーの電流を変化させて波長掃引した時のアイドラー光の強度

6. 結果

6.1. アイドラー光の波長の補正

レーザーの電流-波長特性から近似計算によって導出されたアイドラー光の波長には誤差が含まれている。しかし、HITRAN データベースの水蒸気の吸収スペクトルのピーク波長と、測定によって得られた吸収スペクトルのピーク波長を比較することにより、シグナルの DFB レーザーの温度とアイドラー光の波長のずれに比例の関係があることが確認された。そこで、シグナルの DFB レーザーの温度から求められたアイドラー光の波長のずれを補間することにより、アイドラー光の波長を補正した。図 34 にシグナルの DFB レーザーの温度ごとのアイドラー光の波長のずれ、図 35 にアイドラー光の波長補正後の水蒸気の吸収線を示す。

図 35 より、アイドラー光の波長を補正することで HITRAN データベースの吸収スペクトルと測定によって得られた吸収スペクトルの位置が相対的に一致したと考えられる。さらに、図 35 の HITRAN データベースの水蒸気の吸収スペクトルのピーク波長と、測定によって得られた吸収スペクトルのピーク波長を比較することにより、アイドラー光の波長のずれを最大 0.2nm の誤差で補正されていることが確認できた。

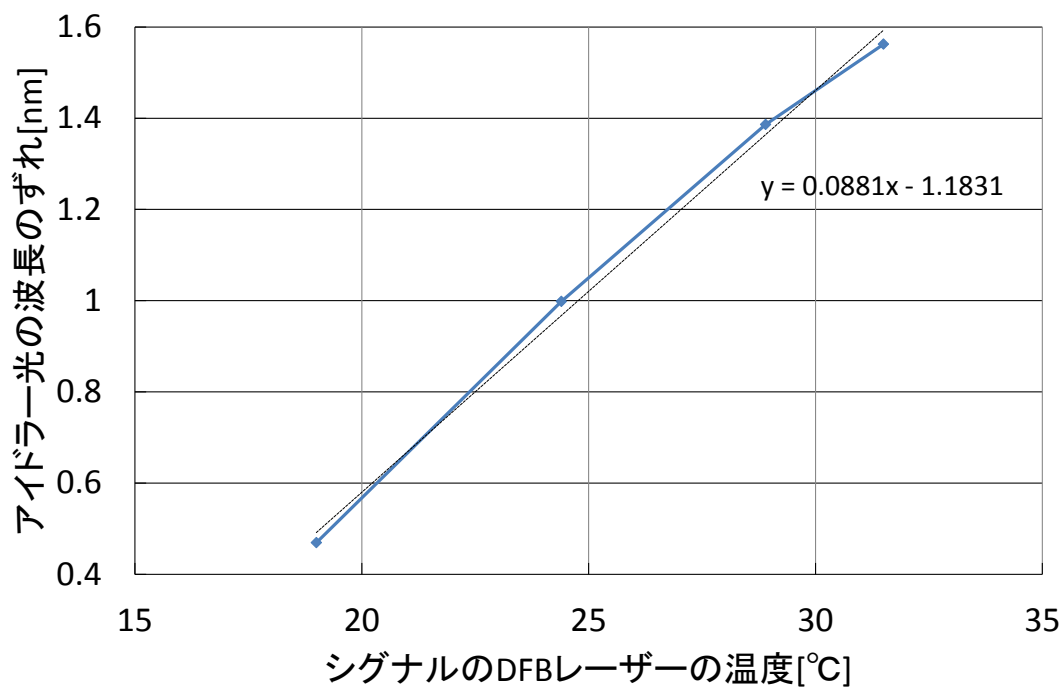


図 34 シグナルの DFB レーザーの温度ごとのアイドラー光の波長のずれ

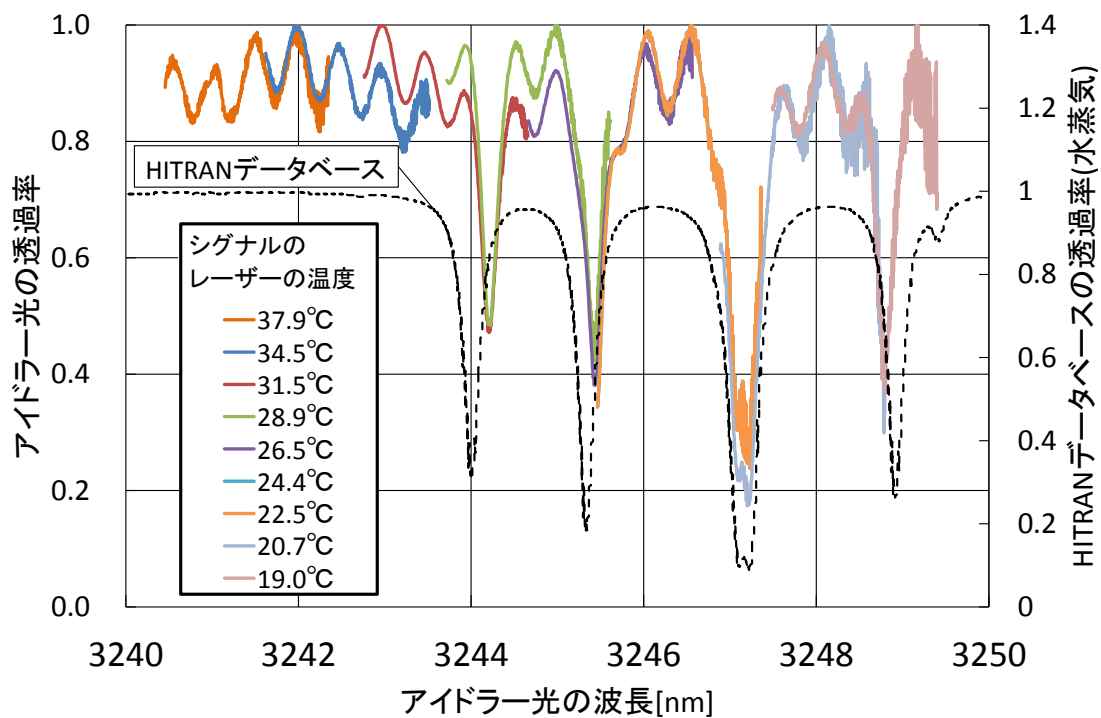


図 35 波長補正後の水蒸気の吸収線

6.2. アイドラー光を強度一定で連続波長掃引

光源の電流-波長特性、電流-強度特性により、シグナルとポンプの DFB レーザーの電流と温度のパラメータに対する波長と強度の関係がわかった。これにより、アイドラー光の強度 $3.01 \pm 0.15 \mu\text{W}$ 、波長 $3219.4\text{nm} \sim 3245.9\text{nm}$ の波長範囲においてアイドラー光の波長を連続掃引するシグナルとポンプの DFB レーザーの電流と温度、PPLN の温度のパラメータが決定された。アイドラー光の波長を強度一定のまま掃引する 5 つのパラメータの例として、図 36 に PPLN の温度が 50.0°C 、シグナルのレーザーの温度 35.0°C 、ポンプのレーザーの温度 20.0°C の時のレーザーの電流ごとのアイドラー光の強度分布を示す。また、図 37 にそのパラメータの時のアイドラー光の波長ごとのレーザーの電流を示す。

アイドラー光の強度が特定の波長範囲で一定となる各 DFB レーザーの電流と温度、PPLN の温度のパラメータに制御した時のアイドラー光の強度を図 38 に示す。その時の波長 $3219.4\text{nm} \sim 3245.9\text{nm}$ のアイドラー光をエタロンに透過させた時の強度を図 39 に示す。また、図 39 のグラフでアイドラー光の波長領域が $3230.0\text{nm} \sim 3235.0\text{nm}$ のアイドラー光の強度を図 40 に示す。

図 38 より、アイドラー光の波長 $3219.4\text{nm} \sim 3245.9\text{nm}$ の波長領域でアイドラー光の強度を一定に保って波長が掃引されていることが確認された。しかし、シグナルのレーザーの温度が 45.0°C 以上、又はポンプのレーザーの温度が 60.0°C 以上の時の強度一定のままアイドラー光の波長を掃引する場合には、アイドラー光の強度が $3\mu\text{W}$ 未満になることが分かっ

た。

図 40 より、波長 3219.4nm～3245.9nm のアイドラー光をエタロンに透過させた結果、波長を掃引した際にみられる光強度の周期的な透過ピークが確認された。そのため、アイドラー光の波長が連続掃引されていることがわかった。なお、エタロンの厚さは 8311 μm のため、透過波形の周期を表す FSR は 5.26GHz となった。また、その波長範囲で波長掃引した時の 1468 データの標準偏差を σ とした時、 $\pm 2\sigma$ を測定強度の幅と定義した。その結果、波長 3219.4nm～3245.9nm でのアイドラー光の強度は $2.89\pm 0.23\mu\text{W}$ となり、想定された $3.01\pm 0.15\mu\text{W}$ より強度は小さく、強度の幅は大きくなった。

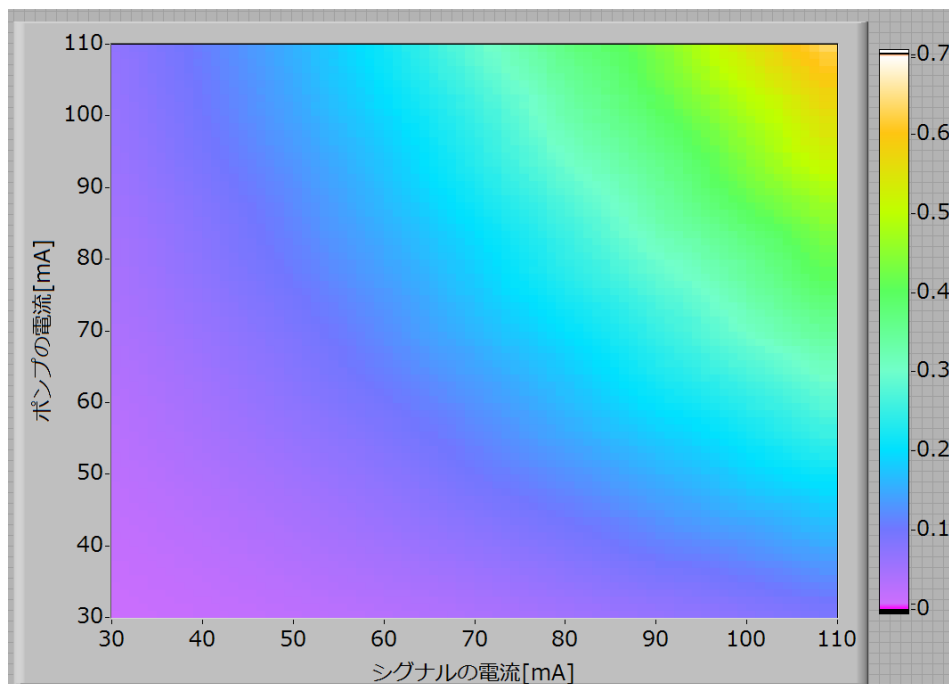


図 36 PPLN の温度とレーザーの温度が一定の時のアイドラー光の強度分布

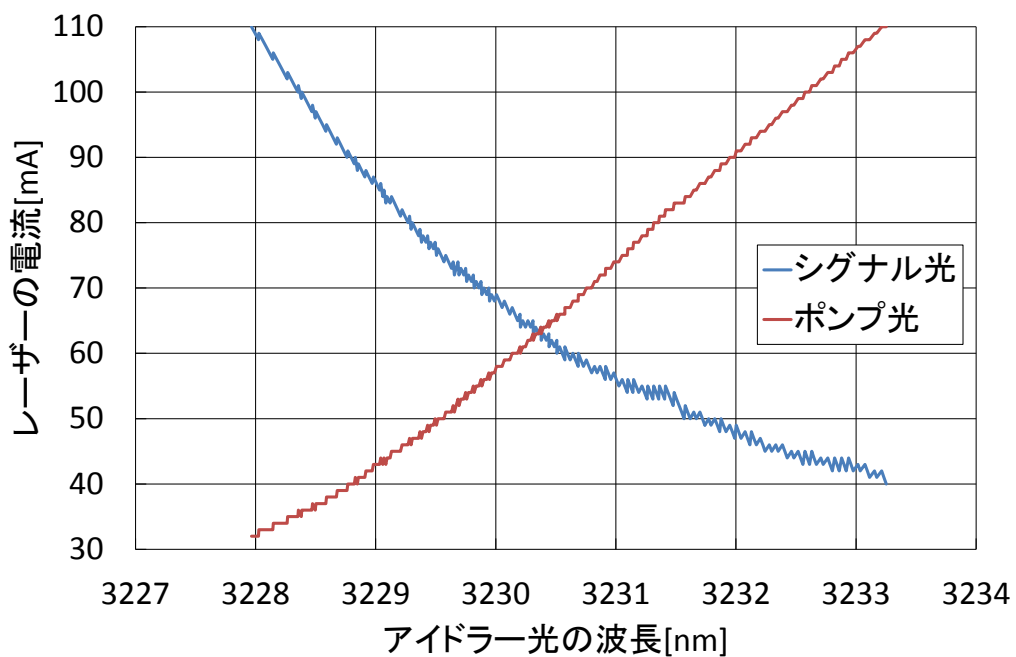


図 37 アイドラー光の波長ごとのレーザーの電流

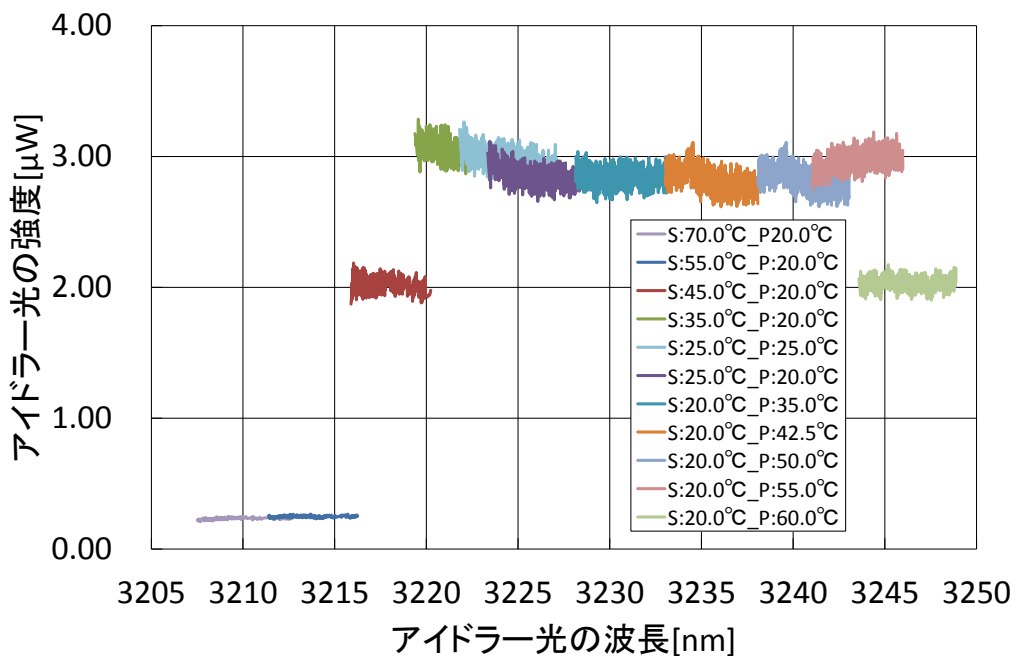


図 38 アイドラー光を強度一定で波長掃引

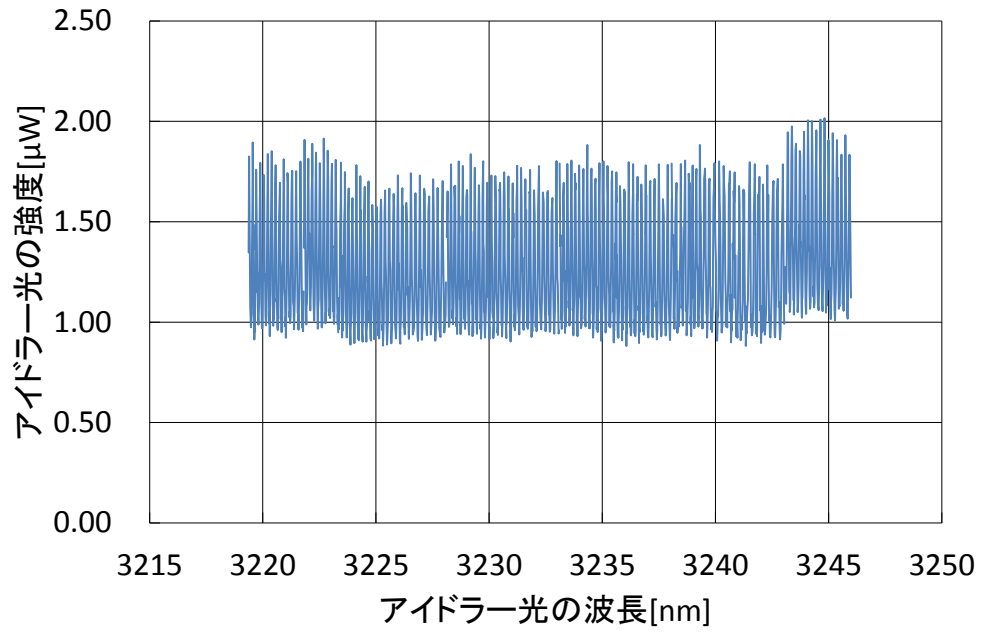


図 39 エタロンによる連続波長掃引の確認(3219.4nm~3245.9nm)

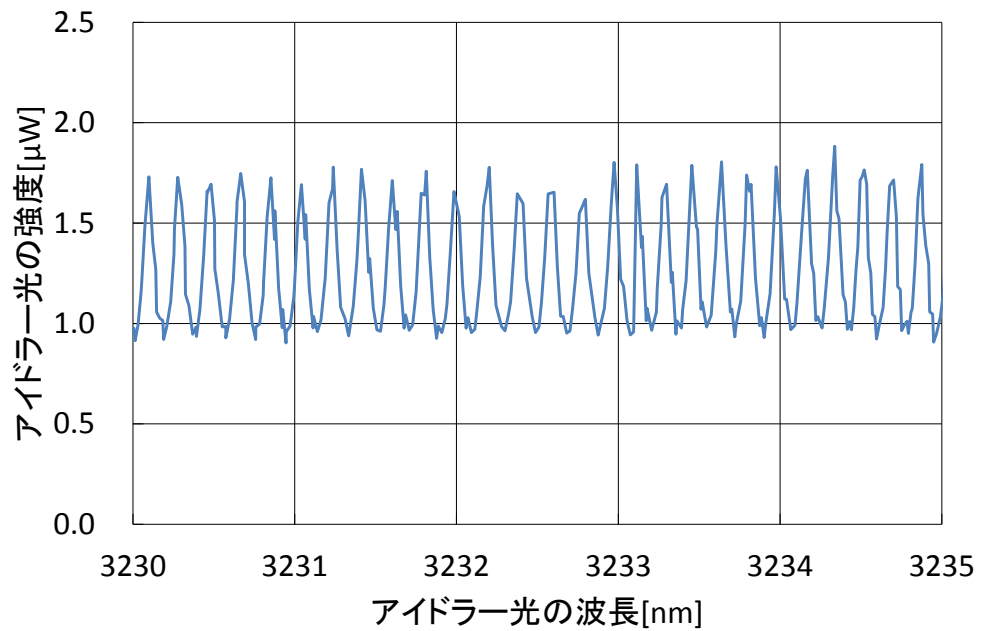


図 40 エタロンによる連続波長掃引の確認(3230.0nm~3235.0nm)

第5章 まとめ及び考察

2台の半導体レーザーとPPLNを組み合わせることで差周波発生により3.2 μm 帯の中赤外レーザー光を生成し、その光を測定する光源システムを構築した。その光源のシステムの光源特性または、実験系に用いた光学部品の特性を総合的に評価することにより、広い波長範囲においてアイドラー光の強度を一定のまま波長を連続掃引するシグナルとポンプのレーザーの電流と温度、PPLNの温度の5つのパラメータと、その光源システムの制御条件を明らかにした。これにより、爆薬蒸気を測定するための光源のシステムを開発することができた。また、制御条件を明らかにしたことで、新たに爆薬蒸気を測定するシステムを構築する際にその条件を利用することができ、将来的には、中赤外領域に吸収が存在する多種のガス計測へと拡張していくことが可能になり、光吸収分光法による複数種のガス検知システムを作ることが期待される。

第6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3年間に渡ってご指導ならびに様々な経験する機会を与えて頂きました。心より深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1]. CNN.co.jp 2015.06.02. 「空港の安全保安調査、禁止品目の 95%を見逃し 米」
- [2]. 火薬学会爆発物探知専門部会. 「爆発物探知ハンドブック」.丸善.2010.P27.
- [3]. 黒澤宏. 「入門まるわかり非線形光学」. オプトロニクス社. 2008.
- [4]. 栖原敏明. 「半導体レーザーの基礎」. 共立出版株式会社. 1998.
- [5]. ソーラボジャパン総合カタログ. Vol.21.
- [6]. 松ホトニクス株式会社技術資料. 「赤外線検出素子の特性と使い方」.
- [7]. I.E. Gordon, *et al.*, "The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database", J Quant Spectroscopy & Radiative Transfer 203, 3-69 (2017).
- [8]. Christopher D. *et al.*, "NIST Interlaboratory Study of Aerosol Absorption Measurements using Photoacoustic Spectroscopy", April 27, 2018.
- [9]. THORLABS. 赤外域(IR)バンドパスフィルタ. FB3250-500.
- [10]. 「LASER DIODE TEST DATA」 type QLD1061 Serial No.1997162
- [11]. NTT Electronics NLK1L5EAAA
- [12]. 多田邦雄・神谷武志 ; 「光エレクトロニクス基礎編」 丸善
- [13]. NTT Electronics. 取扱説明書[WD-3218-000-A-B-C]