

目次

第1章 序論.....	3
1. はじめに.....	3
2. 爆発とは.....	4
2.1. 定義.....	4
2.2. 爆燃・爆ごう.....	4
2.3. 爆発物・爆薬の分類と特性.....	5
3. 従来 of ガス検知方法.....	6
3.1. 爆発物探知.....	6
3.2. トレース探知とは.....	9
3.3. バイオセンサ.....	9
3.4. 機器分析.....	11
3.5. バルク探知とは.....	13
3.6. バルク探知の基礎.....	14
3.7. イメージング.....	15
3.8. 機器分析.....	17
第2章 レーザー.....	21
1. 概要.....	21
2. 原理.....	22
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.....	24
5.1. ファブリ・ペローダイオードレーザー.....	24
5.2. 分布帰還型レーザー(DFB-LD).....	24
5.3. 外部共振型ダイオードレーザー(EC-LD).....	25
第3章 理論.....	25
1. 赤外線.....	25
2. 赤外線の検出.....	27
2.1. 放射源.....	27
2.2. 伝達系.....	28
2.3. 光学系.....	29
2.4. 検出素子.....	31
2.5. 信号処理.....	31
3. 受光感度.....	32

4. 雑音等価電力(NEP:Noise Equivalent Power)	34
5. D^* について	34
5.1. D^* の理論的限界	35
6. 赤外線検出素子の種類	36
7. MCT(HgCdTe)赤外線検出素子	37
7.1. 分光感度特性	37
7.2. 温度特性	39
7.3. 直線性	40
7.4. 周囲温度	40
8. 光パワーメータ	41
9. 周期的分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate).....	41
10. 光吸収分光法	42
11. ロックインアンプ	43
第4章 実験	44
1. 使用機器	45
2. 差周波発生(DFG:Difference Frequency Generation).....	45
2.1. DFG の原理	46
2.2. 赤外光の確認	47
3. ジニトロベンゼン(DNB)について	47
3.1. 化学構造体・化学式	47
3.2. DNB の異性体の吸収度	48
4. DFB レーザーの電流－波長特性	49
5. バンドパスフィルター	51
6. 光ファイバについて	51
6.1. レーザによる光ファイバの損傷	52
6.2. 偏波保持波長分割多重カプラ	53
6.3. 光ファイバの損傷閾値	53
7. PPLN 制御	55
7.1. PPLN の動作条件	55
7.2. PPLN の変換効率	56
8. マルチパスセル	57
9. ガウシアンビームの集光	58
10. 実験結果	59
10.1. 赤外光の確認	59
10.2. DNB の異性体の選択	59
10.3. 光ファイバの損傷閾値の計算結果	60

10.4. PPLN 制御	62
10.5. マルチパスセル	62
10.6. ビームウェストの計算結果	63
第 5 章 まとめ	63
1. まとめ及び考察	63
謝辞	63
参考文献	64

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 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、爆発物検知に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システムを構築する。

2. 爆発とは

2.1. 定義

爆発とは、エネルギーの短時間で急激な開放。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。

2.2. 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、伝播速度が毎秒数 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 1 に爆薬の化学爆発を示す。

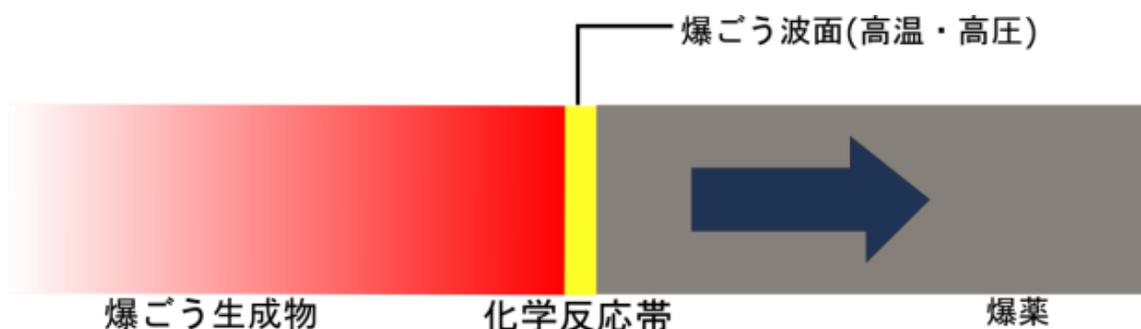


図 1 爆ごうの化学爆発

2.3. 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、通常の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		

3. 従来のガス検知方法

図2のTNTの吸収線より、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GNBでは、3.2 μm 付近の中赤外領域の吸収の計測を目標とする。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。

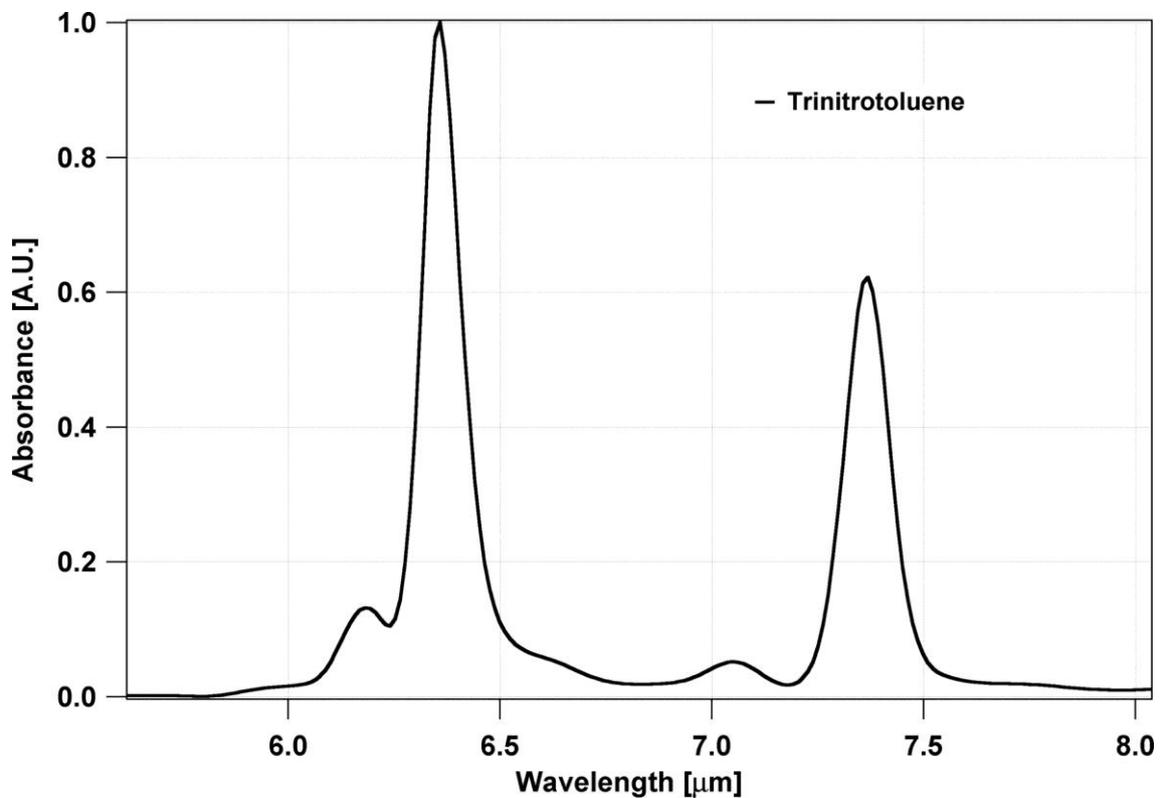


図2 TNTの吸収度

3.1. 爆発物探知

テロ対策のための爆発物探知は、以下のような内容で行われる。

- ・ 航空機の乗客、手荷物、貨物、液体物の検査

- ・郵便、小包の検査
- ・重要施設入口などにおける人、手荷物、自動車の検索
- ・建物内などで爆発物が隠されていないかの検索
- ・不審物が爆発物かどうかの検索
- ・公共交通機関、施設の安全のための爆発物探知

こうした内容で、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。爆発物探知は大きく 2 つに分けることができる。図 3 に示すように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。

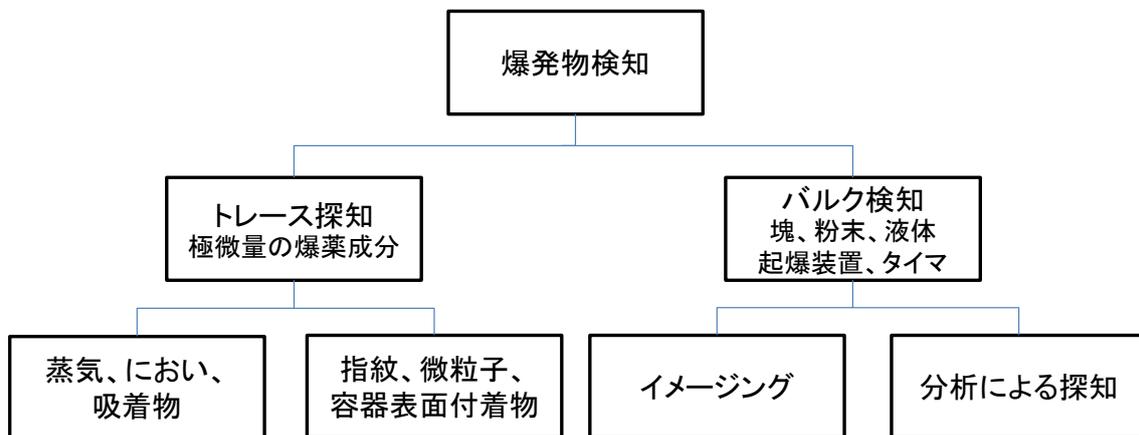


図 3 探知の種類

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て使用す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。

トレース検知、バルク検知いずれも多く多くの探知方法が検討されている。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を図4に示す。

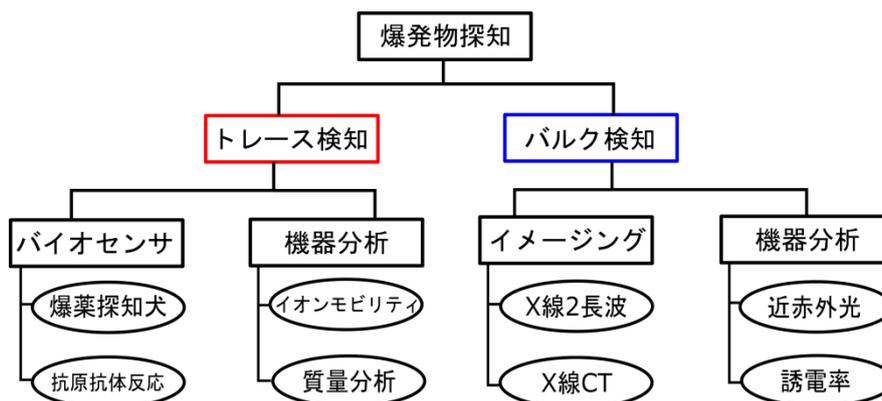


図4 探知装置の分類

3.2. トレース探知とは

トレース探知は、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。

トレース探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。

3.3. バイオセンサ

・爆薬探知犬

犬の鼻がどの程度の能力を持っているかについては、諸説あつては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^{-15} mol)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)を近づけるといふ点である。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、当然生き物であるから、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。

・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。

3.4. 機器分析

・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。

・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。

- ・増幅蛍光ポリマー

ニトロ化合物や有機過酸化物に高感度に反応する増幅蛍光ポリマーを使用したものが開発されている。原理としては、蛍光を持つ樹脂にニトロ化合物などの特定の化合物が付加することにより、蛍光が変化するのを検出するもので、高選択性、高感度である。現在ニトロ化合物、有機過酸化物対応の樹脂が開発され、それぞれの製品が出ている。センサー部分が非常に小型であり、持ち運び可能なものや、爆発物処理用ロボットのアームの先に取り付けてトレース探知を行う装置が実用化されている。

3.5. バルク探知とは

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、軽元素に感度の異なる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や、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、例えば人の検査などでは、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検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、人が着衣の下に隠した爆薬の探知や、液体爆薬の探知については、爆発物テロの新たな脅威として、その探知装置の開発が特に注目を浴びており、専用の装置も出てきている。

3.6. バルク探知の基礎

バルク探知は歴史的には、X 線による透過像により、脅威物をみつけることから発展してきた。これは、イメージングとして、爆薬の固まり、爆発物容器、起爆装置、時限装置などをその形状から判別するものである。爆薬は、軍用や産業用のような既製品では、形が決まっているが、手製爆薬では、決まった爆薬の形もなく、さらに密度や、固体、液体、などの物理的性質も多種多様である。これを識別するためには形状だけでなく、密度、原子番号、結晶構造、誘電率、電磁波吸収などの物理特性を測定する必要がある。

識別原理として、X 線(2 波長、CT、後方散乱、回折)、核四重極共鳴、中性子放射化など

が検討され、実用化されてきている。人に対しては、その健康に影響を及ぼさないことが必要となるため、ミリ波、テラヘルツ波、核四重極共鳴、X線後方散乱などの原理を使用した装置が使われる。液体物の検査では、テラヘルツ波、ラマン散乱、誘電率、近赤外光なども透明な容器に入ったものの検査で使用される。

これらの原理の中でX線2波長、X線CT、X線後方散乱、ミリ波などは、主にイメージングを用いるのに対して、核四重極共鳴、ラマン散乱、誘電率、X線回折、中性子放射化などは化学的、物理的分析を行って材質識別をするものである。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みつけることをバルク探知とする。

3.7. イメージング

・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、誤報率を下げる事が可能となっている。

・ 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。

3.8. 機器分析

・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。

・誘電率

誘電率(比誘電率)とは、気体、液体、固体問わず、絶縁性物質のもつ基本的な電気定数である。真空の状態では誘電率 1.0、空気の場合は約 1.0、水の場合は約 80 の誘電率を有する。導電性物質は誘電率が大きく、絶縁性物質は誘電率が小さくなる。一部の物質は、粉体や塊体などの状態や環境によって誘電率が変化することがある。また、温度によっても変化する。

表 2 に様々な物質の誘電率を示す。誘電率の測定により、様々な物質の有無や量、成分、混合比、濃度などを計測できる。爆薬の誘電率については、表に示すように、固体爆薬で 3~7、液体爆薬で 19~71 の値である。誘電率を活用することにより、容器に入った液体が

水溶液か可燃性液体かの識別や、ミリ波などによる吸収、反射が誘電率によって変化するので、衣服の下に爆薬が隠されていないかや、液体が水か油かの識別などに応用されている。

表 2 物質の比誘電率

物質	比誘電率
アクリル樹脂	2.7~4.5
アセトン	21
硫黄	3.8~4.5
エタノール	25
エチレングリコール	37
塩化ナトリウム	5.9
ガソリン	2.2
グリセリン	43
軽油	1.8
小麦	3
砂糖	3
水溶液	50~80
石膏	5.3
灯油	1.8
ニトロベンゼン	36
尿素	3.5
蜂蜜	2.9
水	80
メタノール	33
ワセリン	2.2~2.9

・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

3 に爆薬成分の分子量と 25℃での蒸気圧を示す。

表 3 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

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($10^{-6}, 10^{-1}$ Pa)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($10^{-9}, 10^{-4}$ Pa)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 $0.1\text{ng} \cdot \text{cm}^{-3}$ 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、拭い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、花火などの無機成分からなり、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($10^{-12}, 10^{-7}$ Pa)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 5 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 100 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。

本研究では、この蒸気圧探知の方法を用いて爆発物の検知を行うシステムを構築する。

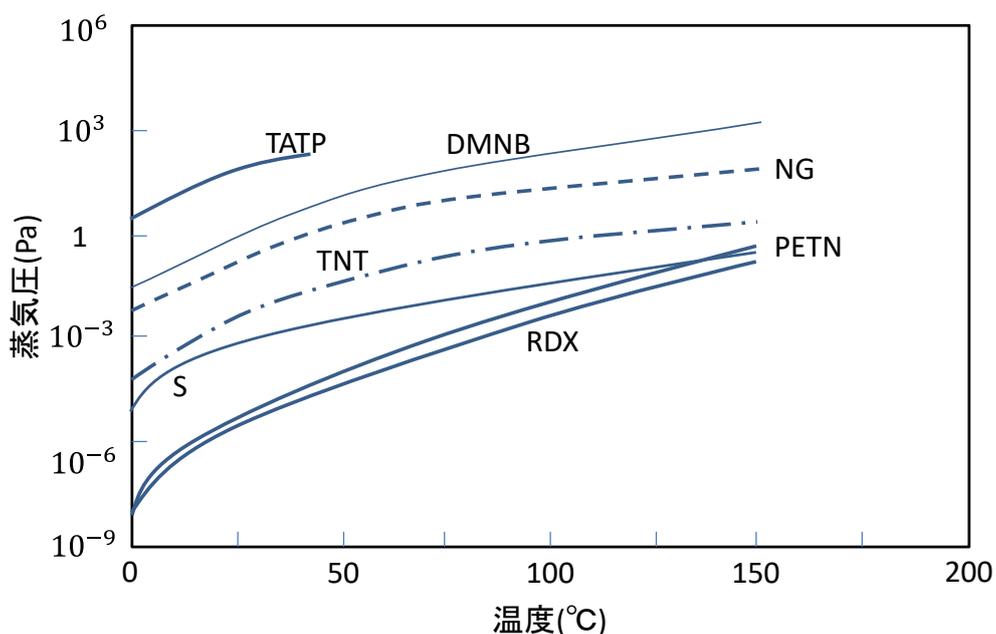


図5 爆薬成分の蒸気圧-温度曲線

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・ペロー共振器である。ファセットミラーとなるよう反射率の鏡を 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. 分布帰還型レーザー(DFB-LD)

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。DFB-LD は、本研究で使用するレーザーである。

5.3. 外部共振型ダイオードレーザー(EC-LD)

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。

第3章 理論

1. 赤外線

赤外線とは、可視光より長い波長 $0.75\mu\text{m}$ (1.65eV)から、 $1000\mu\text{m}$ (meV)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、 $6\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ の波長を遠赤外光と呼ばれることがある。^[3]

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。

赤外線の放射量は物体の温度と表面状態によって決まる。ここで、全ての波長を吸収するような物体があると仮定したとき、このような物体を黒体といい、黒体については次の式が成り立つ。

(1) 黒体の分光放射発散度(プランクの法則)

T :絶対温度[K]

C_1 :第 1 放射定数= $3.74 \times 10^4 [\frac{W}{cm^2} \mu m^4]$

C_2 :第 2 放射定数= $1.44 \times 10^4 [\mu m k]$

λ :波長[μm]

$$M\lambda = C_1\lambda - 5[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1]^{-1}[\frac{W}{cm^2} \mu m]$$

(2) ステファン・ボルツマンの法則

s :ステファン・ボルツマン定数= $5.67 \times 10^{-12} [W/cm^2 K^4]$

$$M = \sigma T^4 [W/cm^2]$$

(3) ウィーンの変位則

λ_{max} : 最大放射波長

$$\lambda_{max}T = 2897.8 [\mu m k]$$

図 6 に、黒体の分岐放射輝度を示します。黒体でない物体については以下の関係が成り

立つ。

ε :放射率

$$M' = \varepsilon M$$

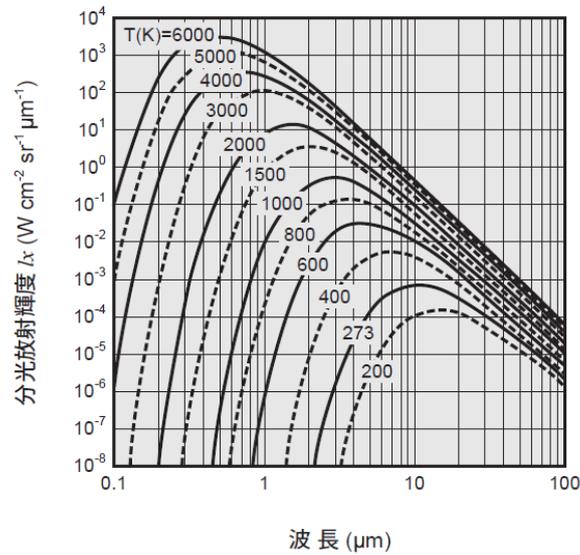


図 6 黒体の分岐放射輝度

2. 赤外線を検出

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 7 のような構成になる。

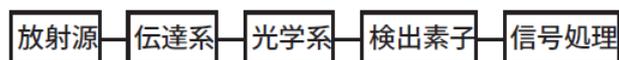


図 7 赤外線の検出系

2.1. 放射源

前に述べたように、絶対温度 0 K 以上の物体はすべて赤外線を放射しています。例えば、310K(37°C)の人体は 10 μ 付近にピーク波長をもつ赤外光を放射しています。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 8 に主な赤外線レーザーの発振波長領域を示す。

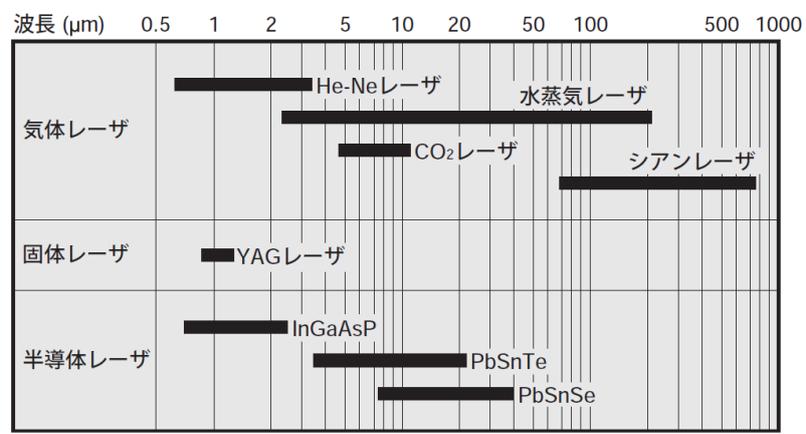


図 8 主な赤外線レーザーの発振波長領域

2.2. 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ります。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。また、図 9 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。

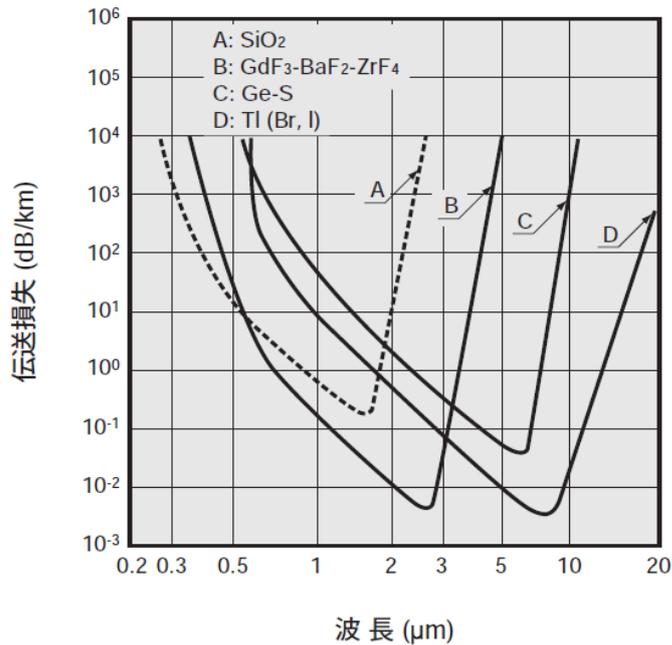


図 9 光ファイバの理論伝送損失

2.3. 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。図 10 は、主な赤外線用光学系の透過率を示したものである。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や赤外線を ON-OFF するためのチョッパなどが必要な場合もある。

バンドパスフィルタを設計する時には、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。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 11 にバンドパスフィルタの透過特性例を示す。

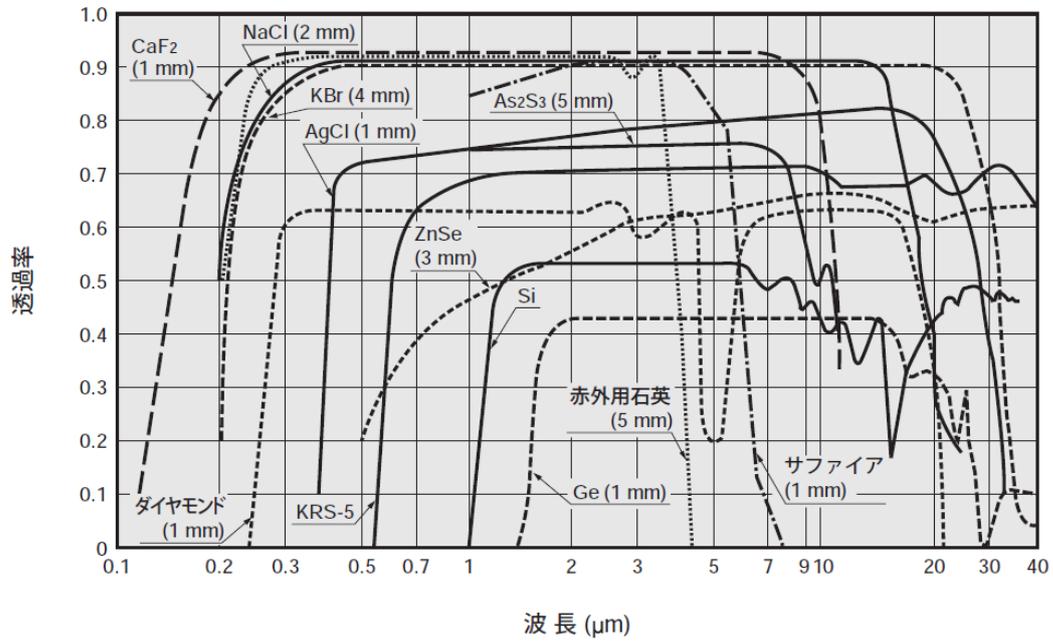


図 10 各種光学系の透過率

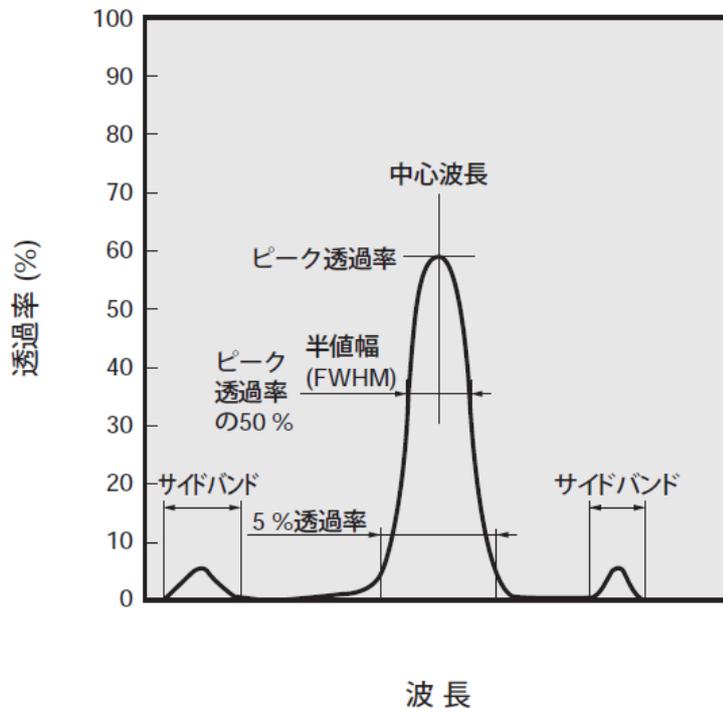


図 11 バンドパスフィルタの透過特性例

2.4. 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り、赤外線のもつエネルギーは次式で表される。

$$h : \text{プランク定数} = 6.626 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}] = 4.14 \times 10^{-15} [\text{eV} \cdot \text{s}]$$

$$c : \text{光速} = 3 \times 10^{10} [\text{cm/s}]$$

$$\lambda : \text{波長} = [\mu\text{m}]$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} [\text{eV}]$$

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。

2.5. 信号処理

通常は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。前置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、同調増幅器をしよう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。

図 12 に Insb 光起電力素子を使った微弱光測定用回路の例を示す。

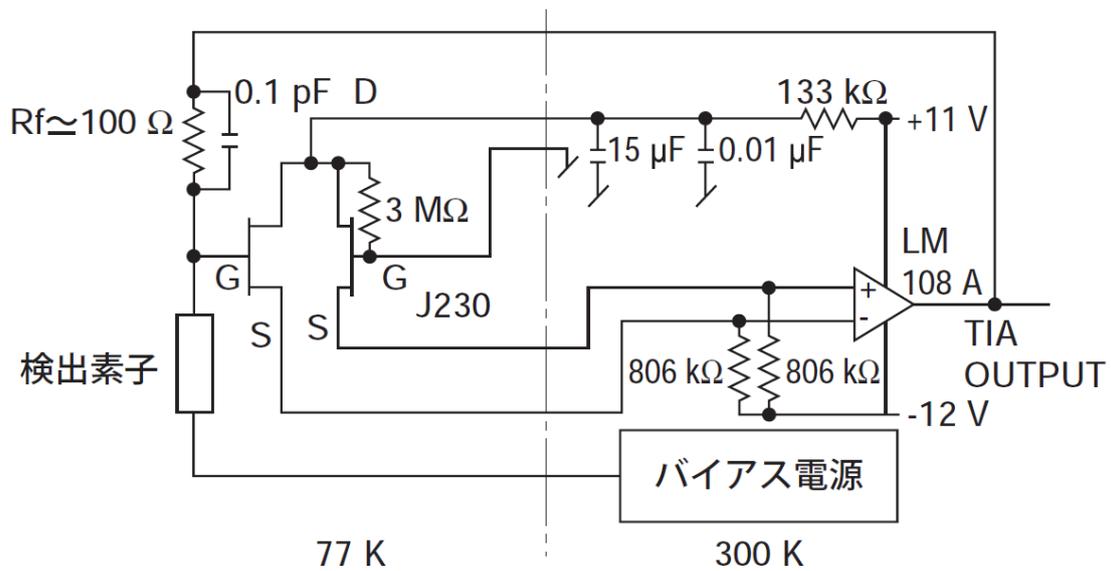


図 12 信号処理回路例

3. 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。

S : 信号出力[V]

P : 入射エネルギー[W/cm²]

A : 検出素子の受光面積[cm²]

$$R = \frac{S}{PA} [\text{V/W}]$$

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。ある特定の波長の光が入射した場合、光電流 I_{sc} は次式のように表されます。

q : 電子の電荷

η : 量子効率

$$I_{sc} = \eta q \frac{PA}{h \frac{c}{\lambda}} = \frac{\eta q PA \lambda}{hc}$$

したがって受光感度 R_λ は、以下の式で表せられる。

$$R_\lambda = \frac{I_{sc}}{PA} = \frac{\eta q \lambda}{hc} = \frac{\eta \lambda}{1.24}$$

量子効率 η と R_λ は次のような関係になる

$$\eta = 1.24 \frac{R_\lambda}{\lambda}$$

また、光導電素子の場合、図 13 のように回路で電圧として信号を取り出すため受光感度の

単位は V/W である。出力電圧 V_o は以下の式で表される。

$$V_o = \frac{R_L}{R_d + R_L} V_B$$

光が入射したとの R_d の変化による ΔR_d による V_o の変化は以下の式で表される。

$$\Delta V_o = \frac{R_L V_B}{(R_d + R_L)^2} \cdot \Delta R_d$$

また、 ΔR_d は以下の式で表せられる

τ : キャリアの寿命

μ_e : 電子の移動度

μ_h : 正孔の移動度

σ : 電気伝導度

$$\Delta R_d = -R_d \frac{q(\mu_e + \mu_h)}{\sigma} \cdot \frac{\eta \tau \lambda PA}{I w d h c}$$

そのため、受光感度は以下の式で表される。

$$R_\lambda = \frac{\Delta V_o}{PA} = \frac{q \eta \tau \lambda (\mu_e + \mu_h)}{\sigma I w d h c} = \frac{R_d R_L V_B}{(R_d + R_L)^2}$$

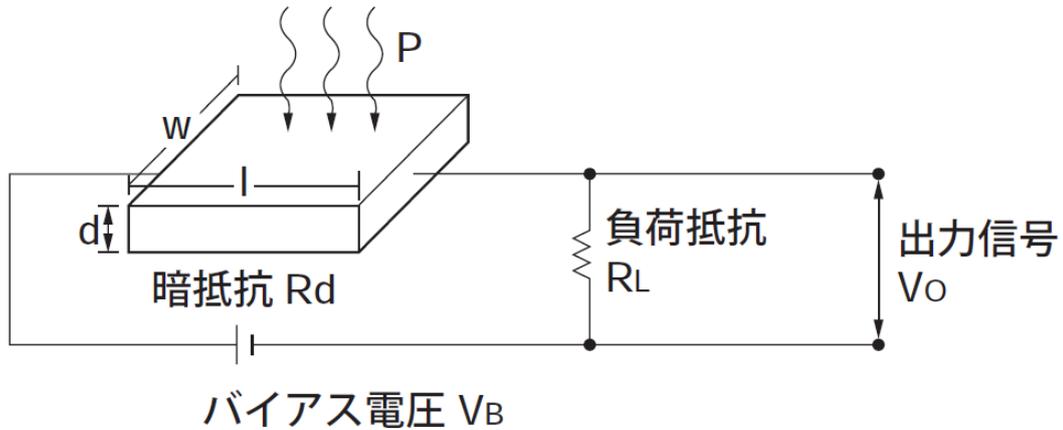


図 13 光導電素子の出力信号測定回路

4. 雑音等価電力(NEP:Noise Equivalent Power)

雑音量に等しい入射光量、つまり信号対雑音(S/N)が 1 となるときの入射光量で示す。

N:ノイズ出力[V]

Δf :雑音帯域幅[Hz]

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

5. 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します。

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 1cm²、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。なお、 D^* は以下の式から求められる。

$$D^* = \frac{S/N \cdot \Delta f^{1/2}}{P \cdot A^{1/2}}$$

S は信号、 N は雑音、 P は入射エネルギー [W/cm^2]、 A は受光面積 [cm^2]、 Δf は雑音帯域幅 [Hz]を表します。また、 D^* と NEP の間には以下の関係が成り立つ。

$$D^* = \frac{A^{1/7}}{\text{NEP}}$$

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。

5.1. D^* の理論的境界

赤外線を検出するときのノイズには赤外線検出素子自体からのノイズ、回路からのノイズのほか、背景光のゆらぎによるノイズがある。赤外線検出素子および回路から発生するノイズが背景光のゆらぎによるノイズに比べて無視できると仮定した場合には、検出限界は背景光のゆらぎによるノイズのみによって決まる。これを **Background Limited Infrared Photodetection (BLIP)**と呼ぶ。BLIPにおける光起電力素子または光導電素子の D^* は、以下の式によって表される。

Q:背景雑音放射光子量子束

$$\text{光起電力素子の } D_{\lambda}^* = \frac{\lambda \sqrt{\eta}}{hc \sqrt{2Q}} [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}]$$

$$\text{光導電素子の } D_{\lambda}^* = \frac{\lambda\sqrt{\eta}}{2hc\sqrt{2Q}} [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}]$$

6. 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 14 に赤外線検出素子の分類と特性を示す。図 15 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^* ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$)	
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	$D^*(\lambda, 10, 1) = 6 \times 10^8$	
				300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 1 \times 10^8$	
				300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 1 \times 10^8$	
				300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 2 \times 10^8$	
量子型検出素子	真性型検出素子	光導電型	PbS	1~3.6	300	$D^*(500, 600, 1) = 1 \times 10^9$
			PbSe	1.5~5.8	300	$D^*(500, 600, 1) = 1 \times 10^8$
			InSb	2~6	213	$D^*(500, 1200, 1) = 2 \times 10^9$
			HgCdTe	2~16	77	$D^*(500, 1000, 1) = 2 \times 10^{10}$
	真性型検出素子	光起電力型	Ge	0.8~1.8	300	$D^*(\lambda p) = 1 \times 10^{11}$
			InGaAs	0.7~1.7	300	$D^*(\lambda p) = 5 \times 10^{12}$
			Ex. InGaAs	1.2~2.55	253	$D^*(\lambda p) = 2 \times 10^{11}$
			InAs	1~3.1	77	$D^*(500, 1200, 1) = 1 \times 10^{10}$
	不純物型検出素子		InSb	1~5.5	77	$D^*(500, 1200, 1) = 2 \times 10^{10}$
			HgCdTe	2~16	77	$D^*(500, 1000, 1) = 1 \times 10^{10}$
			Ge: Au	1~10	77	$D^*(500, 900, 1) = 1 \times 10^{11}$
			Ge: Hg	2~14	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 8 \times 10^9$
Ge: Cu	2~30	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$			
Ge: Zn	2~40	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$			
Si: Ga	1~17	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$			
Si: As	1~23	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$			

図 14 赤外線検出素子の分類と特性

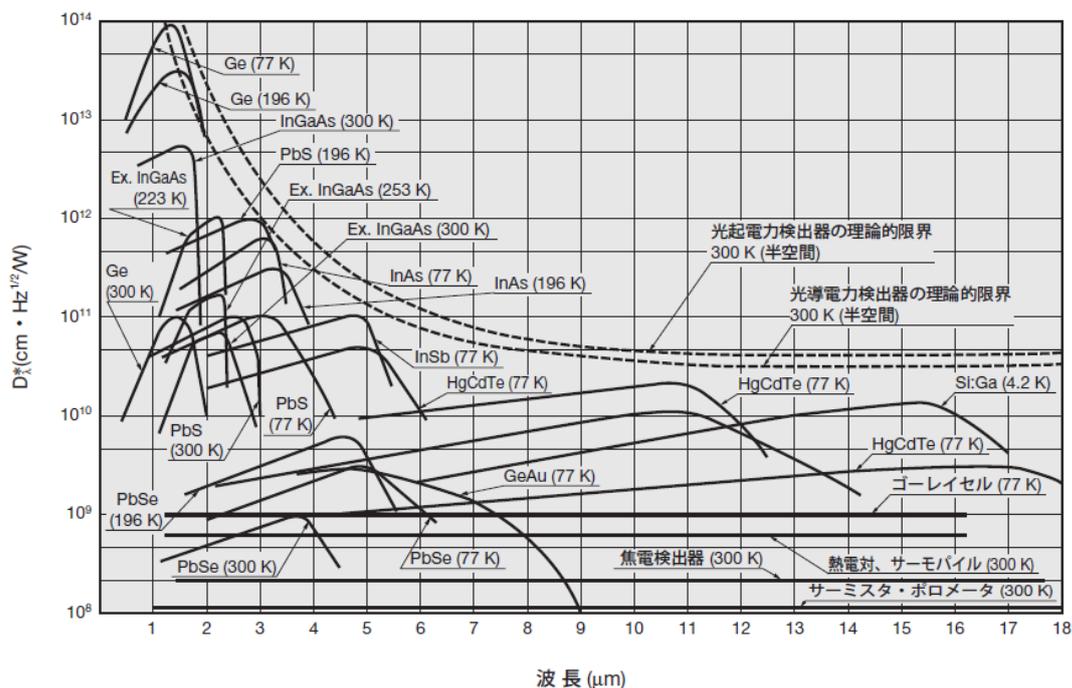


図 15 赤外線検出素子の分光感度特性

7. MCT(HgCdTe)赤外線検出素子

MCT(HgCdTe)赤外線検出素子には、赤外線が入射すると抵抗値が減少する光導電素子と、InGaAs と同様に PN 接合をもった光起電力素子がある。

7.1. 分光感度特性

HgCdTe の結晶は、HgTe と CdTe の組成比によってバンドギャップエネルギーの値が変わる。組成比を変えることによって、複数の波長に最大感度波長をもった赤外線素子を作ることができる。バンドギャップエネルギー(E_g)とカットオフ波長(λ_c)の間には以下の関係がある。

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g}$$

バンドギャップエネルギーは組成比のほか、素子温度によっても変わる。以下にバンドギャップエネルギー E_g の式を示す。

X : $Hg_{1-x}Cd_xTe$ の組成比を表す

T :絶対温度

$$E_g = 1.59X - 0.25 + 5.23 \times 10^{-4}T(1 - 2.08X) + 0.327X^3 [\text{eV}]$$

素子温度が高くなるとバンドギャップエネルギーは大きくなり、最大感度波長は短波長側にシフトする。図16にMCT光導電素子の分光感度特性を示す。

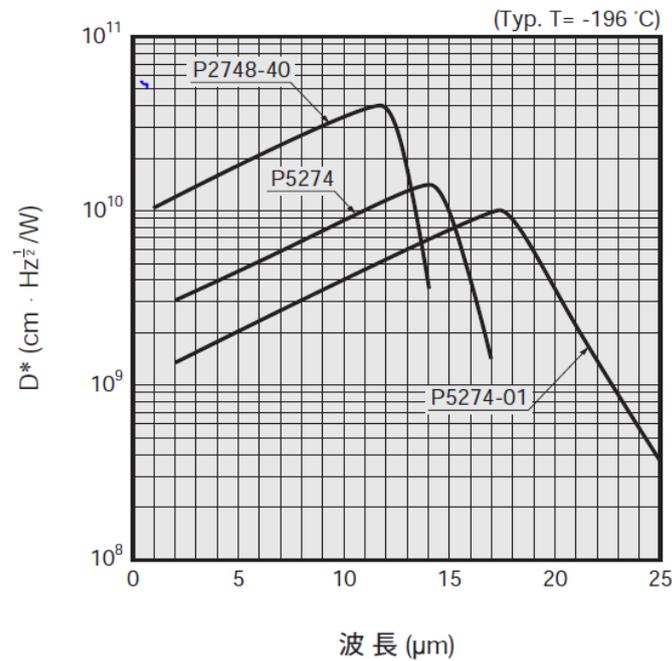


図16 MCT光導電素子の分光感度特性

7.2. 温度特性

MCT 赤外線検出素子の D^* と分光感度特性は、素子温度によって変化する。温度が上がるにつれて、 D^* は減少し、分光感度特性は短波長側にシフトする。本研究で用いている 3~5 μm 帯用の MCT 光導電素子 P2750 の D^* およびカットオフ波長の温度特性を図 17、18 に示す。

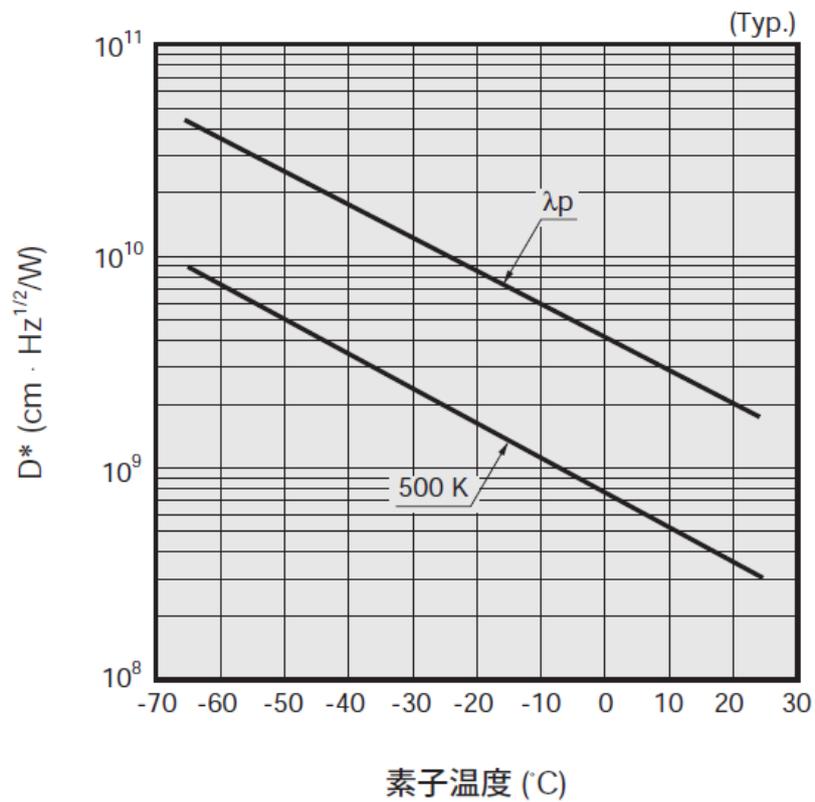


図 17 D^* の温度特性

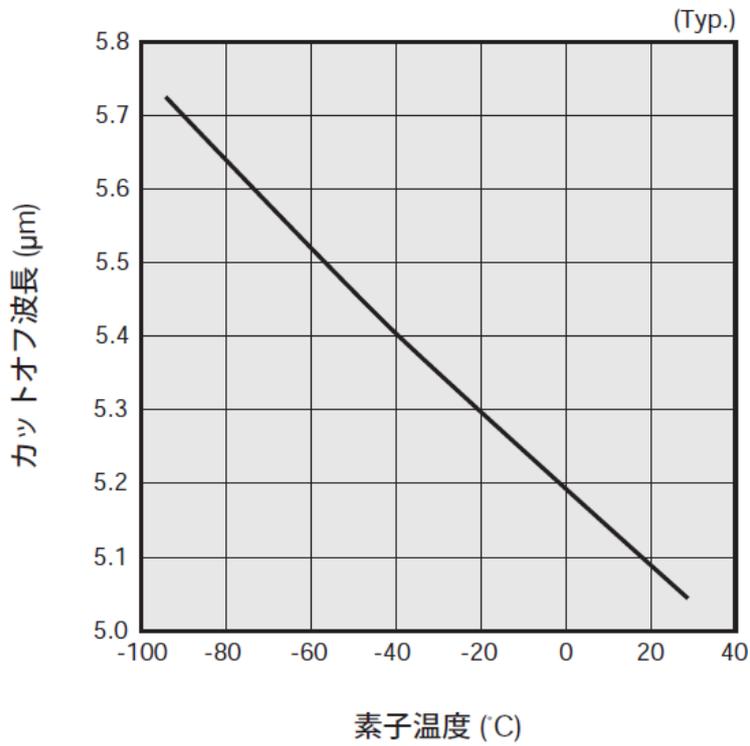


図 18 カットオフ波長の温度特性

7.3. 直線性

MCT 光起電力素子の直線の上限は、MCT 光導電素子の数 mW/cm^2 に比べると 1 桁以上よい特性を示す。

7.4. 周囲温度

MCT 光導電素子は、使用する周囲温度の変化によって感度が変わることがある。周囲温度が上昇すると、背景放射光子が増加し、素子内のキャリア数が増加する。そのため、信号光によって励起されたキャリアの平均寿命が短くなり、感度が小さくなる。

MCT 光起電力素子にほいても、環境温度による背景放射の変化は暗電流の変化に反映される。このような現象を防ぐためには、余分な背景光を拾わないよう、光学系の設計に注意する必要がある。

8. 光パワーメータ

光パワーメータは、光の強さを測定するもので、光ファイバ通信・レーザー光検出などの用途がある。光パワーメータでは、光ファイバの伝送損失、レーザーパワーの測定などを行う。光パワーに要求される特性は、直線性とユニフォミティである。低いパワーの光も低雑音で検出できるように、冷却型の検出素子を使用する場合がある。

9. 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 (LiNbO_3) 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 を用いて、光源である半導体レーザーの波長変換を行った。

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 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。

10. 光吸収分光法

レーザー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、多点測定可能、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。図 19 に光吸収分光法の概略図を示し、図 20 に光吸収分光法により得られた信号の吸収線の図を示す。

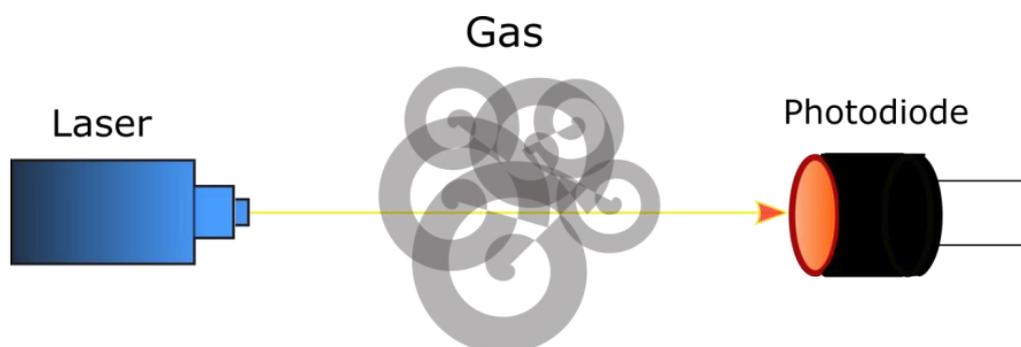


図 19 光吸収分光法の概略図

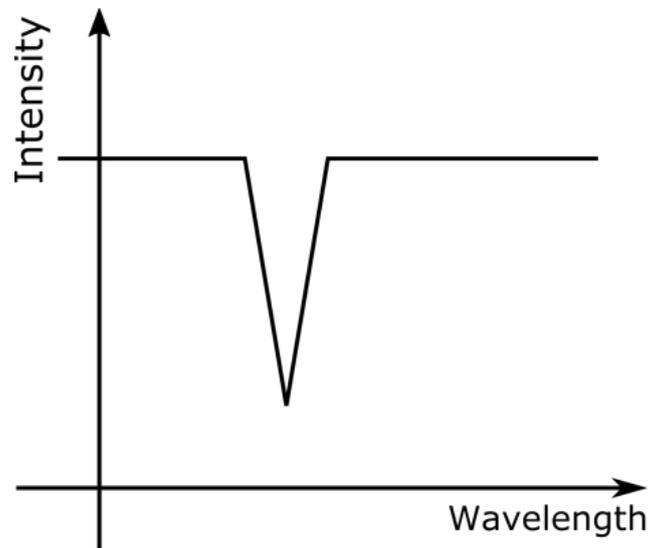


図 20 吸収線の例

11. ロックインアンプ

ロックインアンプは、物理、化学、生物、医学(バイオ)などの科学研究や、それを応用した製造・試験設備に使用されている。実際に計測を行うのは、特定の物質の密度、物質にかかっている力、傷の大きさや位置など、電気信号ではないことが多い。そのため、これらと関連する量や光、磁気を捉えるセンサで電気信号に変換するなどして測定を行う。

ロックインアンプで直接測定できるのは、交流(正弦波)の電圧または電流の「大きさ(実効値)」と「位相(基準からの時間的なずれ)」である。□

ロックインアンプの大きな特徴は、雑音に埋もれて普通の電圧計では測れない、微小な信号を測定できることである。また、雑音の大小を問わずに、微小な変化の測定、位相検波する時にも使用することができる装置である。

第4章 実験

本研究では $3.2\mu\text{m}$ 帯の中赤外光を生成し、光吸収分光法によって爆薬蒸気の検知を行う光源側のシステムの構築を行う。

爆発物検知では、爆薬に多く使用されるトリニトロトルエン(TNT)を測定すべきであるが、取り扱いに危険が伴うため、吸収スペクトルのピークの値が近く、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のシステムを構築する。図21に本研究で作成した光源のシステムを示す。

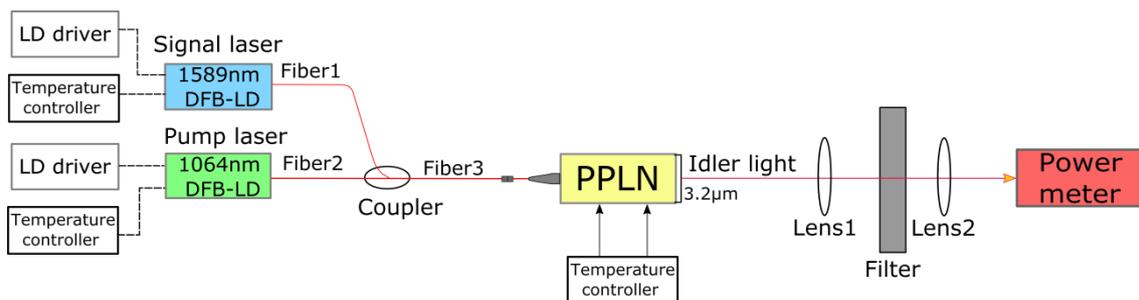


図21 光源のシステム

1. 使用機器

表 3 使用機器

品名	メーカー	型番	仕様
LDドライバ	THORLABS	LDC202C	20mA/V 250kHz
LDドライバ	THORLABS	LDC205C	50mA/V 150kHz
DFB-LD	NTTエレクトロニクス	NLK1L5EAAA	1589nm
DFB-LD	Redfern Integrated Optics	QLD1061	1064nm
プリアンプ	FITリーディングテックス	PTCC-01-BAS	
赤外線検出器	FITリーディングテックス	PIP-DC-20M-F-M4	素子:MCT
チョッパー	THORLABS	MC2000B	
波長変換モジュール	NTTエレクトロニクス	WD-3218-000-A-B-C	
フォトダイオード	THORLABS	S401C	
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ブラ	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

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

本研究で扱う PPLN(WD-3218-000-A-B-C)⁵⁾ 形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、3226nm の DFG(差周波発生)光を発生させるように設計されている。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。

2.1. DFG の原理

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(1)式で表される。

$$E = E_1 \sin(\omega_1 t) + E_2 \sin(\omega_2 t) \text{ ----- (1)}$$

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(2)式で表される。

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

(1)式を(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差周波発生となる。^[6]

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 ω_3 ($\omega_3 = \omega_2 - \omega_1$)が発生する現象である。図 22 に差周波発生の配置とエネルギー関係を示す。^[5]

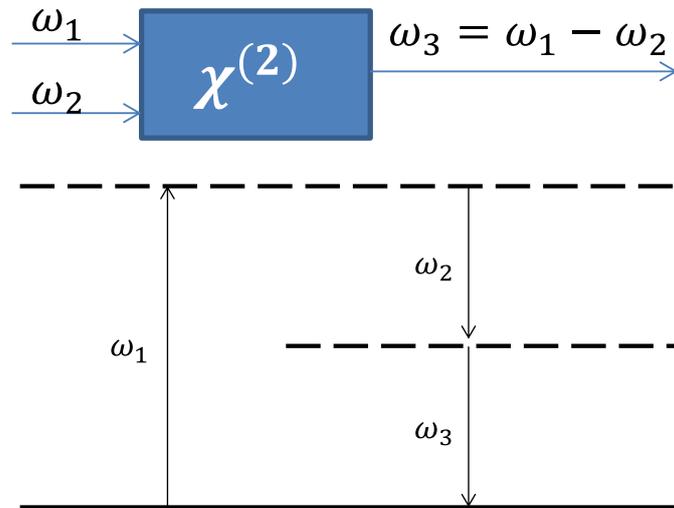


図 22 差周波発生の配置とエネルギー

2.2. 赤外光の確認

本研究では 3.2 μm の波長が要求されるため、1064nm(シグナル光)と、1589nm(アイドラー光)の DFB レーザーを用いて光源のシステムを構築し、PPLN から 3.2 μm 帯の赤外光が出射されているか確認を行う。

3. ジニトロベンゼン(DNB)について

3.1. 化学構造体・化学式

DNB の化学式は $\text{C}_6\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_4$ 、分子量 168.1、蒸気圧 2.6644E-3Pa の薬品である。また、3 つの異性体が存在する。

図 23, 24, 25 に 1,2-DNB、1,3-DNB、1,4-DNB を示す。

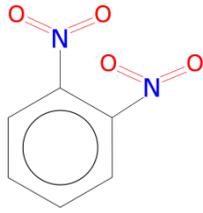


図 23 1,2-DNB

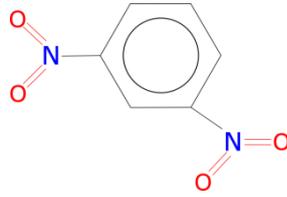


図 24 1,3-DNB

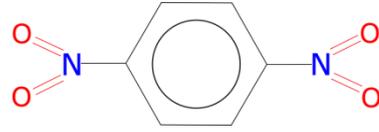


図 25 1,4-DNB

3.2. DNB の異性体の吸収度

DNB には 1,2-DNB、1,3-DNB、1,4-DNB 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ため、本研究で扱うジニトロベンゼンの選択を行う。

また、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。ジニトロベンゼンの各異性体の波長-吸収度特性を可視化するため NIST データベース^[7]ータを元にグラフ化した結果を図 26 に示す。

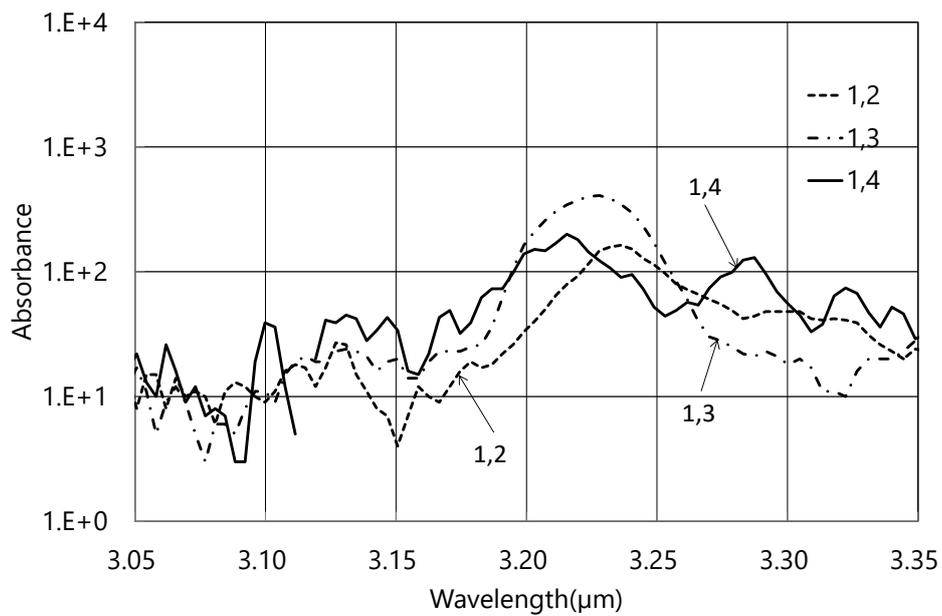


図 26 DNB の各異性体の波長-吸収度特性

グラフより、1, 2-DNB、1, 3-DNB、1, 4-DNB の吸収度が最大となる波長は 3. 236 μm 、3. 228 μm 、3. 215 μm となった。

4. DFB レーザーの電流－波長特性

DFB レーザーから出射される光の波長は、レーザーの温度と、印加する電流によって波長が変わる。その特性を用いて DFB レーザーの波長の可変領域を調べることができる。

図 27、28 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。また、シグナル

光とポンプ光の周波数ごとの DFG 変換した結果を図 29 に示す

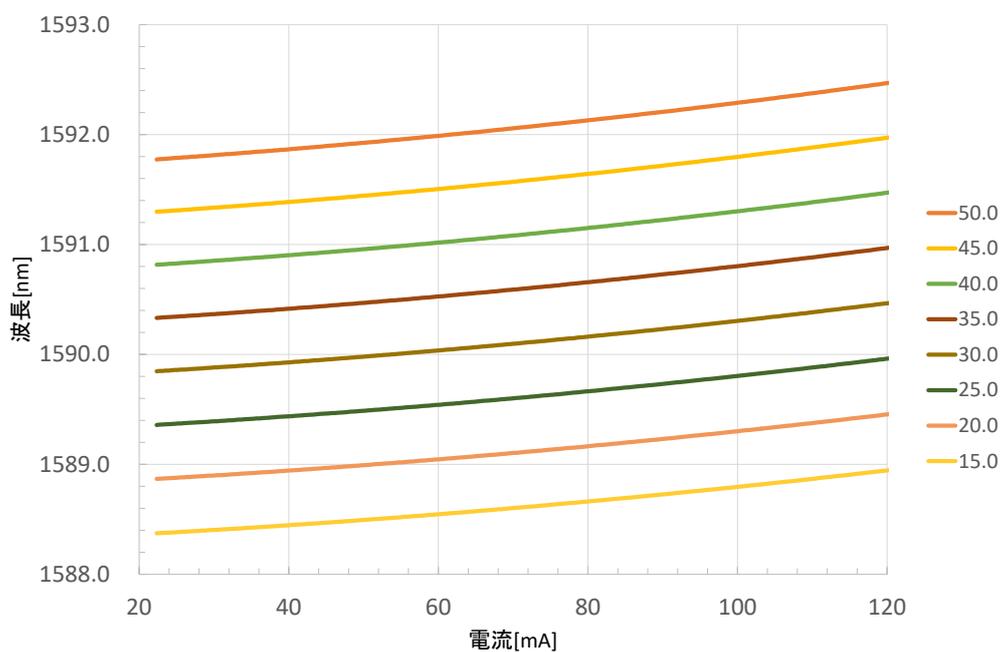


図 27 シグナル光の DFB レーザーの電流波長特性

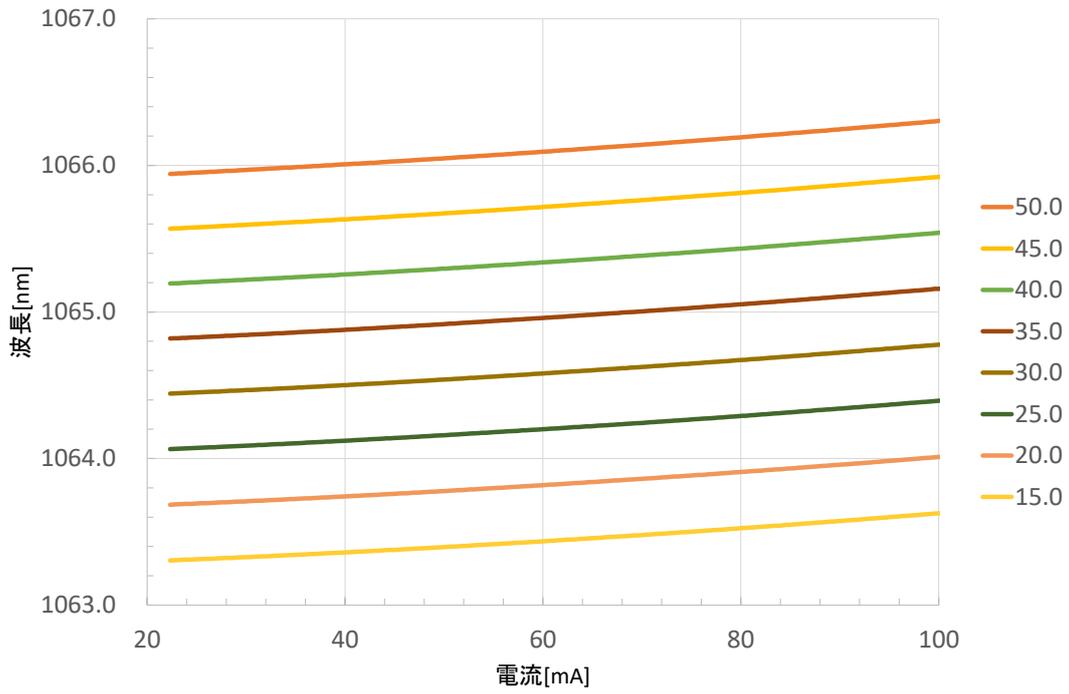


図 28 ポンプ光の DFB レーザーの電流波長特性

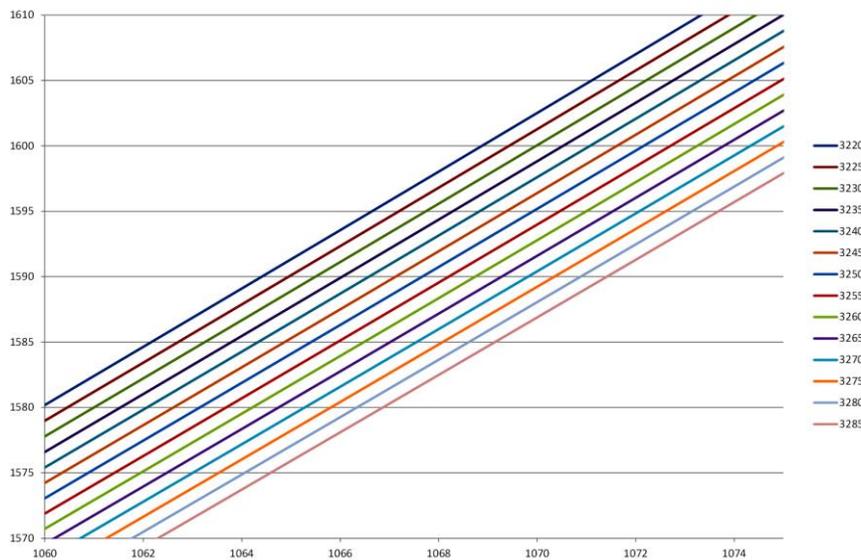


図 29 DFG 変換後の出力

5. 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 の励起光はカットされる構造となっている。しかし、1.5 μm の信号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 1.5 μm 帯の信号光が不要になる。そこで、1.5 μm 帯の信号光と背景雑音を除去するため、バンドパスフィルター(FB3250-500)⁸⁾いる。

図 30 に本研究で使用した、バンドパスフィルター(FB3250-500)の周波数ごとの透過率を示す。

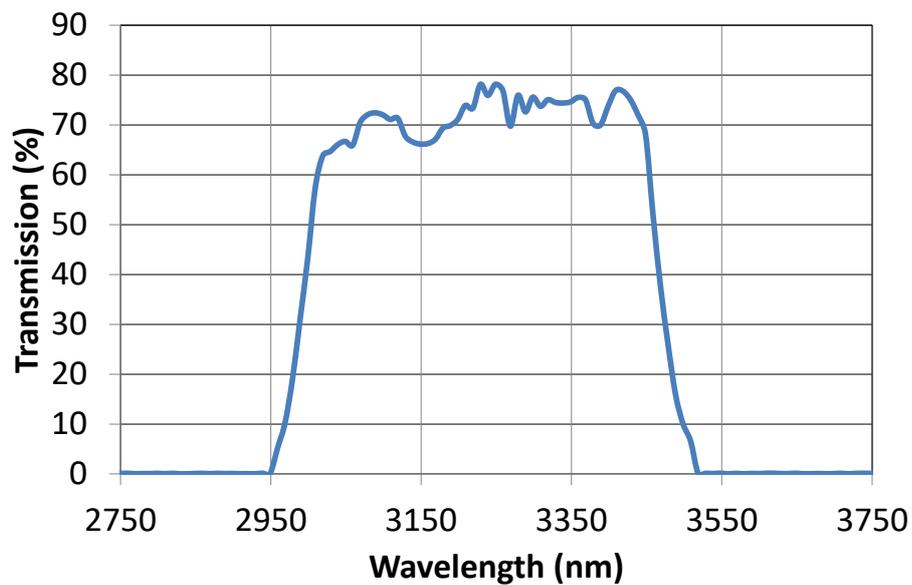


図 30 バンドパスフィルターの透過率

6. 光ファイバについて

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。

6.1. レーザによる光ファイバの損傷

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。特に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。

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。自由空間光を良い結合効率でファイバに入射するためには、このモードフィールド径の約 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 31 に安全余裕の表を乗せる。

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 31 安全余裕

6.2. 偏波保持波長分割多重カプラ

偏波保持分割多重カプラは、入射光の偏光状態を維持しながら複数の波長を結合します。

低損失で、本研究で使用する WD202APM では ≥ 20 dB、の高偏波消光比(PER)をもたらす。

双方向での使用が可能のため、2種類の波長を含む光を2つの異なる出力ファイバに分岐させることもできる。

6.3. 光ファイバの損傷閾値

マルチモードファイバ(MM)の実効面積は、コア径によって定義されるが、一般的にその値はシングルモードファイバの MFD よりもはるかに大きくなる コアサイズが大きいことによりパワー密度が減少するので、マルチモードファイバには通常キロワット単位の光を入射しても損傷は生じない。

しかし、高出力のパルスレーザを入力する用途にシングルモードファイバをあまり使用しないのは、シングルモードファイバに入力するためにビームを非常に小さな面積に集光させる必要があり、その結果パワー密度が非常に高くなってしまうからである。また、シングルモードファイバは、UV 光への適用機会もない。それは、UV 光を用いた場合 MFD が非常に小さくなるため、出力も非常に小さくなり、さらに結合が難しくなるためである。以下にレーザーによるファイバの損傷閾値の計算例を示す。

シングルモードファイバ SM400 が、連続光、400 nm で動作している場合、モードフィールド径(MFD)は約 $\varnothing 3 \mu\text{m}$ 。結合効率がよくなるよう、通常 MFD の 80%に光が集光されているので、これによって実効直径 MFD は $\varnothing 2.4 \mu\text{m}$ 。以下に実行面積を Area として計算式を示す。

$$\text{Area} = \pi r^2 = \pi(\text{MFD}/2)^2 = \pi \cdot 1.2^2 \mu\text{m}^2 = 4.52 \mu\text{m}^2$$

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、上の表の「Practical Value(実用値)」を使用して以下の計算式になる。損傷閾値の外挿値は 11.3 mW となる。

$$250 \text{ kW}/\text{cm}^2 = 2.5 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$$

$$4.52 \mu\text{m}^2 \cdot 2.5 \text{ mW}/\mu\text{m}^2 = 11.3 \text{ mW}$$

7. PPLN 制御

7.1. PPLN の動作条件

本研究では、PPLN モジュールを用いて、非線形効果の一つである第二高調波発生を利用し、波長 1064nm の励起光、1589nm の信号光に対し、3.2 μ m の DFG 光を発生するように設計されている。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た温度制御により所定の位相整合ができる。また、各 DFB レーザーに印加する電流が変化した場合、PPLN から出力される光の強度も変化する。以上の 2 点をふまえて、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と、シグナル光とポンプ光の DFB レーザーにそれぞれ印加する電流を変化させた場合のアイドラー光の強度を計測する。図 32、図 33 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

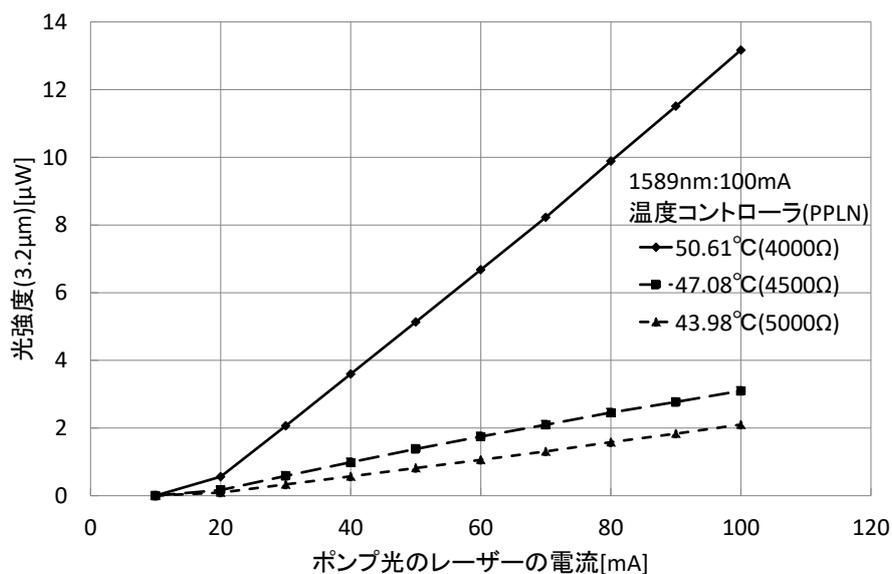


図 32 PPLN を温度変化させたときのアイドラー光の強度 (シグナル光のレーザーの電流 : 100mA)

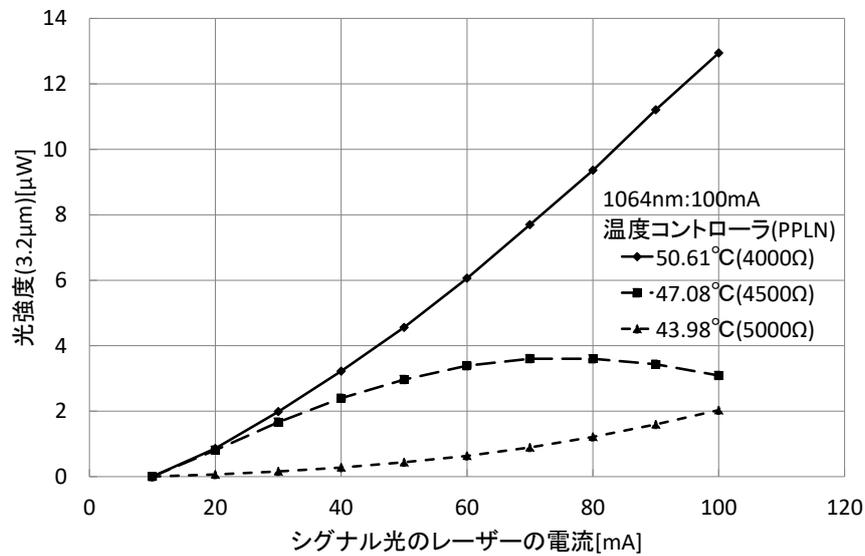


図 33 PPLN を温度変化させたときのアイドラー光の強度 (ポンプ光のレーザーの電流 : 100mA)

7.2. 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、PPLN を温度変化させたときのアイドラー光の強度と、シグナル光とポンプ光の DFB レーザーにそれぞれ印加する電流を変化させた場合のアイドラー光の強度を計測する。また、PPLN の変換効率 η (%/W) を(1)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。

$$\eta = \frac{P_i}{P_s P_p} \times 100 \text{-----} (1)$$

8. マルチパスセル

多重反射セルとは水平面上に向い合せに設置させた複数枚の凹面鏡、または円形の鏡にレーザーを入射し、多重反射させることで実質的に光路長を長くすることができる装置である。本研究では、同じ曲率半径を有する2枚の凹面鏡を用いて構成された Herriott 型多重反射セルを用いる。図 34 にマルチパスセルを用いた光源のシステムを示す。また、ミラーには $3.2\mu\text{m}$ 帯で反射率の高い金のミラーを用いるが、反射回数が多くなると減衰率が無視できない値となるため減衰率の計算を行う。PPLN から出力される光の強度を P_1 ミラーの減衰率を R 、反射回数を n とした場合、マルチパスセル内を通過後の光の強度 P_0 は以下の式で示される。

$$P_0 = R^n P_1$$

図 35 に周波数ごとの金のミラーの反射率を示す。

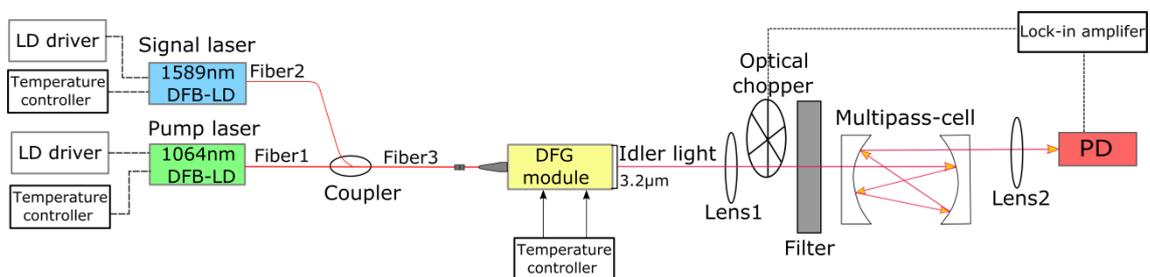


図 34 マルチパスセルを用いた光源のシステム

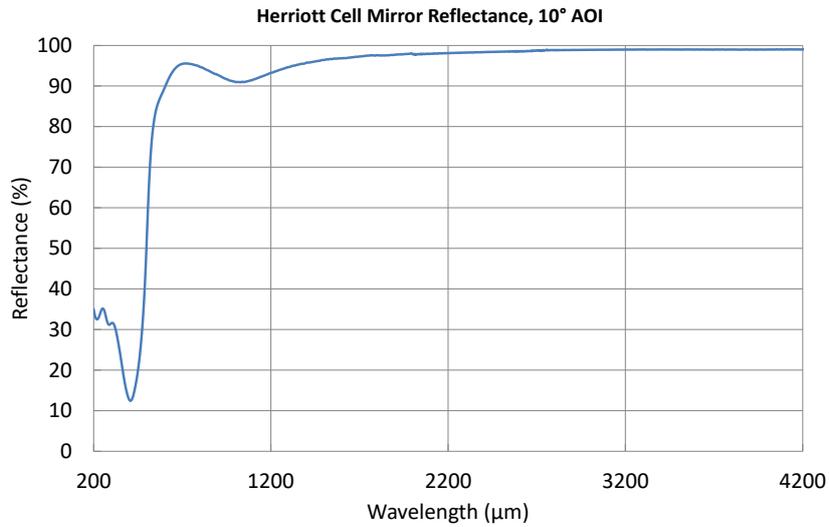


図 35 周波数ごとのミラー(金)の反射率

9. ガウシアンビームの集光

本研究では、図 36 のように 2 枚のレンズを用いてレーザー光の集光を行った。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 $3\mu\text{m}$ 、入射光のビーム曲率半径 w_{01} は 3mm(0.003m)としてビームウェストの計算を行った。以下にビームウェストの計算式を示す。

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

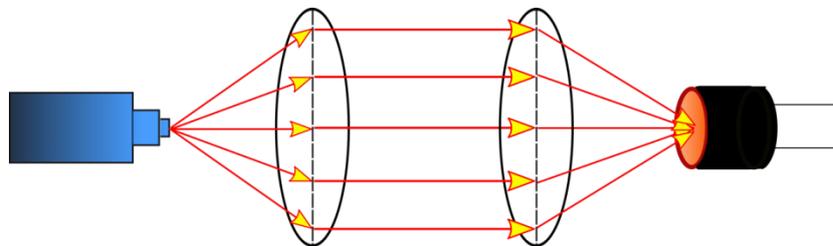


図 36 2枚のレンズを用いた集光方法

10. 実験結果

10.1. 赤外光の確認

図 34 の光源のシステムで、光路中にバンドパスフィルタを設置し、MCT のフォトダイオードで計測した結果、光を感知することができた。1064nm、1589nm の各 DFB レーザーのみで計測した結果では光が確認できなかった。そのため、PPLN からは 3.2 μ m 帯の赤外光が出射されているという事が確認できた。

10.2. DNB の異性体の選択

シグナルとポンプの DFB レーザーの波長可変領域は図 27、28 の電流-波長特性より、シグナル光は 1588.5nm~1592.5nm、ポンプ光は 1063.5nm~1066.5nm となった。

この結果と、各異性帯の吸収度が最大となる波長を比較し、ポンプ光を 1064nm,1065nm,1066nm と 1 nm 刻みで変化させていったときのシグナルの変化する波長の領域を計算した結果、ポンプ光 1064nm でのシグナル光の計算結果は、1.2-DNB は、1585.22nm、1.3-DNB は、1587.14nm、1.4-DNB は、1590.31nm となり、ポンプ光 1065nm でのシグナル光の計算結果は、1.2-DNB は、1587.44nm、1.3-DNB は、1589.37nm、1.4-DNB は、1592.54nm、ポンプ光 1066nm でのシグナル光の計算結果は、1.2-DNB は、1589.66nm、1.3-DNB は、1591.60nm、1.4-DNB は、1594.78nm となった。

以上の結果より、DNB の吸収度が最大となる波長に DFB レーザーを 1.2-DNB では、ポ

ンプ光 1066nm、シグナル光 1589.66nm、1.3-DNB では、ポンプ光 1066nm、シグナル光 1591.60nm、1.4-DNB では、ポンプ光 1065nm、シグナル光 1589.78nm の波長に制御する。

10.3. 光ファイバの損傷閾値の計算結果

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、
15 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。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37、38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、100mA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ーの和が光ファイバ3の損傷閾値の54.7mWを超え
てしまうので、本研究ではシグナルとポンプのDFBレーザーに印加する電流は100mAが
限界である。

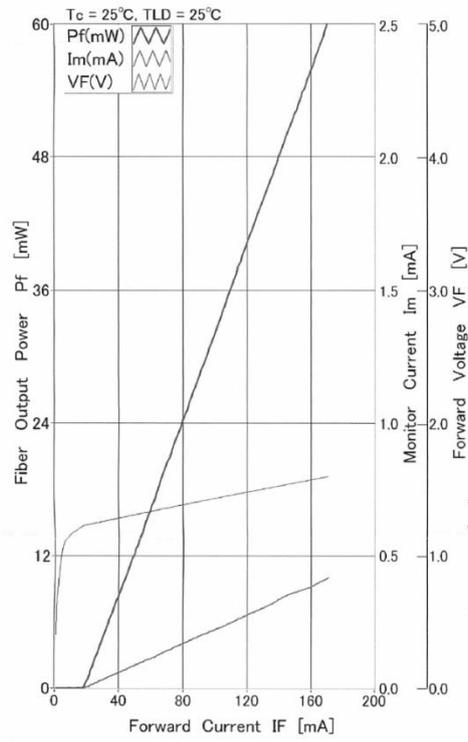


図 37 QLD1061 の電流-電力特性

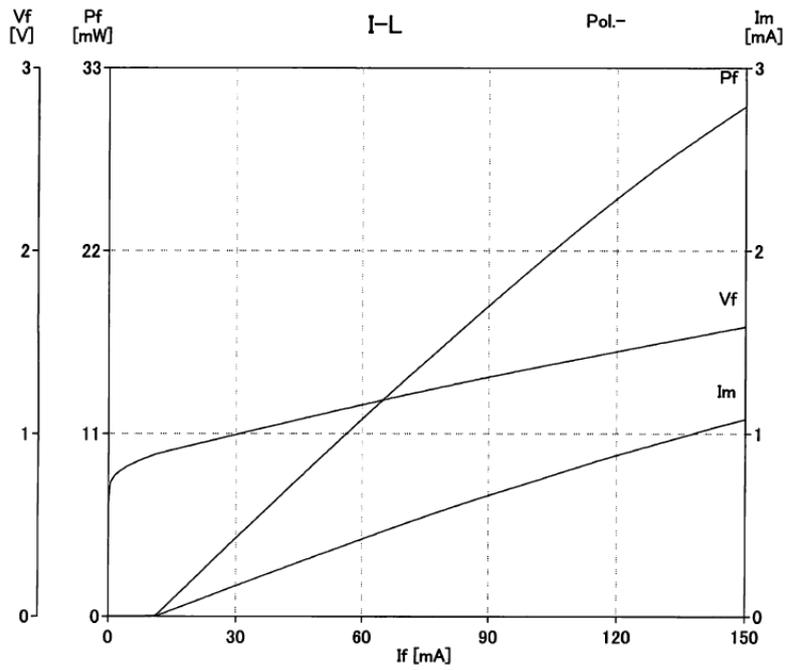


図 38 NLK1L5EAAA の電流-電力特性

10.4. PPLN 制御

シグナル光とポンプ光の DFB レーザーにそれぞれ印加する電流を変化させた場合の PPLN から出力されるアイドラー光の強度を計測した結果、シグナル光、ポンプ光の印加電流が大きくなったとき、アイドラー光の強度は大きくなるといった結果が得られた。また、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^[3]に記載されている変換効率は 29%/W である。

10.5. マルチパスセル

反射回数を 53 回、PPLN から出力される光の強度は 7 μ W として計算を行った結果、金のミラーは反射率 98.97863% のためマルチパスセル内を通過後の光の強度 P_0 は、4.06 μ W となる。しかし、実際にマルチパスセル通過後の光の強度を計測した結果、0.86 μ W となった。光の強度が減衰した要因として、周囲の温度による背景雑音の増加や、受光面の小さい MCT で計測を行ったためであると考えられる。

10.6. ビームウェストの計算結果

薄肉レンズのビームウェスト⁹⁾の計算を行った結果 w_3 (ビームウェスト)=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 μm 、集光後は117 μm となったため、100倍以上の光強度が得られている。

第5章 まとめ

1. まとめ及び考察

吸収信号の弱い爆薬蒸気検知を行う際、信号とノイズを区別するため、光源側の出力パワーが重要となる。そこで、PPLNの変換効率を計測し、既存のデータと比較することや、PPLNの温度特性を計測しPPLNから出力される光のパワーが最大となる動作条件を求めることができた。また、DFBレーザの出力パワー、波長領域を考慮して、DNBの吸収が最大となる波長にDFBレーザに印加する電流を制御することができ、光源のシステムの特性を計測することができた。

謝辞

本研究に関して、国立高等専門学校 由井四海准教授に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] 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」
- [4] エヌエフ回路設計ブロック「ロックインアンプ技術解説集」
- [5] NTT Electronics:取扱説明書[WD-3218-000-A-B-C]
- [6] 澤宏：「入門まるわかり非線形光学」オプトロニクス社
- [7] NIST:<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C100254&Mask=80>
- [8] ソーラボジャパン総合カタログ Vol.21
- [9] 多田邦雄・神谷武志；「光エレクトロニクス基礎編」丸善
- [10] 「LASER DIODE TEST DATA」 type QLD1061 Serial No.1997162