

共振器内波長変換を用いた狭線幅・波長可変中赤外光源の開発

Development of a narrow linewidth and tunable mid-infrared light source
by use of intracavity wavelength conversion

電気電子情報通信工学専攻 工藤 亮馬
12N5100016J Ryoma KUDO

1. はじめに

レーザ応用分野の開拓・発展のための重要な要素のひとつとして発振波長域の拡大がある。各分野におけるレーザの応用は、その発振波長が大きく関係している。しかし、レーザの発振波長は使用されるレーザ材料によって決まり、半導体レーザ (LD: Laser Diode) だけでは直接発振出来ない波長域が存在する。そのような領域への波長拡大は、レーザ応用分野の拡大を意味する。

半導体レーザ励起レーザを非線形光学結晶に照射し波長変換を行うと、中赤外帯でのレーザ発振が可能となる。この発振領域には、一酸化炭素 (4.6 μm 帯) や二酸化炭素 (4.2 μm 帯) の強い吸収スペクトルが含まれる。ガスの赤外吸収原理を利用すれば、レーザで非接触なガス検出が可能となる。既に近赤外域のレーザによる遠隔・非接触なガス計測器が販売されており、メタンの配管漏洩検知や、塩酸やアンモニアなどの無機物の配管内計測などに役立てられている。そこで、本研究では波長がより長い中間赤外域のレーザの開発を行う。この波長域は近赤外域よりも分子の基本振動に近いこともあり、一酸化炭素や硫化水素などの無機物をより高感度に計測できるばかりではなく、メタンを含むアルカン全般や、トルエン、酢酸エチルなどの有機溶剤を含む有機物も計測対象としており、幅広いガス種を計測対象にできる優位性を有している [1]。ガスの吸収スペクトルの線幅は非常に狭く、精密なガス検知を行うためには狭線幅、波長可変、出力安定性が要求される。本研究では、ガス検知装置用の光源として応用を目的とした、小型の広帯域波長可変中赤外レーザ光源の開発を行う。

2. 光パラメトリック発振

本研究では光パラメトリック発振 (OPO: Optical Parametric Oscillation) により中赤外光を得る。図 1 に光パラメトリック発振の解説図を示す。

光パラメトリック発振とは、非線形光学結晶により高周波数の光を 2 つの異なる低周波数の光に変換する非線形光学現象のことである [2]。非線形光学結晶に入射する光はポンプ光、発生する光はシグナル光およびアイドラ光と呼ばれる。反射率の高いミラーを向い合せた「共振器」の中に非線形光学結晶を設置しポンプ光 (波長 λ_p , 角周波数 $\omega_p = 2\pi c/\lambda_p$, c は光速) を照射すると、共振器内部でシグナル光 (ω_s) とアイドラ光 (ω_i) が発生する。シグナル光は変換効率を高めるために共振器内に閉じ込め増幅させ、アイドラ光は共振器外部へ取り出す。ここで、発生するシグナル光とアイドラ光は、

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

の関係式を満たす。

本研究では非線形光学結晶として、周期的分極反転構造を有する PPMgLN を使用する。この結晶は分極反転周期や結晶温度の調整により発振波長を変化させることができる。本研究では分極反転周期の異なる 6 つの PPMgLN を使用している。6 つの PPMgLN は横並びに隣接しており、結晶を光軸に対して垂直に移動しポンプ光の入射位置を変えることで、発振波長を広帯域に変化できるようになっている。

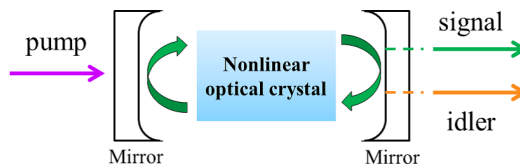


図 1 光パラメトリック発振

3. 中赤外光発生過程

中赤外光を得るために構築する光学系について説明する。本研究で使用する光学系を図 2 に示す。半導体レーザによりレーザ結晶 Nd:YVO₄ を励起すると、波長 1064 nm の近赤外光が発生する。この近赤外光をポンプ光として非線形光学結晶 PPMgLN に入射すると、光パラメトリック

ク発振により波長 13xx nm のシグナル光と波長 46xx nm のアイドラ光（中赤外光）が発生する．ここで，発振波長が可変であるために「xx」と表記している．共振器を構成する入射ミラーと出射ミラーにはポンプ光とシグナル光に対する高反射（HR: High-Reflection）コーティング，各結晶にはポンプ光とシグナル光に対する反射防止（AR: Anti-Reflection）コーティングが施されているため，変換されなかったポンプ光とシグナル光は共振器内部に閉じ込める．そうすることで波長変換の効率を高め，より高い出力のアイドラ光が得られるようになっている．

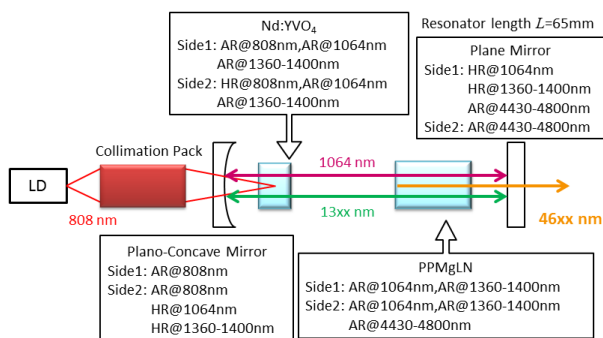


図 2 中赤外光発生光学系

4. 中赤外光発振実験

図 2 の光学系を構築し，アイドラ光を発振させた．そして，アイドラ光の入出力特性および発振波長を測定した．測定結果をそれぞれ図 3 と図 4 に示す．出力は 3.1 W 励起時に最大 34mW を確認した．また，反転分極周期と結晶温度を変えることで，アイドラ光の発振波長は 4491.9 nm から 4765.9 nm の範囲で掃引が可能であった．

次に発振スペクトルおよび出力安定性を測定した．発振スペクトルの測定結果を図 5 に示す．アイドラ光の発振スペクトルは半値全幅が約 5.80 nm となり，大きく広がっていることがわかった．また，図より複数の波長

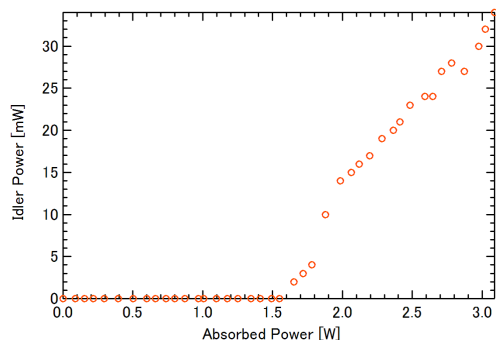


図 3 アイドラ光の入出力特性

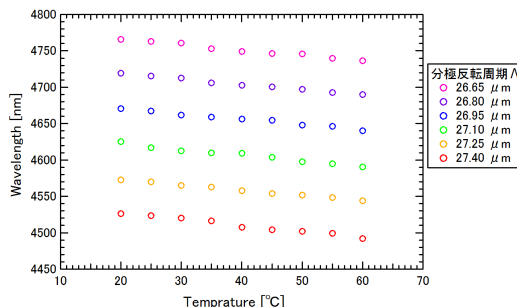


図 4 アイドラ光の温度特性

で発振が起こっており，マルチモード発振となっていることが確認できる．アイドラ光がマルチモード発振である場合，出力パワーの不安定化にも繋がってしまう．出力安定性の測定結果を図 6 に示す．測定結果より 5 分間の出力パワーの平均値に対する，最大パワーと最小パワーの変動を算出すると $\pm 18.9\%$ となった．ガスの吸収線幅は非常に狭いため，ガス検知装置の光源として応用するためには，発振スペクトルを狭線幅にする必要がある．また，精密なガス検知を行うためには，出力の安定性も必要となってくる．そのため，スペクトルの狭線幅化と出力の安定化を図るため，アイドラ光のシングルモード化を目指して実験を行う．

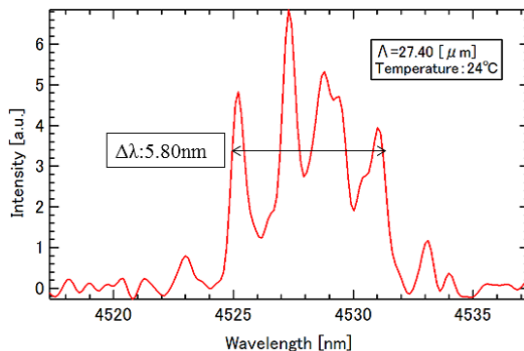


図 5 アイドラ光の発振スペクトル

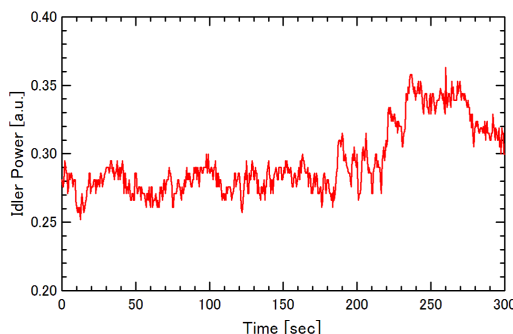


図 6 アイドラ光の出力安定性

5. Nd:YVO₄ レーザのシングルモード化実験

アイドラ光の発振スペクトルをシングルモード化するためには、アイドラ光の変換元であるポンプ光もシングルモード化する必要があると考えられる。そこで本実験では光学系にエタロンと呼ばれる薄板を挿入し、ポンプ光のシングルモード化を図る。レーザが発振するためには共振器内部で定在波が存在しなければならず、定在波条件を満たし、かつレーザ結晶の利得曲線に含まれる波長のみがモードとして発振する。定在波条件では共振器長が $1/2$ 波長の整数倍となるので、共振器で発振が起こる波長は離散的に存在することになる。隣り合う発振モード間隔は式 (2) で記述され、共振器長 L に依存する。ただし、 $\Delta\lambda$ は隣り合うモードの波長間隔、 λ は波長、 L は共振器長を示す。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} \quad (2)$$

エタロンを光学系に挿入することでエタロンの両端面間でも定在波が生じるため、共振器とエタロンの両方で定在波条件を満たす波長のみが発振する。エタロンの厚さは、共振器長に比べてはるかに小さいため、モード間隔が大きくなり、共振器内で増幅できるモードを 1 つのみにすることができる。また、光軸に対するエタロンの傾きを変化させることで、光軸方向に対する厚さを変化させることができ、透過波長を選択することも可能となる。

図 7 に示す光学系を構築し、ポンプ光となる波長 1064 nm の近赤外光のみを発振させる。そしてファブリペロー干渉計を用いてエタロンを使用していないときと、エタロンを使用しているときの発振モード数を測定した。測定結果を図 8 と図 9 に示す。図 8 より、エタロン挿入前はピークの異なる 5 本のモードの発振が確認でき、マルチモード発振となっていることがわかる。しかし、共振器内部にエタロンを挿入することで、図 9 のように発振モードが 1 つになり、シングルモード発振に成功したことが確認できる。

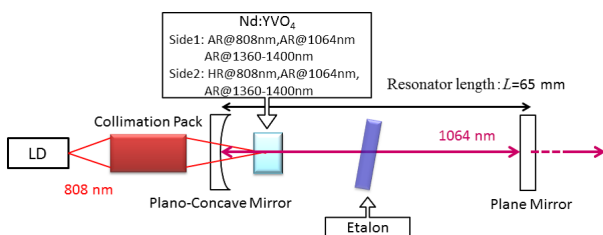


図 7 エタロンを挿入した Nd:YVO₄ レーザ光学系

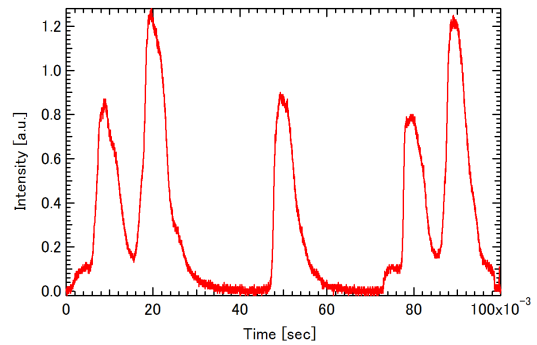


図 8 Nd:YVO₄ レーザの縦モード (エタロン無し)

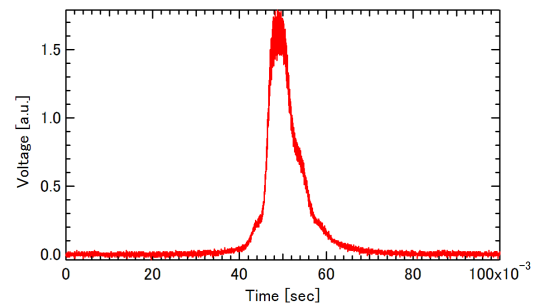


図 9 Nd:YVO₄ レーザの縦モード (エタロン有り)

6. エタロンを用いた中赤外光発振実験

エタロンによりシングルモード発振したポンプ光を波長変換することで、アイドラ光の狭線幅化に繋がるか確認を行う。図 2 に示す光学系にエタロンを挿入してみたところ、アイドラ光の発振を確認した。そこで、アイドラ光の発振スペクトルを測定する。測定結果を図 10 に示す。エタロン挿入時のアイドラ光の発振スペクトルの半値全幅は約 2.82 nm であった。エタロンを挿入する前のスペクトルと比べると半値全幅は 51.2 % 減少となり、エタロンによって中赤外光の狭線幅化に成功した。これより、エタロンによってアイドラ光の発振モードも減少できることがわかった。しかし、スペクトル線幅はまだ広く、アイドラ光はシングルモード発振とはなっていないことがわかる。これは、ポンプ光の共振器内部パワーを高めていくと、エタロンを挿入してもポンプ光がシングルモード発振せずに、マルチモードに変化してしまったことが原因だと考えられる。エタロンの波長透過特性は、図 12 のようにエタロン両端面の反射率に依存する。本実験で使用したエタロンは、コーティングを施していない珪酸ガラスであり、ポンプ光に対する反射率は約 4 % と低い。そのため、波長全体に対する透過率が高くなってしまい、共振器内部パワーを高めていくとエタロンでカッ

トするはずであった余分な波長も発振閾値を超えてしまう。その結果マルチモードとなってしまったと考えられる。これは、ポンプ光に対する反射率がもっと高いものをエタロンとして使用することで改善できるはずである。そうすることで共振器内部パワーを高めてもポンプ光の発振モードを抑えられ、アイドラ光の更なる狭線幅化に繋がると考えられる。

次に出力安定性を測定する。発振モードを減少させることができたならば出力パワーの時間安定性の向上も期待される。測定結果を図 11 に示す。得られた結果から、5 分間での出力パワーの平均値に対する、最大パワーと最小パワーの変動は $\pm 11.6\%$ となった。エタロン挿入前と比べると、出力安定性を 38.6% 向上することに成功した。これもアイドラ光をシングルモード化することができれば、さらに安定すると考えられる。そのため、スペクトルの狭線幅化と同様の対策を行っていく必要がある。

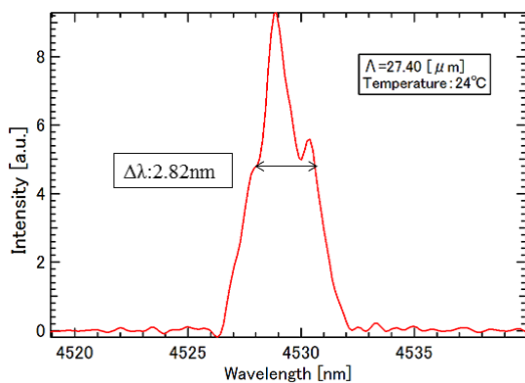


図 10 アイドラ光の発振スペクトル (エタロン有り)

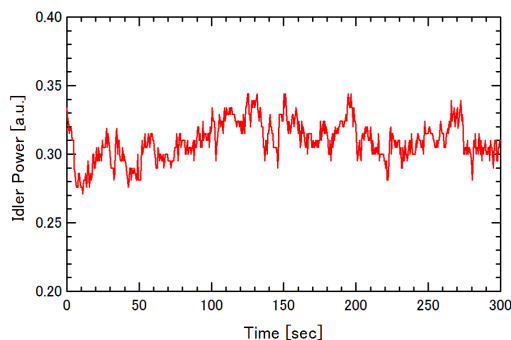


図 11 アイドラ光の出力安定性 (エタロン有り)

7. 総括

本研究では、ガス検知装置用の光源への応用を目的として、光パラメトリック発振を利用した中赤外レーザの開発を行い、アイドラ光の狭線幅化と出力の安定化を目指して研究を進めてきた。アイドラ光は最大出力 34 mW

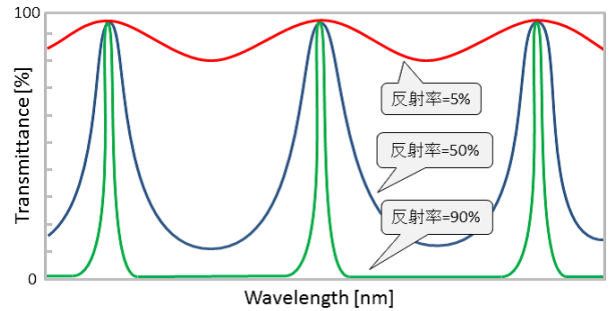


図 12 エタロンの波長透過特性

が確認でき、中心波長は波長 4491.9 nm から 4765.9 nm の範囲での掃引が可能であった。アイドラ光の発振スペクトルは、半値全幅 5.80 nm と大きく広がり、マルチモード発振をしていた。この発振スペクトルの線幅を狭めるために、共振器内にエタロンを挿入した。中赤外光発生光学系の共振器にエタロンを挿入すると、アイドラ光の半値全幅は 2.82 nm となった。したがって、エタロンの使用によって発振スペクトルの半値全幅を 51.2% 減少することができた。出力の安定性もエタロン挿入前に比べ 38.6% 向上した。この結果より、エタロンを使用するとアイドラ光の発振モードを減少させることがわかった。しかし、アイドラ光はシングルモード発振とはならなかった。これは、共振器内部パワーが増加していくと、エタロンがうまく働かなくなり、ポンプ光がマルチモード発振になってしまうことが原因として考えられる。これを改善するために、エタロンの最適な素材、厚さ、反射率を検討する必要がある。そして、中赤外光の更なる狭線幅化を目指していく予定である。

謝辞

本研究を取り組むにあたり、多大なる御指導、御助言を頂きました庄司一郎教授に深く感謝致します。また、様々なことに御協力頂きました庄司研究室の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 内田清孝著「常温発振レーザによる遠隔ガス計測器」検査技術 2010.5.
- [2] 黒田和男著「非線形光学」コロナ社
- [3] Orazio Svelto, "Principles of Lasers," Springer(1976)
- [4] 松井大祐：“レーザ共振器内波長変換を用いた小型・高効率・狭線幅・波長可変中赤外光源の開発”中央大学理工学研究科電気電子情報通信工学専攻修士論文 (2011)