QCLがMid-IRスペクトルをカバー

ジョン・ウォレス

適切にパッケージングされた小型で頑丈な量子カスケードレーザ（QCL）は、mid-IRで動作する多くのアプリケーションにとって最適の光源である。

量子カスケードレーザ（QCL）は、人間の発明の才の証である。そこでは、一見変更不可能な材料の特性（レーザ波長はバルク材料成分の関数）が、画期的な方法で材料を構造化することにより克服されている（反復的に、数百層の材料で構成された超格子が、一連の多重量子井戸ヘテロ構造を形成）。

普通の半導体レーザは*p-n*接合で励起電子とホールとを結合することでシングルフォトンが生成されるが、これとは異なりQCLの電子は、1つのバンド内の量子化されたサブバンドで、何度もサブバンド間遷移を起こし、その過程でフォトンの「カスケード」が起こる。QCLの超格子特性を調整することで発振波長を調整する。

注記： 少し似たタイプのレーザ、インターバンドカスケードレーザ（ICL）は、サブバンド間遷移ではなく、バンド間遷移でフォトンを生成する。それ自体は非常に興味深いが、ここでは扱わない。

QCLは、今日最も用途が広い中赤外（mid-IR）レーザの1つである（テラヘルツ照射領域の有力な発振器でもある）。これは光パラメトリックオシレータ（OPO）や光パラメトリックアンプリファイア（OPA）のようなmid-IR光源と比べて非常にコンパクトで故障がなく丈夫だからである。結果的に、QCLは分光計測用光源として最適である。IR分子「フィンガープリント」スペクトル領域での利用、また多くの他の用途に向いている（**表1**）。必要なら、そのような計測器は小型で、バッテリー動作、現場での利用で耐久性を持たせることができる。

「mid-IRアプリケーションは、複数市場に及ぶ。科学研究、ライフサイエンス、産業プロセス制御、環境モニタリング、防衛やセキュリティなどだ」と米デイライト・ソリューションズ社の科学製品ダイレクター、リー・ブロムリー氏は言う。「mid-IRアプリケーションの多様性は、高感度分子検出やイメージングからミサイル攻撃から航空機を保護する用途まであり、これが様々なmid-IRレーザシステムに対する要求を活発化している」。

スペクトル範囲と可変性

ブロムリー氏によると、QCLは柔軟性があるので多くの用途に理想的に適合する。中心波長は、4μm以下から12μm超までをカバーし、パルス動作、連続波（CW）動作にも即時適応する。広い利得帯域のチップは500cm^{-1}以上の範囲で可変であり、出力性能は数ワットまである。

QCLチップ設計は進化し続けているので、QCLあたりの可変範囲は、ここ数年で急速に拡大した。「今日、QCLの中には通常、500cm^{-1}を超える、つまり中心波長の30％の可変範囲をもつものがある」と同氏は説明している。「とは言え、多くのアプリケーションで、より広い可変範囲に対する飽くことのない要求があり、これがマルチQCLレーザアーキテクチュアの開発を後押ししている」。

同氏によると、その1つであるデイライト・ソリューションズ社のMIRcatは、1つの封止レーザヘッドに4個の可変QCLモジュールを合体している。全QCLビームの優れた光学機械設計と同

表1　mid-IRアプリケーション例とレーザ光源要件

アプリケーション	CW	パルス	低ノイズ	広帯域可変	狭線幅	高速同調	高出力	ビーム品質
気相分光法	■		■		■			■
遠隔検出	■	■	■	■		■	■	■
IR防衛手段	■	■					■	■
ナノスケールイメージング	■	■	■	■		■		■
IR顕微鏡		■	■	■		■		■
環境モニタリング	■	■	■	■	■	■		■

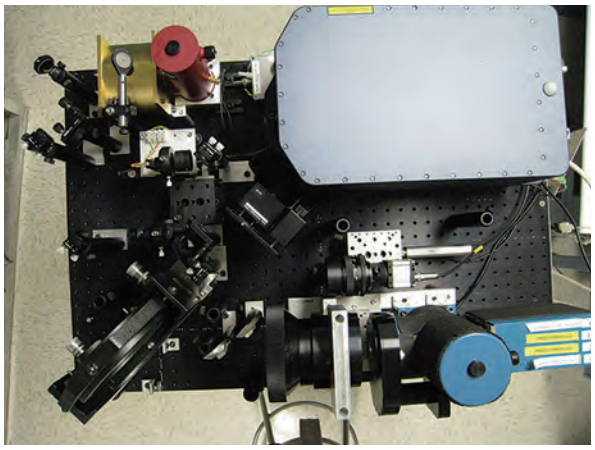

図1 Daylight Solutions MIRcat QCL（右上）は、独立のIED検出研究を行うための実験装置にレーザ光源として内蔵されている[(1)、(2)]。（提供：デイライト・ソリューションズ社）

軸照準合わせにより、出力は単一の完璧な平行ビームが保証されている（**図1**）。MIRcatはパルス動作またはCW動作、その両方が可能である。ピーク出力または平均出力は最高1W程度、相対強度ノイズ（RIN）は−145dBc/Hzと低く、mid-IR可変範囲は>900cm^{-1}（つまり>6000nm）。

MIRcat QCLは、同社のIR顕微鏡プラットフォームの心臓部にあり、マルチQCLレーザ光源とIRカメラを統合することで、ビデオレートの離散的周波数、ハイパースペクトルmid-IRイメージングを可能にしている。ブロムリー氏によると、イメージングするのは、生物組織、ポリマ、半導体材料、分子センサである。分子センサは、高リフレッシュレート、多種分子検出用に高速スキャンレーザエンジンを搭載している。

米ブロック・エンジニアリング社は、コンパクトな封止パッケージで、パルス外部キャビティQCLを製造しており、これも同社の計測装置製品ラインに「エンジン」として内蔵されている（**図2**）。製品ラインには、LaserWarn Detector、オープンパス・ガスセンシングシステムが含まれており、同社のCEO、ペトロ・コティディス氏によると、これは化学攻撃あるいは有毒漏出に対する重要施設の保護に使用できる。

LaserTune QCLは、同氏によると、掃引モードあるいは5.4～12.8μm範囲の任意の選択波長で動作する。この範囲の可変は、スペクトル分解能約1～2cm^{-1}で40ms以下である。同システムは、1mradを上回るビーム照準安定性を持ち、パルスレートは3～300nsパルスで最大3MHzである。

QCLは外部ディテクタ（これもブロック社製）と組み合わせると、IR分析、分光学的評価用の実験ツールになる。あるいは、サンプリングやガスまたは液体フローセルを統合することもできる。これらはプロセス用、産業用、環境アプリケーション向けである。コティディス氏がLaserTune用のリストに挙げている主要アプリケーションに含まれるものは、IR顕微鏡、ファイバ結合、原子間力顕微鏡（AFM）がある。IR顕微鏡では、回折限界的な大きさでターゲットをイメージングすることで微小サンプルの分析ができる。原子間力顕微鏡はエミッタの広いスペクトル範囲と高速スペクトルスキャニングを駆使する。

単体QCLレーザ

QCLは上記のように長寿命でフィールドで酷使向けではモジュールで販売されているが、実験用途では他の形態

DAYLIGHT SOLUTIONS®

中赤外 3~12um
チューナブル外部共振型
量子カスケードレーザー

New!!

特徴
・パルス、CW オペレーション
・広い波長チューニング領域
・1 台のレーザーヘッドに最大 4 台のモジュール搭載（MIRcat™ シリーズ）
・狭線幅
・モードホップフリー波長チューニング（CW-MHF シリーズ）
・ハイパワー　最大 2W（Aris™ シリーズ）
・高速チューニング >1000cm^{-1}/sec（Hedgehog™ シリーズ）
・コンパクトなコントローラ（GUI & SDK 付き USB/Ethernet）

アプリケーション
・ナノスケール・イメージング＆赤外分光
・光音響分光 (PAS)
・ハイパースペクトル・イメージング
・時間分解赤外分光

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: 03-5285-0853（直）
大阪支店　TEL: 06-6323-7286
名古屋支店　TEL: 052-205-9711

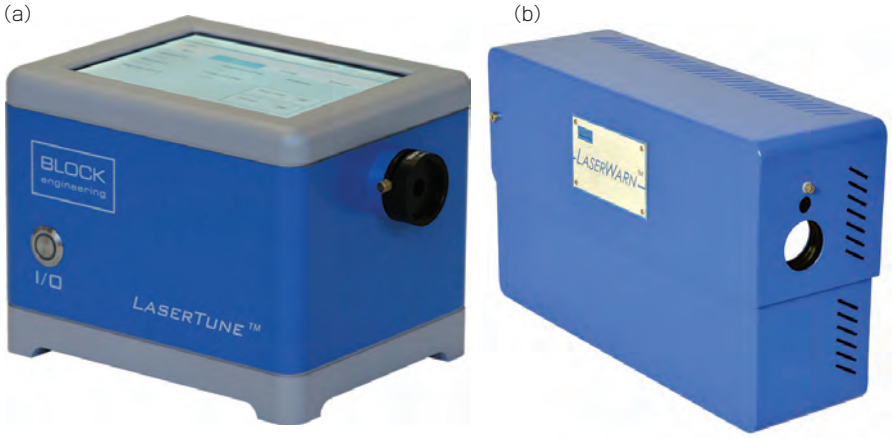

図2 LaserTune（a）、ブロック・エンジニアリング社によるパッケージ化されたQCLは、同社のLaserWarn「トリップワイヤ」オープンパス・ガスセンシングシステム（b）の光源（提供：ブロック・エンジニアリング社）。

も可能である。封止タイプおよびコリメートされたQCLモジュールに加えて、スイスのアルプスレーザズ社は、QCLをベアチップ（はんだ付けも接続もされていない）、チップ・オン・キャリア、交換可能レーザ用のラボ向けハウジングで提供している。

最近のバージョンは、−30℃まで冷却可能ペルチェクーラー、反射防止コートセレン化亜鉛ウインドウ、温度センサ（パッケージは、外部的に空冷または水冷で、ペルチェクーラーからの熱を除去）を搭載している。反射防止コートセレン化亜鉛ウインドウは、3.5〜12μmで高い透過性があり、様々なパルスQCLあるいはCW QCLチップ・オン・キャリアで利用する。さらに、アルプスは安価なパルスのみのQCLを製造しており、これはわずか38.8×25.4×20.5mmの小型TO-3キャンで販売している。

英ストラティアム社は、Bruar、50mWピークパルスQCLチップ・オン・ア・サブマウントを製造している。提供しているエミッタは、波長2.8、3.3と10.0μmで、狙いはガスセンシング、精密計測、分光アプリケーションである。メタン（CH_4）、塩化水素（HCL）、ホルムアルデヒド（CH_2O）、一酸化炭素（CO）、二酸化炭素（CO_2）、酸化窒素（NO）および他の微量ガスの正確な検出が可能になる。

提供可能な多くの非可変QCL在庫波長の例として、米アドテック・オプティクス社は、チップ・オン・サブマウントとして分布帰還（DFB）QCLを製造している。在庫波長は、4.34、4.54、4.58、4.72、5.26、6.23、7.83、9.47、10.26μm。特注設計も可能であり、リクエストに応じて他の波長のQCLも製造可能。アドテックのQCLは、気密封止パッケージまたはTO-3キャン、VHLパッケージ（QCLからコリメートされていない光を放出するウインドウを上部に持つ小型ハウジング）と同じ波長範囲で提供可能である。

米ソーラボ社は、ファブリペロ（FP）キャビティ QCLとDFB QCLの両方を製造している。FP QCLは医療イメージング、イルミネーションおよび顕微鏡に適した広帯域出力、DFB QCLの出力は非常に狭帯域化されており、狭い周波数範囲で可変でもある。メタルCマウントパッケージは、わずか6.4×4.3×7.9mmサイズ、レーザはCマウントから電気的に絶縁されている。これらのQCLは極めて柔軟に使える。マウント、ドライバ、温度コントロールはユーザーが行うが、必要に応じてソーラボ社が提供する。これらのQCLはモニタフォトダイオードを組み込んでいないので、低電流モード動作が必要がある。

フィールド用途にモジュールに組み込まれたQCLは一般にある程度の酷使に耐えるが、QCLのラボバージョンは損傷を避けるために適切に扱われなければならない。ソーラボ社は、ほこりや他の微粒子だけでなく、静電ショックやはんだのフラクスフュームを避けるように推奨している。これらのラボ用QCLは、適切な電源と組み合わせるべきであり、また温度調整制御ハードウエアも必要となる。さらに、レーザ筐体を落してはならない。

多くのQCLメーカーは、QCL向けに独自のドライバと温度コントローラを提供している。しかし、米ウェーブレングス・エレクトロニクス社は、この分野の専門メーカーであり、ドライバ、温度制御装置、その他の付属品を、QCLを含む幅広いレーザ向けに提供している。一例として、同社は、様々な形態のQCL2000 2 A QCLドライバを提供しており、これにはディスプレイと操作ノブ付のラボ計測器バージョン、一段と小型でヒートフィン付気密ボックス（**図3**）が含まれる。両バージョンとも自動制御とモニタリングのためにコンピュータでネットワーク化されている。

即応タイプQCLベースのシステム

前述のように、QCLメーカーの中には、自社のQCLを分光測定器や他の測定器に組み込んで、科学、産業、防衛に使える状態にしているところもある。例えば、すでに述べたデイライト・ソリューションズ社のMIRcat QCLのパルスバージョンは同社のSperoイメージング顕微鏡に組み込まれている。Spero

は、ブロムリー氏によると、高解像度IRイメージング計測用に設計されており、複雑な不均一サンプルの分子成分や化学成分を同定し定量化するためのスペクトルデータを計測するように工夫されている。

「FTIR（フーリエ変換赤外）ベース顕微鏡システムは、低輝度インコヒレント熱源を使用しており、スペクトルと画像構築に非常に長い掃引を必要とする。これとは対照的に、MIRcatレーザの高出力と高輝度は、大型の室温動作マイクロボロメータカメラの利用を可能にする」と同氏は言う。「さらに、こうしたカメラを利用すると、ビデオレートの離散的周波数イメージングが可能になる。同様にして、MIRcatを離散的波長ステップで可変して、各波長でmid-IR画像を記録すると、ハイパースペクトルデータキューブが、迅速に構築できる。リアルタイムで撮像し、画像コンテンツをmid-IRスペクトル応答に従って解析する能力は、画像解析スループットと化学的特異性の新たなレベルをIR顕微鏡にもたらし、また新たな、考え方を根本から変えるような能力を組織病理学やガン診断などの分野に約束するものである」。

ブロック・エンジニアリング社のLaser Warnオープンパス・ガスセンシングシステムは、コティディス氏によると、アイセーフ、非可視QCL使って脅威となるガス状化学物質に対する「トリップワイヤ」を作る。2～3kmの距離をカバーするので、危険な化学物質が保護域のどこで「トリップワイヤ」ビームを遮っても、同システムは1秒以下で警告する。

「システムは、現在入手可能な最も高感度の遠隔化学物質検出システムであり、屋内外で24/7モードで動作可能、消耗品は不要である」と同氏は説明している。「この製品の商用アプリケーション例には、工程管理改善のための工場排出ガスモニタリング、公害の削減、環境放出要件順守が含まれている。政府およびセキュリティアプリケーションの例には、輸送ターミナル、大使館、政府施設、前線軍事基地に対する化学薬品による攻撃からの保護が含まれる」。

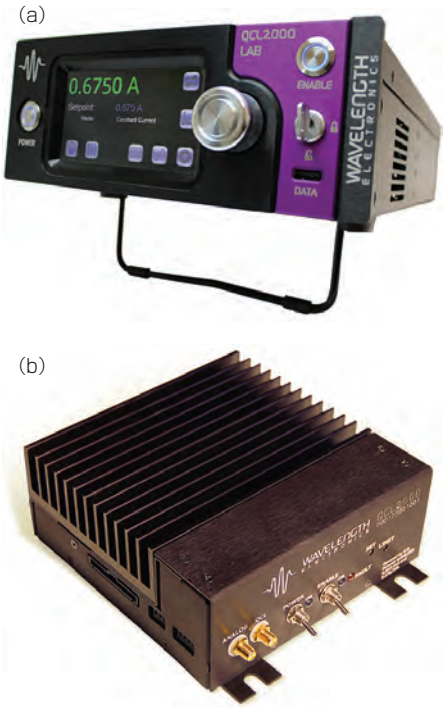

図3　ウェーブレングス・エレクトロニクス社は、QCL2000 2 A QCLドライバを製造しており、構成はラボバージョン（a）とシステム組込用の小型気密ボックス（b）となっている（提供：ウェーブレングス・エレクトロニクス社）。

このようなアプリケーションを可能にするQCLの特性には超広帯域可変性が含まれる、とコティディス氏は付け加えている。このような超広帯域可変性は、数少ないレーザで多数の化学物質を検出する能力を保証している。mid-IR全域でQCLの1秒もかからない掃引、これによってリアルタイム検出ができる。また、消耗品なしで動作可能であることは、遠隔地での連続動作にとって重要である。

今後の展開

量子カスケードレーザは、その先に明るい未来がある。将来のひとつのバージョンは、米ペンダー・テクノロジーズ社で開発中であり、同社は異なる波長の多数のQCLを収めたシングルチップを開発した。

「最新にして最もコンパクトなセンサへの組込みに向けて考え方を根本から変える可能性のあるソリューションとして、QCLアレイは発展を続ける」とマーク・ウィティンスキィ氏は言う。同氏は、ペンダー・テクノロジーズ社の化学分析とセキュリティユニット担当副社長（VP）。「現在の未開拓分野に含まれるものは、波長のカバー範囲を広げてIRのもっと広い範囲を収容すること、強固な統合のためのモノリシックで小型のビームコンバイン技術、コンパクトであるが低電力変換効率のQCLを適切に駆動できる強力な、新しい計測機向けのコンパクトな特注エレクトロニクスである。当社は現在、モノリシック、電気チューニングQCLアレイを開発している。狙いは、6.7～11μmのフル“フィンガープリント”長波長IR領域をカバーするQCLアレイだ。完成すると、ガス可搬センシングプラットフォームおよび凝縮相可搬センシングプラットフォームの両方をサポートすることになる。発売は、2017年の予定である」。

参考文献

（1）C. A. Kendziora et al., "Broadband infrared imaging spectroscopy for standoff detection of trace explosives," Proc. SPIE, 9836, 98362G（May 25, 2016）; doi:10.1117/12.2224049.

（2）R. Furstenberg et al., Appl. Phys. Lett., 93, 224103（2008）.

LFWJ