チューニングなしで中赤外をカバーする広帯域OPO

ニック・ラインデッカ、コンスタンチン・ボドピャノフ

二重共鳴中赤外光パラメトリック発振器(OPO)は、非縮退OPOとは異なり、厄介なチューニングなしで超広帯域出力を瞬時に発生する。

長い間OPOは、レーザ光源が達しえていない重要なスペクトル領域の光出力を生み出す多用途手段と認識されてきた。中間IRは豊かな分光情報を含むが、便利なレーザ線が不足する領域である。数年前から、われわれのチームは広帯域の中間IRを発生する特殊なクラスの二重共鳴OPOの研究を実施している。

典型的なOPOでは、強力なレーザで適切な光学材料の2次非線形感受性をポンプする。これを光フィードバック用の適切な共振器と組み合わせて、ひとつ以上のより長い波長の発振を達成する。一般に、その発振波長は共振器または非線形材料のパラメータの選択によって調整することができる。

OPOは、それらの広い波長同調性と強い出力パワーとによって、中赤外(IR)分光で広範囲に利用されている。量子カスケードレーザ(QCL)は現在期待の持てそうな選択肢であるが、個々のデバイスの可変同調範囲が狭いので超広帯域測定向きではない。

一方、OPOは広いスペクトル範囲にわたって同調可能であるが、精密で連続的な方式での同調はいまだ挑戦である。

二重共鳴縮退OPO

これらとは対照的に、われわれは瞬時広帯域OPOシステムを開発した。これは特に、フーリエ変換IR分光法の原理に基づく並列式高分解能分光に適している[1]。このOPOは低いポンプ閾値(10mW以下)で二重共鳴動作し、出力の中心波長がポンプ波長の2倍になる近縮退で同期するように設計されていて、非線形プロセスのアクセプタンス帯域幅が非常に広い。これを低分散の共振器と組み合わせることによって、われわれは波長チューニング(またはノブ)なしで極めて広い出力帯域幅を達成した。

これらの設計を可能にした鍵は、近赤外(NIR)領域で安定にモードロックされる超高速ファイバレーザの商用化であった。われわれのシステムの同調ポンプに使用することによって、NIRポンプレーザの「コム」モードは、二重共鳴縮退OPOの特徴である広いスペクトル線幅広がりを使った位相同期と

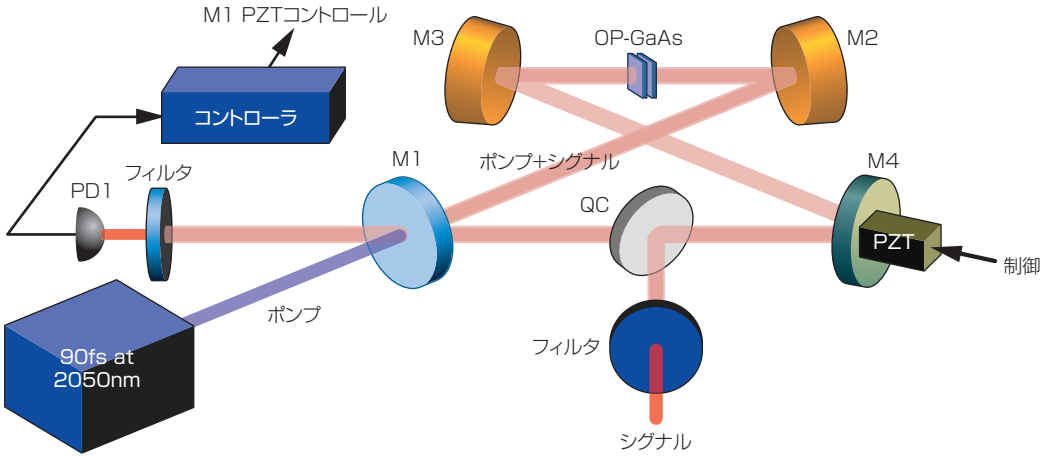

図1　図は同期的にポンプされた広帯域低調波OPOシステムの構造を簡略的に説明している。ポンプレーザは75MHzの繰り返し率と93-fsのパルス幅で動作する600mWのTmファイバ発振器-増幅器システムである。このポンプビームは誘電体ミラーM1を通ってOPOに入る。残る共振器光学系は金属製の金ミラーである。共振器の短いレッグ位置にある曲率半径50mmの複数ミラーが0.5mm長のOP-GaAs結晶内に固有モードを厳密に集光させる。共振器長は圧電アクチュエータ(PZT)によって正確に安定化される。CaF_2またはYAG(OCとして設計)板は、GaAsの分散を補償し、フレネル反射に基づくアウトカプリングを提供する。

周波数同期ダウンコンバージョンによって中IRへと厳密に変換された[2]。

われわれは、すでに、エルビウム(Er)ファイバ(1.5μm)、ツリウム(Tm)ファイバ(2.05μm)、Cr:ZnSe(2.45μm)モード同期などのレーザをポンプ光源として、周期分極ニオブ酸リチウム(PPLN)と配向パターン化ヒ化ガリウム(OP-GaAs)を非線形光学材料として使用することにより、広帯域の中IR発生を多数のシステムで実証した[3]~[5]。われわれの最新システムは(**図1**)、ポンプレーザに、米IMRAアメリカ社(IMRA America)製の中心波長2.05μm、平均出力600mWのTmファイバ発振器-増幅器系を使っている。これは75MHzの繰り返し率で93fs幅のパルスを発生する。このOPO共振器は、ポンプ繰り返し率に長さを整合させた4m長のリング共振器である。この内部共振器光学系は、ポンプ光に対する高い透過率と3~6μm範囲における高い反射率をもつ平坦な誘電体ミラーM1と中IRで高い反射率をもつ数枚の金めっきミラーからなる。

利得を生み出すOP-GaAs結晶

4.1μmに中心をもつ広帯域利得は、米BAEシステムズ社(BAE Systems)が分子ビームエピタクシーと水素化物気相エピタクシーの組み合わせによって成長させた長さ0.5mmの準位相整合(QPM)OP-GaAs結晶に基づく厚み1mm以上のQPM「膜」によって提供された。この試料の使用可能口径は1×4mmであった。QPM周期は60.5μmであり、これは0.5mm結晶の全長にわたるたった8つの分域反転周期に相当する。この結晶を切削研磨してブリュースター角(73°)で動作させ、すべての相互作用波の偏光がGaAs<111>方位に平行になるようにした。4.1μmで

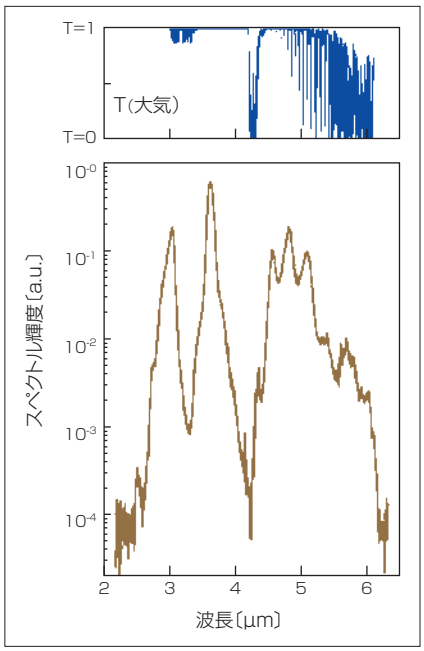

図2 OPOは、同期させることによって、安定な超広帯域(2.6~6.1μm)出力を分光学的に重要な「指紋」領域の中央に発生する。4.25μm近くのディップはスペクトル検光子へのパージなし経路のCO_2吸収による。大気の透過率を上部グラフに示した。

負の群速度分散(GVD、$d^2k/d\omega^2$)を持つイットリウムアルミニウムガーネット(YAG)またはフッ化カルシウム(CaF_2)を近ブリュースター角で共振器内に挿入し、GaAsの正のGVDを部分的に補償した。出力はこの補償板によるフレネル反射として取得された。

二重共鳴は、OPOの発振波長を左右する共振器長に厳密な位相抑制を課す。一般に、われわれはラウンドトリップ共振器長を走査する時、その出力内にポンプ波長間隔のいくつかのピークを観測した。閾値(20mWのポンプパワー)近くでは、発振は単一波長で起きた。ポンプパワーを増したとき、われわれは、600mWのポンプパワーで約20のピークを含む隣接する離調波長での発振を観測した。出力スペクトルは、付加した共振器位相と未補償分散との相互作用により、共振器長とともに変化することを見出した。しかしながら、

omicron LASERAGE

LightHUBシリーズ

コンパクト
レーザー
コンバイナー

特　徴

- 2台、4台、最大6台のレーザー搭載可能
- 26波長から異なる組合せ可能
- 偏波面保存シングルモードファイバー接続可能
- 自然空冷(冷却ファン無し)
- 小型一体整形の頑強なハウジングボックス
- 制御用ソフトウエア付属
- フィールドでのレーザーアップグレード可能

用　途

- フローサイトメトリ
- 共焦点顕微鏡
- オプトジェネティック
- マシンビジョン
- リプログラフィック
- テストと測定

Omicron(オミクロン)社では、バイオ・理科学・OEMに最適で多彩な商品群をラインアップしています。
詳細については、弊社ホームページでOmicron社製品をご覧ください。

http://www.japanlaser.jp/

E-mail: lase@japanlaser.jp

JLC JAPAN LASER 株式会社日本レーザー

本　社　〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1
TEL: 03-5285-0863(直)

大阪支店　TEL: 06-6323-7286
名古屋支店　TEL: 052-205-9711

LaserFocusWorld JAPAN

e-DMプログラムをご存じですか？

Laser Focus World JapanのE-DMプログラムなら、業種・職種・購買関与製品・担当製品など、ご希望の対象者に限定してメール配信を行うことが可能です。
弊誌読者の皆さまは、レーザー／フォトニクス／オプトエレクトロニクス応用技術／製品の開発、研究、マーケティングなどに携わっている方だけ。
光産業に特化した専門誌ならではの広告プログラムです。

こんなご要望にお応えできます。

■既存顧客以外に新製品DMを送りたい
■製品カタログを送りたい
■人材募集を行いたい
■研究者対象の製品アンケートを実施したい
■技術者限定でセミナー告知を行いたい

e-DM 広告掲載料金（税抜）
データ使用料金 @70円
（抽出条件1項目につき＋@10円）
データ配信料金 @20円

お問い合わせ・お申し込みは…
株式会社 ICS コンベンションデザイン
電話：03-3219-3641 Email：led@ics-inc.co.jp

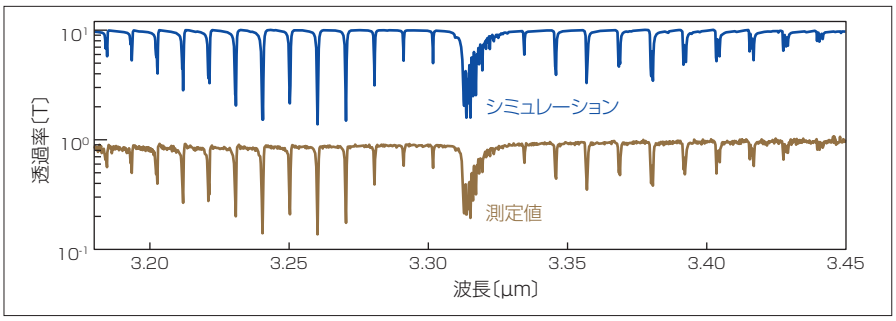

図3 3.3μm近傍のメタンガス（10ppm台の濃度）の吸収スペクトルが共振器内分光法によって得られた。比較のために、現在スミソニアン宇宙物理観測所が管理するHITRAN（高解像度透過分子吸収）データベースから得たメタンスペクトルも示した。

最適共振器長にロックすると、そのスペクトルは安定化し、2.6～6.1μmの極めて広い帯域幅になった（**図2**）。われわれは、分散補償板からのフレネル反射に基づいて、このシステムから最高40mWをアウトカップリングした。

吸収分光法

共振器は、乾燥窒素を使ってパージすることができるプラスチックボックス内に封入した。そうしなければ、共振器内の吸収と大気中のCO_2やH_2Oによる分散を起源とする強い効果が出力スペクトルに出現するからだ。われわれは、OPO共振器内に痕跡量ガスを導入して、それらの吸収スペクトルをOPOスペクトルへのそれらの効果を通して高感度で測定することができた。**図3**は3.3μm近傍のメタンガスの吸収スペクトルを示している。

これらの結果は、縮退同期ポンプOPOが、中IR領域における超広帯域出力の達成に極めて有望であることを裏づけている。Tmファイバレーザでポンプされたわれわれの縮退GaAsベースOPOは、OH、CH、CO、NHなどの化学結合が最も強い振動特徴を示す範囲、2.6～6.1μmのオクターブ幅以上の出力を提供する。適切な共振器内分散の管理は、このような広い帯域幅の達成に必須である。広い周波数カバレッジに加えて、OPOの閾値達成に必要な低いポンプパワーとポンプに対するシグナル／アイドラーの位相同期とによって、このシステムは中IR領域の精密な周波数コム分光に理想的な光源になった。

謝辞

著者らは、アリレザ・マランディ氏とマグナス・ハッケシュタッド氏からの支援と、IMRAアメリカ社、BAEシステムズ社、米国海軍研究局、NASA、空軍科学研究局、アジレント・テクノロジーズ（Agilent Technologies）、スタンフォード大学医科大学院、スタンフォード大学ウッズ研究所、および仏サノフィ・アベンティス社からの援助に深く感謝する。

参考文献

(1) F. Keilmann et al., Opt. Lett., 29, 1542 (2004).
(2) A. Marandi et al., Opt. Expr., 20, 7255 (2012).
(3) N. Leindecker et al., Opt. Expr., 19, 6296 (2011).
(4) N. Leindecker et al., Opt. Expr., 20, 7047 (2012).
(5) K. L. Vodopyanov et al., Opt. Lett., 36, 2275 (2011).

著者紹介

ニック・ラインデッカ（Nick Leindecker）は米スタンフォード大学（Stanford University）E.L.ギンズトン研究所（E.L. Ginzton Laboratory）の大学院生研究者であり、コンスタンチン・ボドピャノフ（Konstantin Vodopyanov）は主席研究科学者である。e-mail:nick.leindecker@stanford.edu URL: www.stanford.edu/group/ginzton/。

LFWJ