

テラヘルツ応用への競争条件を整えた量子カスケードレーザ

ジェフ・ヘクト

量子カスケードレーザは急速に改良されて中赤外の重要な光源となり、テラヘルツ領域の新しい光源としても期待されている。

米電力環境エネルギー研究機構 (PEER) のシェン・ウー氏 (Sheng Wu) のようなユーザは、量子カスケードレーザ (QCL) の劇的な進歩の証言者になれる。ウー氏が2005年の後半に初めて購入したQCLは、その駆動に7A、15Vのパルスが必要であり、彼はレーザ放射ではなく、黒体放射が出力されているのではないかと疑ったほどだった。わずか2年前、「分光計に広く使われている安価で信頼性のある10Wの黒体光源」を「連続動作もできず、赤外 (IR) の1%しか同調できず、コストは100倍もかかる」10mW以下のQCLエミッタに置き換えるべきだという彼のアイデアは評論家から冷笑された。しかし現在、ウー氏は中赤外 (MIR) QCL分光法を使用して、炭化水素中の炭素同位体比を分析している。

QCLは研究プロジェクトだけのものではない。今年8月、米ブロックエンジニアリング社 (Block Engineering) はQCLに基づく3系列のMIR分光計を製品化した。同社によると、これらの分光計は従来のフーリエ変換赤外 (FTIR) 分光計の性能を上回り、近赤外 (NIR) の表面測定、顕微鏡法および可変同調光源の用途に利用できる (図1)。

米プリンストン大学の教授を務め、保健環境用中赤外技術 (MIRTHE) コンソーシアムの代表を兼務するクレア・グマッシュ氏 (Claire Gmachl) によると、MIR QCLの最近の進歩にはレー

ザの改良と実用化の進展の二つが大きく貢献している。また、到達が難しいテラヘルツ帯を放射するQCLの開発も第3の貢献を果している。

QCLの基礎

QCLは1994年に、現在は米ハーバード大学に在籍するフェデリコ・カパッソ氏 (Federico Capasso) と、同様にスイス連邦技術研究所に在籍するジェローム・フェイススト氏 (Jerome Faist) らの研究チームによって初めて実証された⁽¹⁾。QCLは電子が半導体量子井戸の積層構造を通過するときに、光子の量子カスケードを発生する。電子は量子井戸の伝導バンド内の低い方のサブバンドに落ち込み、トンネル効果に基づいて次の量子井戸へ移動する (図2)。電圧が積層構造の全体に加わると、積層構造の異なる量子井戸中の電子はより低いエネルギー準位へ繰返して落ち込む。

この過程は電子と正孔が接合層の内

部で再結合する半導体レーザの場合とは基本的に異なる。QCLの場合は電子だけが電流を運び、量子井戸の積層構造を一方向に通過し、サブバンド遷移による光子のカスケードを放射する。バンド間カスケードレーザはQCLと半導体レーザとのハイブリッド構造からなり、電子と正孔の両方が接合部の含まれる積層構造を通過する。バンド間カスケードレーザは3~4 μ mの波長用に開発された (Laser Focus World 2010年1月号 p.22を参照)。

QCLが放射する二つの広いバンドは「中赤外」と「テラヘルツ」の二つの名称で呼ばれる。しかしながら、これらの名称は赤外領域バンドの他の定義と厳密には一致しない。QCLのMIRは3~30 μ mの範囲を対象とし、IR物理学に使われる3~5 μ mのバンドよりもはるかに広い。ほとんどのQCLはリン化インジウムとヒ化ガリウムの化合物半導体を使用し、その30~60 μ mの放射は「レストストラーレン」または残留光線と呼ばれる効果によって圧縮される。テラヘルツQCLは0.6~5.0THzの周波数を放射す

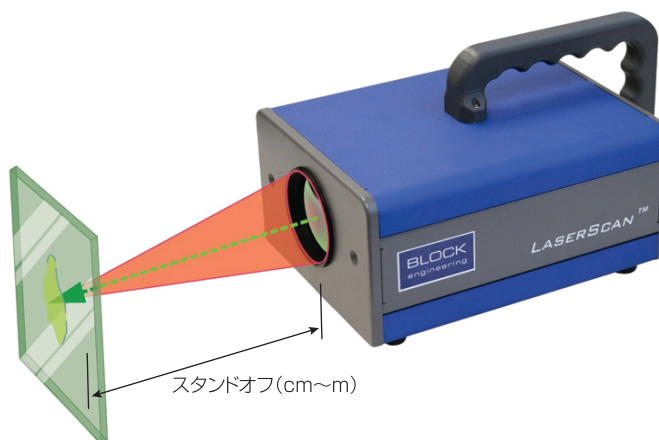


図1 ブロックエンジニアリング社の小型分光計は量子カスケードレーザを使用して、物体近傍のMIRスペクトルを走査する。

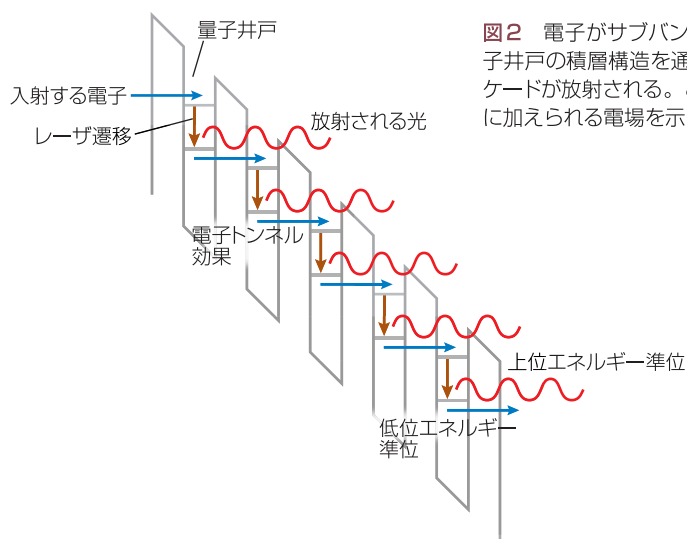


図2 電子がサブバンド遷移を行いながら量子井戸の積層構造を通過すると、光子のカスケードが放射される。この傾斜はQCLの全体に加えられる電場を示している。

る。この周波数は約60～500 μm の波長に相当するが、1.2THz以下の周波数を発生するには磁場を加える必要がある。

MIRの性能とバンド幅の改善

半導体レーザと同様に、MIR QCLも初期のデバイスから大きく進歩した。そのパルス動作には低温冷却と高い駆動電流が必要であったが、発振効率の向上、室温での連続発振、発振波長範囲の拡大、レーザ出力の向上、出力の可変同調化などが改善され、その性能は大幅に向上した。

QCLの性能改善は電子輸送の向上が鍵であり、そのためにはデバイス内の古典的電子散乱と量子的トンネル効果の両方の研究が必要になる。プリンストン大学のグマッシュ氏は「われわれは性能の犠牲なしに利得スペクトルを広げたい」と語っている。

QCLの主要な応用となるMIR分光法は波長範囲が重要になる。ブロックエンジニアリング社のレーザ分光計は複数のQCLを使用し、6～12 μm の波長範囲を走査して、12mWの平均パワーを達成している。同社の市場開発／事業開発担当副社長のアダム・アーリック氏（Adam Erlich）によると、5～14 μm の波長範囲を同調できれば、より多くの

気相バンドへの対応が可能になる。この分光計は室温動作のパルスレーザを使用するが、TEC上に実装して出力パワーと波長を安定させている。アーリック氏によると、FTIRシステムに対する利点は狭い波長範囲において高いパワーが得られることにある。

グマッシュ氏は「真に短いパルスの量子カスケードレーザの実現は応用にとって素晴らしいことになる」と語っている。規則性と制御性に優れた短いパルスは時間分解測定を可能にするが、QCLはその利得ダイナミクスのために伝統的なQスイッチとモード同期の技術を適用できない。理論家はQCLにも適用できる代替法、つまり利得をピコ秒の時間スケールで回復する方法を研究している。その一つの可能性はQCLシステムに固有の非線形性の利用にある。

パワーと応用

分光測定ほとんどの用途はミリワットのパワーで十分だが、QCLは4～5 μm の波長でワットレベルのパワーを発生したため、航空機に向けて発射されたブラインド赤外線追尾携帯型ミサイル用のIR防衛手段への応用が模索された。米バナリティカ社（Pranalytica）は4 μm を放射し送風機だけで冷却で

きる2WのQCLを提案した。

米デイトライトソリューションズ社（Daylight Solutions）の事業開発部長を務めるエリック・タケウチ氏は、「エネルギー効率を改善したQCLは雪だるま効果を示すため、効率を高めるほど大きなパワーが得られ、熱管理も容易になる」と語っている。デイトライト社は4～5 μm を放射する防衛用の5～10W QCLを出荷した。

タケウチ氏は「このようなパワーをMIRで放射できる技術はQCLに限られる。医療用のQCLは導波路を利用してビームを配送できる」と語っている。可変波長方式のレーザは発振波長を水の吸収ピークの近傍に設定し、配送されるパワーを調整することで、手術への応用が可能になる。

タケウチ氏によると、現在の製品は室温で回折限界のビームを10～15%のエネルギー効率で得ることができる。彼は「われわれは、今後2～3年のうちに、これを20～25%に押し上げようとしている。回折限界のビームで単一チップから3Wを得ることも実現間近である」と語っている。彼は、ワット級に達する8～10 μm のQCLにも期待を寄せ、「科学の成果を追いかける必要はない。必要なことは実用性のある実装システムに取組むことだ」と加えた。

テラヘルツレーザ

2001年に報告された最初のテラヘルツレーザは、数十Kの温度において数mWのパワーしか放射できなかった⁽²⁾。その後、QCLは急速に進歩し、その動作温度と出力は著しく向上した⁽³⁾。グマッシュ氏は「200Kを十分に超えた動作を可能にする素晴らしい研究成果が生まれようとしている。われわれは熱電冷却可能な温度に近づいている」と語っている。これは、QCLが小型化さ

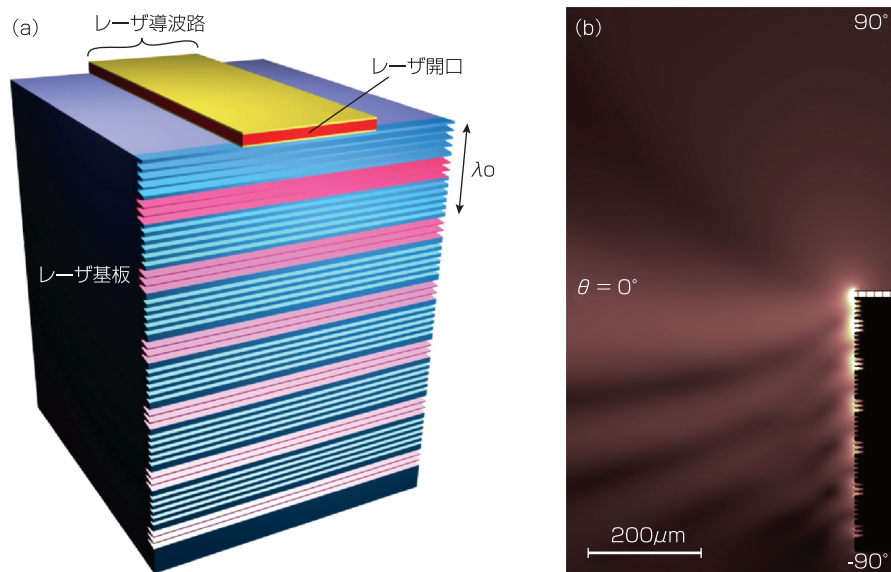


図3 メタ材料コリメータをバタン化したテラヘルツQCレーザを図解している。このメタ材料コリメータはデバイスの高濃度ドーピング化ガリウム (GaAs) 端面上に直接形成された。この図の着色は異なる機能をもつ深い溝と浅い溝を示している。浅い「青色」溝は端面上でレーザ出力を表面電磁波へ効率よく結合し、電磁波を端面に閉じ込める。深い「桃色」溝は効率のよい回折格子を形成し、表面波から遠方場へのコヒーレント散乱を行う (a)。デバイスのシミュレーションによる電界分布 ($|E|$) にはレーザの端面から散乱された波と閉じ込められた表面波が明瞭に観測される。このシミュレーション面はレーザファセットに垂直で、レーザ導波路の対称面に沿っている (b)。(資料提供: ナンファン・ユー氏/ハーバード大学)

れ、小さなテラヘルツ光源の実現が可能になるという点において重要である。

テラヘルツ放射には光ではなくマイクロ波のように振舞う難しさがある。米カリフォルニア大学ロサンゼルス校のベンジャミン・ウィリアムス氏 (Benjamin Williams) は、「テラヘルツ QCL に使われることの多い導波路は、マイクロ波線路のような構造で通常の光ファイバとは異なり、その上面と下面が金属層で構成されている」と語っている。この導波路はテラヘルツ波長に比べると非常に薄いため、テラヘルツ放射の発散角は大きく、180°の広がりになる。

新しい技術を用いると、放射をより狭い角度に閉じ込めることが可能になる。昨年、スイス連邦技術研究所のフェイスト氏のグループは、導波路に沿って3次導波路を形成するとテラヘルツ波の屈折が起こり、出力ビームの発散角が10°に収まることを証明した⁽⁴⁾。

今年の夏、ハーバード大学のカッソ氏のグループは、出力面上にメタ材料層を作製し、QCLの100μmの放射が10°の円錐角に閉じ込められると報告した⁽⁵⁾。ドーパ量の多い半導体はテラヘルツ周波数において金属のように振舞うため、その表面をエッチングしてマイクロメートルサイズの溝アレイに加工すると、導波路の端面下にはサブ波長構造のメタ材料が形成される。このメタ材料とテラヘルツ放射は回折結合し、広い面積か

らの放射が10°の発散角に抑制される。

この論文の主執筆者を務めた博士研究員のナンファン・ユー氏 (Nanfang Yu) によると、撮像、爆薬検出、電波天文学用の局部発振器などに应用可能なテラヘルツ波は、送信、制御および集束の容易な指向性のあるビームが要求されることが多い。

将来展望

MIR QCLの実用的ないくつかの応用は、戦場における危険状態のリモートセンシングからIR防衛兵器までの軍用になると考えられる。民生分野への応用もそれほど遅れずに、化学物理のような科学分野が恩恵を受けるであろう⁽⁶⁾。ブロックエンジニアリング社のアーリック氏が指摘したように、QCLの分野でも数量の拡大が価格の低下を引き起こす半導体産業の経済学が成立し、既存の確立されたMIR技術との競合が可能になることは間違いない。また、QCLは他のレーザでは容易に実現できないスペクトル線を発生し、新しい可能性を開くことができる。

小型で指向性をもつテラヘルツ光源は、スペクトルの未利用領域を開拓するための貴重な手段になる。テラヘルツ技術はQCL以外の部品の開発にも多くの課題が残されている。しかし、QCLはさらに進歩し、天文学から国家防衛までの将来のテラヘルツシステムの中核部品になるであろう。

参考文献

- (1) J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho, Science, 264, 553(1994).
- (2) R. Köhler et al., "Terahertz semiconductor-heterostructure laser," Nature, 417, 156-159(2002).
- (3) B. Williams, "Terahertz quantum cascade lasers," Nature Photonics, 1, 517-525(September 2007).
- (4) M.I. Amanti, M. Fischer, G. Scalari, M. Beck, J. Faist, "Low-divergence single-mode," (doi:10.1038/nphoton.2009.168).
- (5) N. Yu et al., Nature Mat., 9, 730-735 (September 2010; doi:10.1038/NMAT2822).
- (6) R.F. Curl et al., "Quantum cascade lasers in chemical physics," Chem. Phys. Lett., 487, 1-18 (February 2010).

編集者の注記

量子カスケードレーザは2011 Lasers & Photonics Marketplace Seminarの技術フォーラムのパネルディスカッションにおいて詳細な議論が行われる。www.marketplaceseminar.comを参照されたい。