高感度ガス検出用中赤外波長変換光源

中赤外光源はメタンやCO，CO_2などの環境ガスの高感度検出に有効です．NTTフォトニクス研究所では，通信用半導体レーザと擬似位相整合$LiNbO_3$（ニオブ酸リチウム）導波路を用いた差周波発生による中赤外光源を開発しました．この中赤外光源は室温CW（Continuous Wave）駆動が可能です．この光源を用いてメタンガスのリアルタイム吸収線測定をした結果についても紹介します．

ただなが　おさむ　やながわ　つとむ
忠永　修　/柳川　勉
あそべ　まさき
遊部　雅生

NTTフォトニクス研究所

中赤外域におけるガスの吸収

近年では地球温暖化など環境問題への関心の高まりにより，温室効果ガスなどの大気中のガス分析の需要が高まっています．また医療分野でも呼気中の成分分析など微量ガス濃度計測の需要が高まっています．さらに工業プロセスの効率的な反応制御や燃焼炉でのダイオキシン発生抑制においても，対象ガスの濃度変化をリアルタイムに監視する必要があります．このようなガス分析装置には，物質選択性が良く，高感度にかつ瞬時に濃度計測を行うことが求められます．

ガスは可視光よりも長い波長を持つ赤外光域に吸収を示します．そしてガスの構成原子や分子構造によって吸収波長が異なるため，指紋スペクトルと呼ばれています．**図1**にさまざまなガスの吸収波長とその吸収強度の関係を示します[(1)]．2～5 μmの波長域でメタン（CH_4）や一酸化炭素（CO），二酸化炭素（CO_2）の強い吸収があり，この波長域での小型の中赤外光源の実現により高感度ガス検出が可能となります．

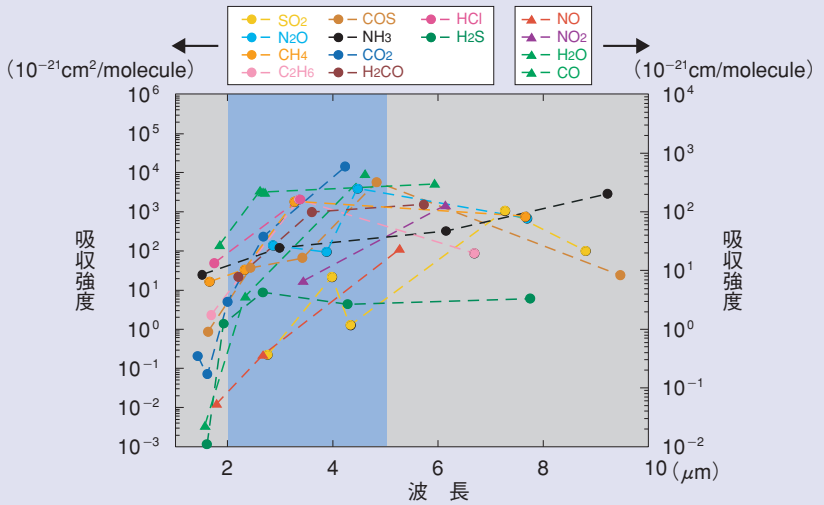
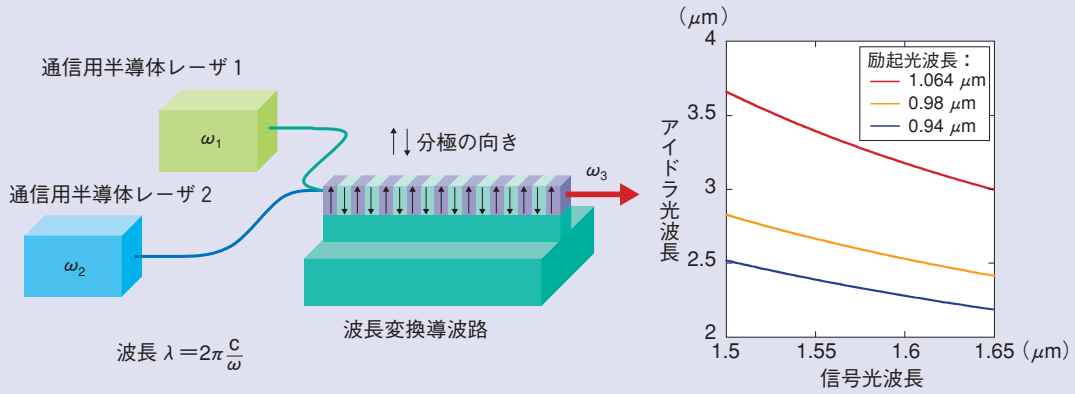


図1　ガスの吸収波長と吸収強度の関係

擬似位相整合波長変換素子

高感度ガス検出用中赤外域のレーザ光源の需要が高まっていますが，特にメタン等の炭化水素系ガスの吸収がある3 μm帯では実用的な半導体レーザはこれまでありませんでした．NTTフォトニクス研究所では，波長変換の技術を用いて高感度ガス検出に重要な2～3 μm帯の中赤外波長変換レーザ光源の開発を行っています．

波長変換レーザの構成概略を**図2**(a)に示します．波長変換レーザは二次非線形光学効果を利用しています．周波数ω_1，ω_2の光を非線形媒質中に入れたときに和周波（$\omega_3=\omega_1+\omega_2$），差周波（$\omega_3=\omega_1-\omega_2$），第2高調波（$\omega_3=2\omega_1$，$\omega_2=\omega_1$）の発生により，新たな$\omega_3$の光の発生が可能です．この波長変換を効率よく行うために，非線形結晶（ニオブ酸リチウム：$LiNbO_3$）の自発分極の向きを周期的に反転し，3つの光（ω_1，ω_2，ω_3）の位相差をキャンセルする技術（擬似位相整合）を用いています．この技術を用いると，入力するω_1，ω_2の組合せと，分極反転周期を変更することで，任意波長のレーザを作製することが可能になります．この技術によって，こ



(a) 構成概略　(b) 発生波長の関係

図 2　波長変換の原理と発生波長

れまで半導体レーザで発生できなかった波長のレーザ光を得ることができ，和周波発生を用いて543 nm（緑），560 nm（黄緑），589 nm（橙）の可視光レーザを開発することに成功しています[(2)]．

一方，中赤外発生には差周波発生を用いています．波長の関係で表すと，入力波長をλ_1，λ_2として，

$$\frac{1}{\lambda_3}=\frac{1}{\lambda_1}-\frac{1}{\lambda_2}$$

の波長λ_3を発生することとなります．λ_1を励起光，λ_2を信号光，λ_3をアイドラ光と呼び，図 2 (b) に示すとおり，通信用半導体レーザを用いることにより 2 ～ 3 μmの中赤外光が発生可能です．

NTTフォトニクス研究所では，中赤外波長変換導波路を作製し，COの吸収がある2.3 μm帯，CO_2の吸収のある2.7 μm帯，さらにメタンの吸収のある3.3 μm帯の発生に成功しています．その波長変換特性を**図 3** に示します．図 2 (b) に示したように，適切な励起光波長に対して信号光波長を可変させることにより中赤外発生波長を可変できますが，特に2.3 μm帯域では 1 つの波長変換素子で広い波長範囲をカバーすることができます．波長変換効率は，導波路化していないものに比べ，2 桁以上の向上を達成しています．

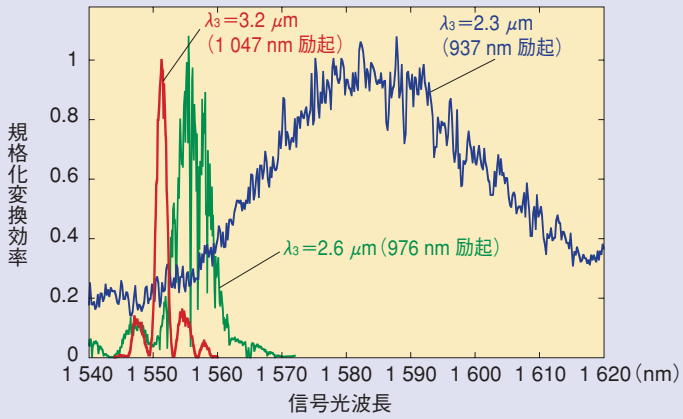


図 3　波長変換効率の信号光波長依存性

波長変換レーザ光源

NTTフォトニクス研究所では，励起光源と信号光源に 2 台の半導体レーザダイオード（LD）を用い，波長変換導波路のモジュールを光源ヘッドに組み込んだ中赤外波長変換レーザ光源を開発しました．光源の写真を**図 4** に示します．LD 2 台と波長変換モジュール（図 4 (b)）は，光ファイバにより結合され，黒色のヘッド内部に収納されています．またLDおよび波長変換モジュールの温調およびLD電流源は，電源部からヘッドに供給されます．電源は100 Vコンセントから供給でき，可搬性もあるコンパクトな中赤外波長変換レーザ光源を実現しました．

(a) 光源概観　(b) モジュール概観

図 4　波長変換レーザ光源

この光源は，波長変換モジュールの効率の高さにより，LDを励起光に用

いても3 μm帯において0.2 mWとガス分析に十分な出力を得ることができます．また，電源部には信号光LDの注入電流を変調できる外部端子を設けています．信号光LDの注入電流を変調することにより，出力波長を変調することができます．メタンガスを封入したガスセルを用いて吸収スペクトルをオシロスコープで観察した結果を**図5**に示します．200 Hz周期の変調信号によりメタンの特徴的な吸収スペクトルを観察することができました[3]．

複数ガス同時検出

図3に波長変換効率の信号光波長依存特性を示しましたが，3 μm帯では1つの波長変換導波路からは信号光波長にして2 nm，3 μm帯中赤外波長にして8 nm程の可変幅の発生に限られていました．そこで発生波長を変更する場合には，分極の反転周期を適切に変更して別の導波路素子を準備する必要がありました．そこで分極反転の周期を1つの導波路内で変調して，可変波長範囲を広げたり，複数の波長で中赤外光の出力が得られる導波路構造の素子開発にも着手しています．周期分極反転構造に周期的な位相変調を施して3つの波長変換帯域が1つの導波路で得られる波長変換素子を作製し，メタン，エチレン（C_2H_4），エタン（C_2H_6）の3種のガスの吸収スペクトルを測定しました[4]．その吸収スペクトルを**図6**に示します．各ガスはガスセルに封入されたものを用いました．信号光には通信用に開発されたコンパクトな波長可変LDであるTLA（Tunable Laser-diode Array）を用いました．3つの波長域をダイナミックに切り替え，そして各波長域内では詳細にTLAの波長を掃引することにより，複数ガスを1台の光源で検出しました．

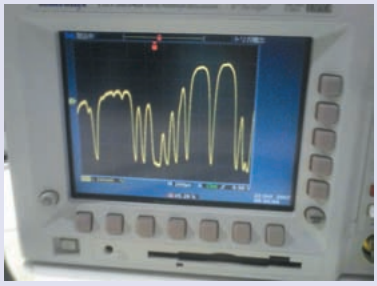


図5　メタンガスのリアルタイム検出オシロスコープ波形

今後の展望

これらの波長変換導波路を用いて大気を減圧することにより35 ppb相当のメタンガスの検出が可能なことを確認しています．また入力光を高強度にすることにより3.4 μm帯において65 mWの非常に高い光出力が得られることも確認しており，高感度ガス検出応用にも高い期待が持てます．

現在，波長変換モジュールのかたちで中赤外発生用波長変換素子をNTTエレクトロニクスより販売を開始しています．今後はさらなる高性能化を進めるとともに，4 μm帯への波長帯の拡大等により，多様な顧客ニーズにこたえられるよう開発を進めていく予定です．

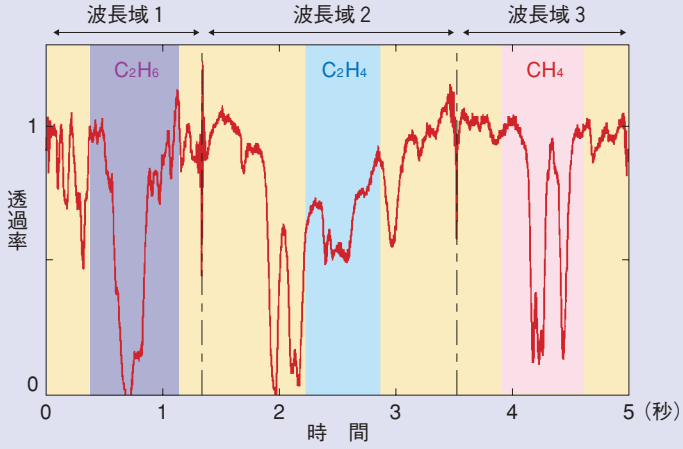


図6　複数ガス同時観測

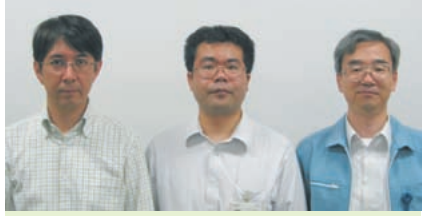
■参考文献

(1) http://cfa-www.harvard.edu/hitran/

(2) http://www.ntt.co.jp/news/news04/0402/040210.html

(3) O.Tadanaga, Y.Nishida, T.Yanagawa, K.Magari, T.Umeki, M.Asobe, and H.Suzuki : "Compact sub-mW mid-infrared DFG laser source using direct-bonded QPM-LN ridge waveguide and laser diodes," Proc. SPIE, Vol. 6455, 64550D, 2007.

(4) M.Asobe, T.Yanagawa, O.Tadanaga, T.Umeki, Y.Nishida, H.Ishii, and H.Suzuki : "Multi-Wavelength Mid-Infrared Light Source Using Multi-Quasi-Phase-Matched $LiNbO_3$ Waveguide and Tunable Laser Diode Array," Proc. Nonlinear Photonics 2007, NTuA2, Quebec, Canada, Sept. 2007.



（左から）遊部　雅生／忠永　修／柳川　勉

通信用光源技術を医療および環境分野に適応できる技術として展開し，住みよい社会に役立つ製品開発に貢献できればと考えています．

◆問い合わせ先

NTTフォトニクス研究所
先端光エレクトロニクス研究部
TEL　046-240-3226
FAX　046-240-3259
E-mail　tadanaga@aecl.ntt.co.jp