

A3

メタンガス検知用 1.6 μ m 光パラメトリック発振器の開発 Development of optical parametric oscillator at 1.6 μ m for methane detection

生田光輝、中田芳樹、興 雄司、前田三男、津村陽一郎*、中川 潤*

Ikuta K., Nakata Y., Oki Y., Maeda M., Tsumura Y.* and Nakagawa J.*

九州大学大学院システム情報科学研究科、*三菱重工広島研究所

Graduate school of I.S.E.E., Kyushu University, *MHI

A laser source is developed for methane detection using DIAL at 1.67 μ m. To obtain a narrow bandwidth and the high power, optical parametric oscillator (OPO) injection-seeded with laser diode (LD) is adopted. In preliminary experiment, a KTP crystal was pumped by frequency-doubled Nd:YAG laser, and LD and dye laser was used as the injection seeder.

1 はじめに

ライダー観測は一ヶ所から広範囲を観測でき、濃度分布の測定が可能であるから、可燃性ガスの漏洩検知には極めて有効である。そこで本研究室では可燃性ガスとして最も広く普及したメタンについて、1.67 μ m 帯の差分吸収ライダー (DIAL) による漏洩検知システムの実現を目指している。この波長域では高速応答が可能な赤外線検知器が開発されており、高い距離分解能が期待できる。光源についても、1.67 μ m 帯では光パラメトリック発振器 (Optical Parametric Oscillator:OPO) やラマンシフターが容易に利用できる。しかし、吸収の低さをある程度カバーするために、光源には高出力 (10mJ 程度)、狭帯域 (0.2 cm^{-1} 程度) が要求される。またノイズの低減という観点から、パルスごとの波長切り替えが望ましい。これらの条件を満たす光源は市販されておらず、本研究では 1.67 μ m 帯 DIAL 専用光源の開発を行っている。

2 実験装置

光源の構成図を図 1 に示す。本研究では、コンパクト化が容易で高出力が期待できる OPO による方法を採用し、非線形媒質として KTP (KTiOPO₄) を用いた。波長 532nm の Nd:YAG レーザー第二高調波 (SHG) で KTP 結晶を励起し、点線部のミラーで発振器を構成することで OPO としてレーザー発振が起こり、位相整合などによりシグナル光を 781.6nm とすれば、アイドラー光として 1666nm のレーザー光が得られる。532nm で OPO を励起した場合、波長 355nm の第三高調波 (THG) を用いる場合よりもアイドラー光の同調範囲は狭くなるが、励起が強い分高出力が期待できる。また、狭帯域化を行なうため、半導体レーザー (LD) 等の 781.6nm (シグナル光) のレーザー光でインジェクションシーディングを行なっている。この波長域ではシングルモードの半導体レーザーなどが容易に入手できるため、装置を固体化、コンパクト化しやすいという利点がある。また、この点線の共振器用ミラーを除くことで、このシステムを Optical Parametric Amplifier (OPA) として動作させることも可能である。この場合、システムが単純化できるが、シード光に当たる 781.6nm 光にある程度の強度が必要となる。

実験に用いた励起用レーザー光源は Continuum 社の Surelite I、Spectra-Physics 社の MOPO-730 励起用の Nd:YAG の 2 種類である。また、シード光には SHARP 社のレーザーダイオード (L-TO24PD, 波長 785nm~788nm) と、色素 (LDS765) レーザーとを用いた。シード光源と励起光源の組み合わせによってアイドラー光の特性も変化するため、これらの光源を用いて、表 1 のような組み合わせで順に実験を行ない、その性能を評価した。表 1 における Type OPO1,2 では OPO、Type-OPA の組み合わせでは OPA により実験を行なった。以前行なったシミュレーションの結果、検知システムが良好な感度を持つには、光源に対して 1.67 μ m 帯出力 10mJ、スペクトル幅

0.2cm⁻¹、ビーム拡がり 1mrad 程度が要求され¹⁾、本研究ではこれらの値を目標として開発を行っている。

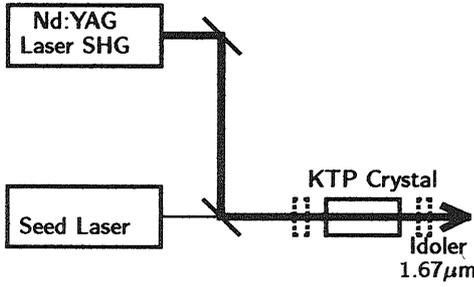


図 1:OPO 光源の構成

Type	励起光源	シード光源
OPO1	Surelite I	Dye(LDS765+EtOH)
OPO2	MOPO-730 用	LD(LTO24PD)
OPA	MOPO-730 用	Dye(LDS765+DMSO)

表 1:使用した励起光源及びシード光源

3 実験結果

Type OPO1 における入出力特性を図 2 に示す。色素レーザーは斜入射型共振器を用いて狭帯域化した。図 2 より、1.67μm での最大出力は 2.9mJ であった。出力の上限は KTP 結晶のダメージしきい値で制限されている。次にアイドラー光のスペクトル幅を評価するため、1.67μm 帯にあるメタンの Q ブランチの吸収プロファイルを測定した。吸収スペクトルは光音響分光 (PAS) 法によって観測した。その結果を図 3 に示す。このプロファイルではメタン Q ブランチの吸収線が全く分解されておらず、図 2 下に示された計算によるプロファイルとの比較からも、アイドラー光のスペクトル幅は 1cm⁻¹ 以上であることがわかる。シード光と励起光についてエタロンによるフリンジパターンでスペクトル幅を測定したところ、共にスペクトル幅 1cm⁻¹ 以上であり、このためアイドラー光のスペクトル幅も広がってしまったことが考えられる。またビーム拡がりも、レンズによるコリメートを行った結果、3.5mrad であった。システムはコンパクトであるが、出力・スペクトル幅、ビーム拡がりともに目標値に比べてかなり劣っている。

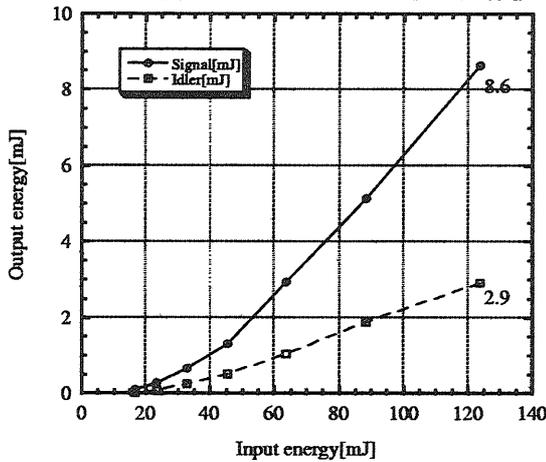


図 2:Type OPO1 の入出力特性

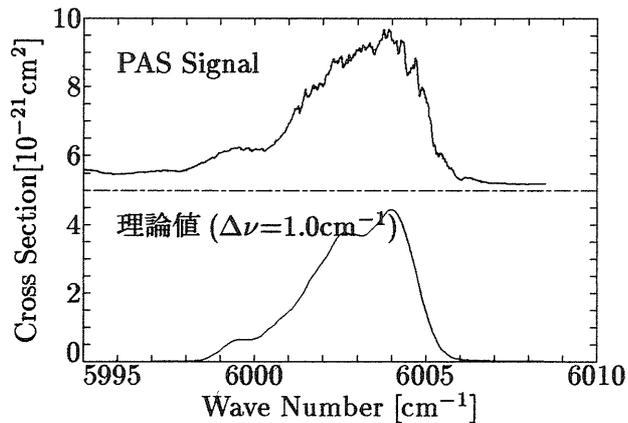


図 3:Type OPO1 のアイドラー光メタン吸収特性

OPO1 ではシード光の狭帯域化が充分ではなく、かつ励起光のスペクトル幅が予想以上に大きかった。OPO2 の実験では励起光源を高出力 (300mJ)・狭帯域 (0.3cm⁻¹) である市販 OPO (Spectra Physics, MOPO-730) の励起用の Nd:YAG レーザーの第二高調波を用いた (MOPO-730 は第三高調波励起)。また、シード光源にもシングルモードの半導体レーザー (SHARP, LTO24PD) を用いた。図 4 に入出力特性、図 5 にシグナル光のフリンジパターンを示す。励起光強度 123.2mJ においてアイドラー光の出力は 6.4mJ となり、OPO1 の 2 倍以上のアイドラー光出力を得た。また、図 5 から、シグナル光はシード光と同様、単一モードであることも確認された。

OPO2 で用いた KTP 結晶の大きさは 4×4mm (長さ 15mm) であり、結晶端面の無反射コート強度上、励起光強度は 120mJ 程度が限界となる。励起光は 300mJ まで上げることが可能である

ので、絶対出力については結晶の大きさを大きくするという方法で容易に改善できると考えられる。また、この OPO2 においては狭帯域の面でもほぼ問題ないと思われる。しかし、LD シーディングを用いた場合、現在のところ OPO へのシーディングが非常に不安定であるという問題が生じた。これは共振器モードマッチングなどの問題のためだと思われるが、この不安定性より、CH₄ の Q ブランチ吸収スペクトルの測定を行なうことができなかった。このため、アイドラー光のスペクトル幅は不明であるものの、シード光が励起光より十分に狭いため、そのスペクトル幅は励起光の 0.3cm⁻¹ と同程度であると考えられる。

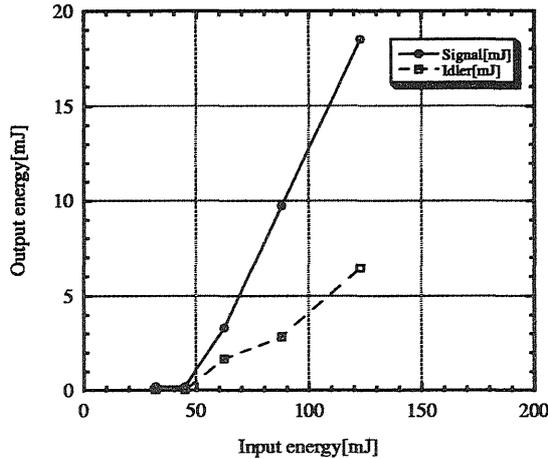


図 4: Type OPO2 の入出力特性

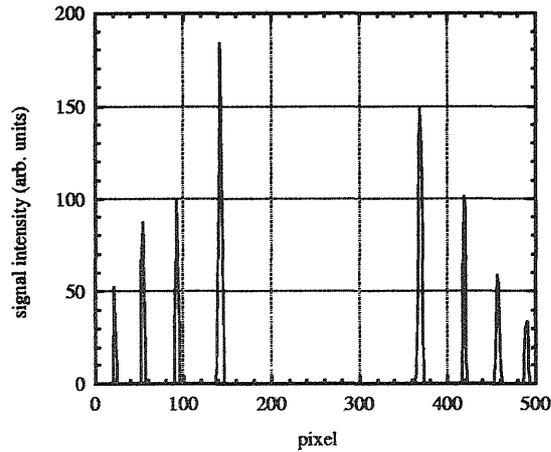


図 5: Type OPO2 のシグナル光フリンジパターン

以前行なった計算によって、地上の大気圧下での DIAL 測定では、1.67 μ m 光のスペクトル幅を 0.1cm⁻¹ 以下にしてもメタンの吸収係数はほとんど変わらないことが分かっている。さらに、OPO2 の実験によって、我々が有する Nd:YAG レーザーシステムでは、シード光を 0.1cm⁻¹ 以下に狭帯域化しても、アイドラー光の狭帯域化ができないことがわかってきた。そこで次の OPA 実験では、多少の帯域の悪化を許容してシードの安定化と高出力化を行ない、OPA による 1.67 μ m 光発生を試みた。励起光源は OPO2 と同様とし、シード光源は高出力を得るため色素レーザーを用いた。色素レーザーは斜入射型共振器に分散プリズムを 3 つ挿入し、さらに狭帯域化を行なった後、色素増幅段を設けて高出力化した。これによりシード光の出力は約 0.5mJ、バンド幅は 0.1cm⁻¹ 程度となり、広範囲に安定した狭帯域のシードが可能となった。また、KTP 結晶についても大きさを 8 \times 8mm (長さ 15mm) のものと交換し、OPA 自身の高出力化を図った。

OPA 実験における入出力特性を図 6、OPA から得られた 1.67 μ m 光によるメタン Q ブランチの吸収スペクトルプロファイルを図 7 に示す。

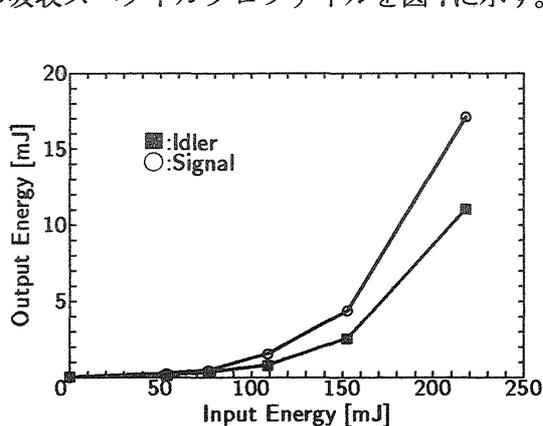


図 6: Type OPA の入出力特性

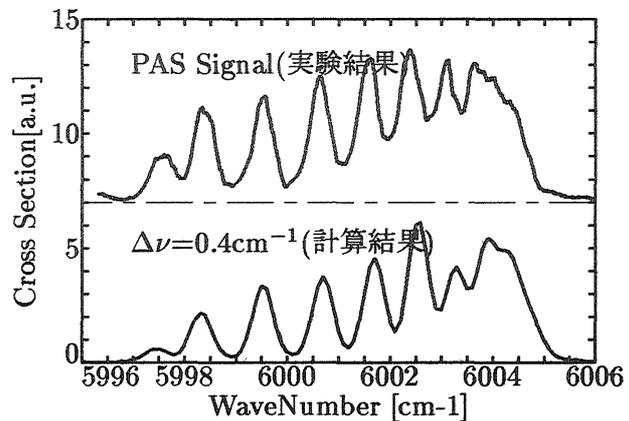


図 7: Type OPA のメタン吸収スペクトル

出力については励起光強度 220mJ において 10mJ が達成された。シード光強度を変化させた結果、シード光の高出力化によるアイドラー光のさらなる高出力化も可能であることが判明した。また、

吸収スペクトルからは、アイドラー光のスペクトル幅は 0.4cm^{-1} 程度でほとんど悪化していないことがわかる。OPA においても、OPO と変わらないレベルの特性が確認されたが、ビーム拡がりについては 10mrad 程度まで悪化した。これについてはビームをエキスパンダーで広げることによって 3mrad 程度までは押さえられる可能性がある。

4 結論

これまでの結果から、出力は励起光について 300mJ 、シード光については 0.5mJ 以上であれば、アイドラー光出力 10mJ が達成できることがわかった。密度的にはビーム 4mm 径、 220mJ 程度であった。励起光の 300mJ にはシード光 (色素レーザー) の励起分も含まれている。また、スペクトル幅については、シグナル光のシードによりアイドラー光の狭帯域化を併せて行う場合には、励起・シードともに十分細いことが要求される。

シードに半導体レーザーを用いる場合はモードマッチングによるシードの不安定性に問題があるが、システムの安定化によってこうした問題は解決可能である。よって半導体レーザー励起に関してはシステムの安定性を向上させる試みを行なっていきたい。一方、実際に DIAL のフィールドテストなどを行なう上では、色素レーザーをシード光とした方法や OPA が現状では優位である。OPA 実験で使用した色素レーザーをシード光とした OPO 発振などの実験も行なっていきたい。また、レーザー光のビーム拡がり角であるが、OPA 等では 3mrad 以内に抑えるのはかなり困難であることが分かってきた。これについては今後、コリメート方式の検討や OPO についての理論的な考察が必要である。

狭帯域化を行う方法としては、 $1.67\mu\text{m}$ 帯半導体レーザーを用いてアイドラー光をシードするという方式も考えられる。この場合には励起光の条件は大きく緩和され、高出力のみが要求される。狭帯域化、システムのコンパクト化には半導体レーザーによるシードが有利であり、今後はこのような方法も検討する予定である。

参考文献

- [1] 興雄司・生田光輝・前田三男・内海通弘：九州大学大学院システム情報科学研究科報告 2 (1997) 157.