

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：53203

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25750140

研究課題名(和文) 爆発防止モニタリングシステムのための多点非接触型マルチガスセンサの研究

研究課題名(英文) Laser-based multi-gas detection system for fire safety and explosion prevention

研究代表者

由井 四海 (Yoshii, Yotsumi)

富山高等専門学校・電子情報工学科・准教授

研究者番号：10413759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ガスによる爆発事故を防止するためのセンシングシステムを構築した。単一のレーザー光源と非線形素子を併用することで2つの波長を発生させ、酸素とアセチレンの同時測定を行った。非線形素子が高感度化のための波長変調法に及ぼす影響を調べ、信号対雑音比を最大にする条件を見いだした。また、1秒以下の応答時間で半導体式などの他の従来手法に比べて高速に測定できることが確認された。

研究成果の概要(英文)：Gas detection system for the purpose of preventing explosion accident has been developed. Simultaneous detection of oxygen and acetylene using a single diode laser in conjunction with a nonlinear optics is achieved. Effect of nonlinear optics on wavelength modulation method is investigated and shown that the condition which maximizes signal to noise ratio differs from the wavelength of highest conversion efficiency. The signal response time is less than 1s which is faster than any other conventional gas detection methods.

研究分野：レーザー分光計測

キーワード：ガス計測 レーザー分光 火災・爆発防止 非線形波長変換 多成分測定

1. 研究開始当初の背景

(1) ガス爆発事故とモニタリング

三井化学岩国大竹工場爆発事故や新潟県南魚沼市のトンネル爆発事故など、ガスに起因する爆発事故は後を絶たない。これらの爆発事故の防止には漏洩ガスのモニタリングが欠かせないが、プラントやトンネルなどのように規模が大きい場合、ガスの発生場所を予測することができないため、特定の位置での点測定を行う手法だけでは不十分である。そのため、多点あるいは面や線による広範囲測定が必要不可欠である。

(2) 従来の方と研究

現在までにさまざまな測定原理に基づくガス計測機器が開発されており、用途別では分析用とモニタリング用に分けられる。分析用の機器はその用途から高い感度と選択性を特長とするが、測定時間が長く、試料のサンプリングが必要である点でモニタリング測定に流用することが難しい。さらに、測定において試料の前処理などで複数の行程が必要となることから測定装置が比較的大きいものが多い。

分析用に対してモニタリング用の機器にはサンプリングが不要で測定時間が短いことが要求される。サンプリングを不要にするためにはガス雰囲気においてガスとの物理的、化学的な反応を利用することが必要で、家庭用ガス漏れ検知器に代表される金属酸化半導体式のセンサなどがすでに実用化されている。しかしこれらのセンサはサンプリングが不要であるものの、ある狭い範囲における測定に限定され、広い範囲の測定のためにこれらのセンサを多数設置することは現実的でない。

広範囲のガスモニタリングのためには遠隔から測定が可能なりモートセンシング手法が必要となり、これまでに多くの方法が研究されてきた。その中でもガス分子の測定に関しては測定方法の種類(能動測定、受動測定)と光源の種類(広帯域光源、狭帯域光源)の組み合わせによって次の3つに分けることができる。

・広帯域光源による受動測定

太陽の散乱光を光源として、広い範囲の空間中を通過した光を分光器あるいは赤外線検出器を使って分析することでガスの測定を行う。

・広帯域光源による能動測定

キセノンやハロゲンランプなどを光源として上記と同様な測定を行う。

・狭帯域光源による能動測定

半導体レーザーなどを光源として、広い範囲の空間中を通過した光を光検出器で受光することでガスの測定を行う。ガス分子のエネルギー遷移による固有の光吸収スペクトルを波長線幅の狭いレーザーにより測定する。

いずれの方法もガスの吸収スペクトルを利用した測定方法で、一部はすでに開発されている。この中でも狭帯域光源による測定は光源にレーザーを使用していることから選択的に特定のガス種を測定することができ、分光器が不要のため機器を小型化できる。

(3) レーザー方式の課題

レーザー方式は広帯域光源方式と比べ、上記の特徴のほかに、長距離伝搬や点測定ができるなど多くの長所があるものの課題が残されている。

① 複数のガス種を測定できない

レーザー方式の光源は波長線幅が非常に狭く、このために特定のガス種をピンポイントで測定できる反面、波長掃引幅も狭いため、1つの光源で複数のガス種を測定することができない。基本的に複数のガス種に対応するためにはそれらに応じた複数の光源が必要となる。

② 可視近赤外線領域でガスの吸収強度が小さい

ガス分子の吸収はさまざまな波長帯に存在しており、特に中遠赤外線領域での吸収強度が大きい。この領域での光源と光学素子は特殊であるため、利便性の高い可視近赤外線領域の利用が望まれるが、吸収強度が弱いため測定系全体での感度を高くする必要がある。

③ 任意の波長のレーザー素子の入手性が低い

レーザーポインターやDVDに使用されている半導体レーザーは安価で入手性が高いが、これらのレーザーの波長はガス吸収の波長と異なるために利用できず、ガス測定のためには規格外の高価な特注品が必要とされる。

これらの課題が解決されることで、汎用光源による高感度でリアルタイム測定が可能なレーザー方式のガスモニタリングシステムが開発される。

2. 研究の目的

プラントなどの大規模設備におけるガス爆発事故を防止するための多点、非接触型マルチガスセンサの研究を主目的とする。本研究では、汎用性の高い光通信帯の半導体レーザーと非線形波長変換素子を組み合わせることで課題を解決し、単一の光源で酸素とアセチレンの同時測定を目標とする。具体的には次の項目について研究を行う。

(1) 要素技術の検討とシステムの構築

測定対象となるガスの吸収線の中心波長について検討し、対応する吸収強度から適した光路長のシステムを構築する。

(2) 波長変調法を適用する場合の波長変換素子の特性解明

測定の高感度化のために波長変調法を適

用するが、その際の波長変換素子の特性を明らかにした上で測定条件を見いだす。

(3)高速測定および長期安定性の実現

高速応答の実現と測定の長期安定性を両立する手法を検討する。

3. 研究の方法

(1)システムの構築

本研究では 760nm 帯に位置する酸素と 1520nm 帯のアセチレンの吸収線を測定対象とするが、この波長帯には十数本の吸収線が含まれている。そして、その中から、波長変換素子での変換効率、隣接する吸収線との干渉、レーザーの発振特性などを考慮して吸収線を選択する。さらにこの吸収線の吸収強度から光路長を定め、測定システムを構築する。波長変換素子での第二高調波の変換効率を測定し、最大効率での波長を特定する。この値を中心にして、これまでに報告されている酸素の吸収実験や HITRAN データベースの値を参考にしながら、測定対象の吸収線を選定する。また、ガスセル前後に存在する雰囲気ガスの影響を避けるため、リファレンスセルで補正できるようにする。

(2)波長変換素子の変調条件

波長変調法ではレーザーの発振波長を高速に変化させる。また、波長変換素子は特定の波長で変換効率が最大となる。そのため、この状態で変調を加えるとガスの吸収と波長変換素子の両方で強度変化が生じてしまう。波長変換素子を含めた光源に依存する変調信号は残余強度変調(RAM)と呼ばれ、それらは吸収信号に対してノイズと見なすことができる。そのため、波長変換素子での変調に対する特性を明らかにしたうえで、変調条件を明確にする必要がある。本研究ではノイズが光源と波長変換素子の両方で生じることが考えられる。波長変換素子を考慮した波長変調法の数値シミュレーションを行い、それらが変調の深さおよび変調周波数に依存するか確認した上で、実験を行い検証する。

(3)測定信号の応答性と安定性

ガスの吸収を測定する場合、吸収プロファイル全体を測定する場合と吸収プロファイルにおける最大吸収値を測定する場合の2通りがある。全体を測定する場合は、吸収最大の点を確実に測定できるが、測定に時間がかかる。一方、吸収最大値を測定する場合は、高速測定ができるが、波長のずれが直接測定値に影響する。吸収プロファイル全体を測定する方法で実験を行い吸収線の形状を確認する。その後、これまでに報告されている波長ロック手法が適用可能か検討を行う。

4. 研究成果

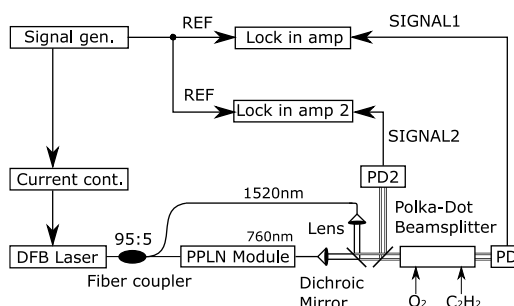


図 1. センサの構成図

(1)システムの構築

図 1 に構築したシステムの構成図を示す。光源に 1520nm の光通信帯半導体 DFB レーザーを使用し、その光と波長変換素子(PPLN)で変換した 760nm の第二高調波光をダイクロミックミラーで合わせ、これら 2 波長の光をアセチレンと酸素が導入された光路長 0.2m のガスセルを透過させる系を構築した。レーザーからの出力はファイバーカプラーで 95%と 5%に分けられ、高い方は PPLN に導入され、760nm の光に変換される。23mW の基本波に対して 1.8mW の第二高調波が発生していることが確認された。

光検出器には短波長側の感度波長範囲が広がった InGaAs フォトダイオード(PD)を利用し、その信号はソフトウェアロックイン検波器で測定される。また、セルを透過しない光路をリファレンスセルの代わりに設け、酸素の雰囲気ガスの影響と光干渉ノイズの低減を図った(デュアルビーム系)。光路の分割には波長依存性のないポルカドット型ビームスプリッターが使われている。

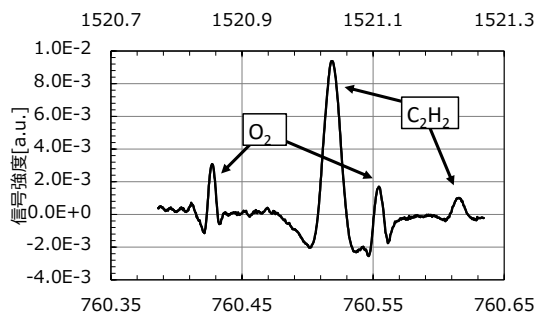


図 2. 酸素とアセチレンの吸収波形(微分形)

構築されたシステムで酸素とアセチレンの吸収スペクトルの同時測定を行った。図 2 に吸収波形を示す。本研究では測定感度の向上(詳細は(2))を目的に、波長変調法を適用し、信号を変調周波数で検波することで吸収スペクトルの 2 次微分に近似される波形を得る。異なる波長帯における酸素とアセチレンの吸収波形が重なって 1 つの波形として同時に測定されていることがわかる。図の波長帯における酸素とアセチレンの光吸収はそれぞれ電子遷移と振動遷移によるもので、吸収線データベースと比較し、それらが短波長側から R11Q12,R7,R11R11,R6 遷移であることが確認された。また、この時の濃度は酸素、ア

セチレンでそれぞれ 20%, 5%である。

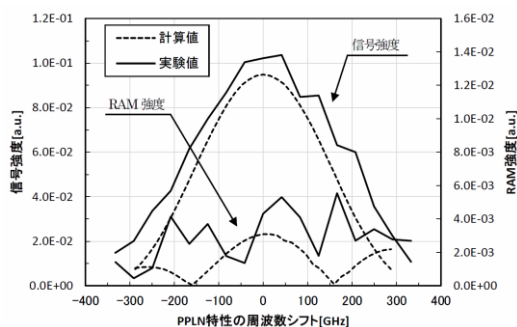


図 3. 波長変換素子の周波数シフトと信号 RAM 強度の関係

(2)波長変換素子の変調条件

波長変換素子を使用した場合での波長変調法の変調条件について実験を行った。

変調周波数を変化させて測定した結果、ベースラインに重畳しているノイズ成分が変調周波数に対して反比例する傾向を示すことがわかった。これより、本研究の実験系では変調周波数は 11kHz が最適であることがわかった。また、変調指数と信号の大きさの関係については、波長変換素子を使わない従来の波長変調法において変調指数 2.2 程度で信号が最大となることが理論および実験から確認されている。しかし、波長変換を行っている本実験では変調指数が上がるにつれて信号が大きくなる傾向は同様であったが、変調指数が 2.2 より大きい領域においても信号が減少しないことがわかった。

波長変換素子の動作点（温度による周波数シフト）による信号強度と RAM 強度の変化を調べるために、実際の波長変調法と同様の信号を再現する数値シミュレーションを構築し実験との比較を行った。結果を図 3 に示す。信号強度についてはシフト量が 0Hz、すなわち変換効率が最大の位置で最大となっている。しかし、RAM 強度も同様となっており、SN 比（信号強度/RAM 強度）では高くなく、シフト量が±150GHzにおいて RAM 強度が最小となる場合に SN 比が最大となることがわかる。また実験でも-50, 120GHz 付近で RAM が極小になることが確認された。

(3)測定信号の応答性と安定性

レーザー波長をガスの吸収が最大となる波長に合わせた状態でガスセル内の酸素濃度を変化させ、二次微分スペクトルのピーク値を吸収信号として測定を行った。図 4 に吸収信号の時間変化を示す。最初に窒素でガスセル内のパージを行った後、24%の酸素を導入した。1000sccm の流量で導入したため、拡散などを考慮しない場合、約 6 秒でガスが充満すると考えられる。信号が最大値に達する時間は約 9 秒であり、導入ガスがガスセル内部で拡散してそれが内部の窒素と共に排出されることも考慮すると、ロックイン時定数の 100ms の応答時間で測定できていると考え

られる。また、いずれの濃度においても吸収信号の標準偏差は約 0.02 であり、これは図 2 のベースラインに見られるノイズレベルとほぼ同じ割合に相当する。SNR を吸収信号の平均値と標準偏差の比、検出限界を $SNR=1$ とすると、検出限界が吸収係数で $3.7 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ であった。

光の波長と強度は電流および温度コントローラーによって安定化されており、波長が吸収のピーク位置からずれることによる信号強度の変化は見られなかった。このことは吸収信号の標準偏差がベースライン上のノイズレベルと同程度であることから確認できる。このため、本実験の系において波長のさらなる安定化は不要であると考えられるが、ベースラインノイズが低く、さらに高感度化が必要な場合には 1 次微分波形を用いた波長安定化方法などが必要となる。

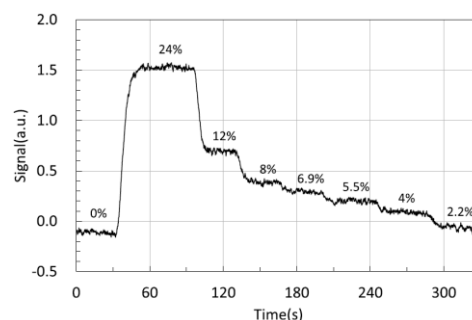


図 4. 酸素ガスの信号強度の時間変化

(4)まとめと今後の展望

汎用性の高い光通信帯の半導体レーザーと導波路型波長変換素子を使った 2 波長光源で酸素とアセチレンを同時に測定するマルチガスセンサを開発した。波長変換素子と波長変調を併用する場合において、光強度が最大となる動作点から周波数をシフトさせることによって SN を最大にできることがわかった。また、測定の応答速度についても 1s 以下となり、他の従来手法に比べて高速測定のできるシステムが構築された。

これらの成果により、レーザー方式による多点計測のみならず汎用光源によるシステムの普及促進が期待される。さらに、波長変換素子と波長変調法を組み合わせたこの技術により他の波長領域での応用が進み、例えば中遠赤外領域では CBRNE 災害防止のための爆発物の遠隔計測などが考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 由井四海、水本巖、久世宏明、光通信デバイスを利用した酸素ガス計測システムの開発、電気学会論文誌 C, 査読有, Vol. 134, 2014, pp.1703-1707

[学会発表] (計 4 件)

- ① 谷川千絵、水本巖、由井四海、半導体レ

- レーザーの第二高調波光による波長変調分光測定における残余強度変調の研究, 応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会, 2015年12月, 信州大学(長野県・長野市)
- ② 松井智哉、水本巖、由井四海, 半導体レーザーとその第二高調波による酸素とアセチレンの同時計測, 応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会, 2015年12月, 信州大学(長野県・長野市)
- ③ N.Tomioka, Y.Yoshii, Ray-tracing simulations and design of multi-pass absorption cell, IEEE 7th International Conference on Engineering Education (ICEED2015), Nov. 2015, Kanazawa (Japan)
- ④ 由井四海, 水本巖, 久世宏明, 光通信デバイスによる酸素ガス計測システムの開発, 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2013年9月, 北見工業大学(北海道・北見市)

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: 多重反射容器

発明者: 五十嵐健大、神邊貴史、石井政輝、由井四海

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許願 2014-260754

出願年月日: 平成26年12月24日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

由井 四海 (YOSHII, Yotsumi)

富山高等専門学校・電子情報工学科・准教授

研究者番号: 10413759

(2)研究協力者

谷川 千絵 (TANIKAWA, Chie)

松井 智哉 (MATSUI, Tomoya)

富山高等専門学校・制御情報システム工学専攻・2年