アプリケーションの広がりが予想されるテラヘルツ技術

井上　憲人

現在、LTEの次、第５世代移動体通信（５G）関連のニュースが増えている。５Gは、一般紙でも取り上げられているので、ここでは触れないことにして、最近ニュースが増えたテラヘルツ（THz）技術に注目してみよう。

テラヘルツ技術は、国内外で開発が進んでおり、国内では東京大、理化学研究所（理研）などが最新成果を発表している。これらは、それぞれのWebサイトで見ることができるので、ここでは、QCLレーザとTHzアプリケーションの両方に関して、海外の動向の一端を見ておくことにする。

1. 極低温冷却不要のテラヘルツ技術
これは、TECで動作する量子カスケードレーザ（QCL）技術
2. デュアルチップスケールコムでTHzハイパースペクトルイメージング
3. テラヘルツイメージング、木の表面下の虫害を暴く

極低温冷却不要のテラヘルツ技術

スイス連邦工科大チューリッヒ校量子エレクトロニクス研究所（Institute for Quantum Electronics, ETH Zurich）のジェローム・ファイスト教授（Jérôme Faist）グループは、極低温冷却なしで動作するテラヘルツ量子カスケードレーザ（QCL）を初めて実現した。この偉業は、実用的なアプリケーションで、このデバイスの利用普及を告げるものである。

物理学部の研究グループは、温度210K（-63°C）で動作するTHz量子カスケードレーザの実現を報告した。それは、このタイプのデバイスでこれまでに達成した最高動作温度である。さらに重要なことは、初めて、そのようなデバイスの動作が、極低温冷却を必要としない温度領域で実証されたことである。極低温冷却ではなく、研究チームは、熱電冷却（TEC）を使用した。TECは、極低温冷却装置と比べると、はるかにコンパクトで安価であり、維持が簡単である。この前進により研究チームは、さまざまな実用的アプリケーションへの主要な障害を取り除いた。

アプリケーションへのカスケード

量子カスケードレーザ（QCL）は、THzデバイスの自然な概念として以前から確立されていた。可視光から赤外周波数域の光源として広く利用されている多くのレーザと同様に、QCLは半導体材料ベースである。しかし、利用されている一般的な半導体レーザと比べると、QCLは、根本的に異なるコンセプトにしたがい動作し発光する。簡単に言うと、QCLは、精密設計の半導体構造の反復的スタックの周りに構築されている（**図1**のパネルc）。これは、適切な電子遷移が、その中で起こるように設計されている（図1のパネルd）。

QCLは1971年に提案されたが、それをファイスト教授らが実証したのは1994年。さらに米ベル研究所で研究を続けた。このアプローチは、基礎と応用の両方において幅広い実験でその価値を証明した、主に赤外領域である。THz放出に向けたQCLの開発も、2001年から始まって、大きな進歩を遂げた。しかし、極低温冷却は、一般に液体ヘリウムが必要なため、普及は遅れた。液体ヘリウムは、非常に複雑でコストがかかるため、デバイスは大きくなり、移動性が低下する。より高温で動作するTHz QCLへの前進は、7年前に基本的に止まった。その時点で、200K（-73°C）でデバイス動作が達成されていた。

障害を克服

200K到達は、素晴らしい偉業だった。しかし、その温度は、極低温冷却技術が熱電冷却（TEC）で置き換えられる基準をわずかに下回っている。その記録的な温度が2012年以来動かなかったということは、ある種の「心理的障壁」が上昇し始めていたということであった。その分野の多くの人々は、THz QCLは常に極低温冷却とともに動作させなければならないことを受け入れ始めた。ETHのチームは、今回、その障壁を破壊した。Applied Physics Lettersに発表したように、チームは、最高210Kの温度で動作する、熱電冷却THz QCLを報告した。さらに、放出されたレーザ光は、室温ディテクタで計測できるほど強力であった。つまり、セットアップ全体は、極低温冷却なしで動作し、実用的なアプリケーションの可能性をさらに強化するものである。

ボスコ氏（Bosco）、フランキー氏（Franckié）などの研究チームは、2つの関連する成果により、「冷却障壁」を取り除くことができた。まず、QCLスタックの設計で、できるだけ簡素なユニット構造を採用した。これは周期ごとに2つの量子井戸をベースにしている（図1のdパネル）。このアプローチは、より高い動作温度へのルートとして知られているが、同時にこの2井戸デザインは、半導体構造の形状の非常に小さな変化にも大きな影響を受ける。1つのパラメータに関連したパフォーマンス最適化は、もう1つに関連した劣化につながる。系統的実験最適化は実行可能な選択肢ではないので、研究チームは数値モデリングに頼らざるを得なかった。

これは、研究グループか大きく前進した第2のエリアである。最近の成果で、グループは、非平衡グリーン関数モデル（Green's function model）として知られるアプローチを使い、複雑な実験的QCLデバイスの正確なシミュレーションを立証した。強力なコンピュータクラスタでの計算が必要であったが、計算は極めて効率的であるので、系統的に最適設計を探すために利用できる。正確にデバイスの特性を予測し、また正確な仕様にしたがってデバイスを製造するグループの能力は、TECで達成できる温度で一貫して機能する一連のレーザを実現するツールになった。また、そのアプローチは、決して枯渇することはないので、動作温度をさらに上げる考えが、グループにあり、暫定的な成果は極めて有望である。

THzギャップを埋める

極低温冷却なしで動作するテラヘルツ量子カスケードレーザの最初の実証は、「THzギャップ」を埋めるための重要な一歩を構成する。THzギャップは、成熟技術、マイクロ波と赤外放射の間に以前から存在していた。可動パーツも循環液も関係なく、ETH物理学者が紹介したTEC THz QCLは、専門研究所の外に、より容易に適用し、維持することができる。

デュアルチップスケールコムでTHzハイパースペクトルイメージング

米プリンストン大（Princeton University）の研究チームは、THz量子カスケードレーザをベースにした、チップスケール周波数コムでハイパースペクトルイメージングを実証した。デュアルコムは、フリーランニングであり、帯域220GHz、3.4THz ～ 10μW per lineをカバーするコヒーレントTHz放射である。デュアルコム分光計とモノリシックデザイン、拡張性、チップスケールコムの組合せは、生体医療や生産産業の今後のイメージンクアプリケーションに訴求性が高い[1]。

薬品製造ラインで迅速に分子を計測でき、患者の皮膚の組織を分類できるポータブルスキャナ開発に向けて、プリンストン大主導の研究チームが、マ

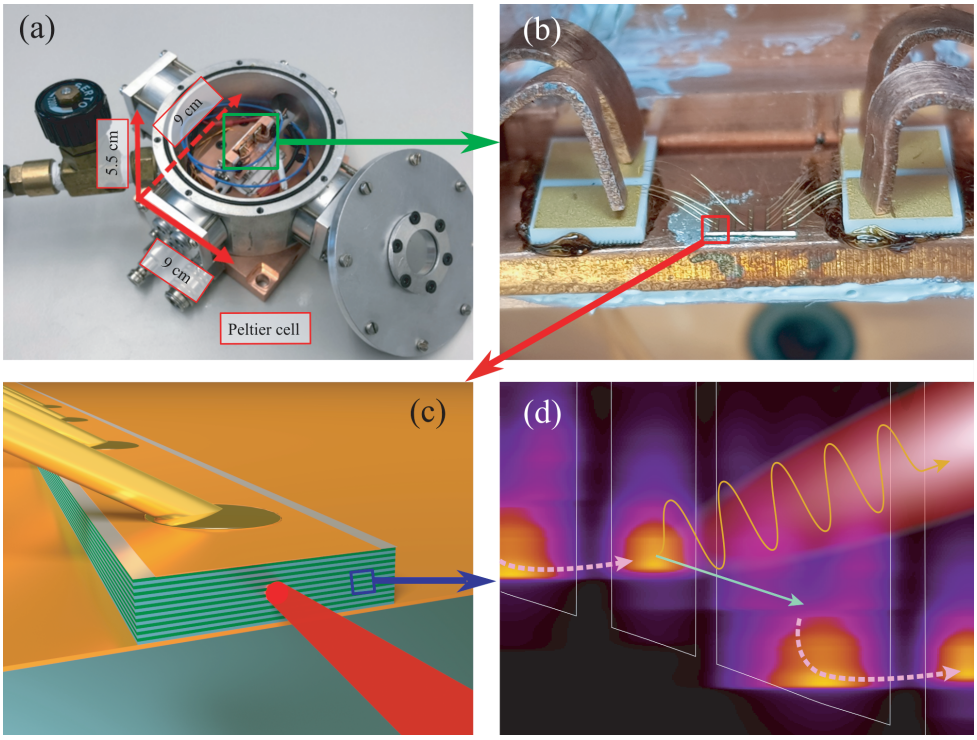

図1　熱電冷却されたTHz量子カスケードレーザ。（a）熱電冷却されたレーザボックス、レーザはペルチェ素子（白□）の上にマウントされており、195K ～ 210.5Kの間で動作が可能。レーザはトップリッドのウインドウから放射。（b）レーザボックスにマウントされたレーザチップは、複数のレーザリッジの上部に接続された細い金線で接続されている。（c）1つのレーザリッジの概略図、水平な線は階層化された半導体により形成された量子井戸構造を示している。リッジ（150μm幅）は、薄い銅層に挟まれている。（d）導電帯エッジ（白い線）は印加動作バイアスによって傾斜しており、電子密度は色で示されたエネルギーに分解。電気バイアスが、点線で示された非放射遷移を通して電子を動かしている。これが、薄い井戸の状態を励起し、緑の矢で示された広い井戸の状態よりも多くなるので、THzフォトンのネット誘導放出が可能になる。（提供：ETH Zurich/D-PHYS、ファイスト教授グループ）

イクロチップに組み込める小型で効率のよいレーザを使うイメージングシステムを開発した。

研究チームは、US25セント硬貨（クォーター）撮像にそれを使い同システムの解像度を実証した。1mm幅の1/5程度、ワシの翼の羽のような微小部分がはっきりと見えた。

同システムは、テラヘルツ周波数で電磁波を放出、検出する。テラヘルツ放射を使うイメージングは、以前からエンジニアの目標であったが、この周波数範囲で動作する実用的なシステムの開発の難しさが、ほとんどのアプリケーションを遅らせ、「THzギャップ」と呼ばれるものとなった。

プリンストン大気工学准教授で研究チームのリーダーの一人、ジェラード・ウィソッキー氏（Gerard Wysocki）によると、「可動部分がなく、半導体チップからの直接テラヘルツ放射を利用する画期的な技術が開発された」。

THz放射は、布地、プラスチックなどを透過することができ、非電離であり、したがって医療用にも安全である。他の周波数ではイメージングが難しい材料も見るために利用できる。可能性として、皮膚ガンの診断ツールとして利用できる。それとともに、例えば、金属をイメージングする能力を適用して、飛行中に物体に当たった後の損傷を調べるために、航空機の翼のテストもできる。

Opticaに発表されたその新システムは、分子の組成と配列を素早くプローブしたり、材料に対する構造的損傷を明らかにする[1]。

デバイスは、正確な周波数で安定した放射ビームを利用している。セットアップは、周波数コムと呼ばれているが、これは、おのおのが十分に定義された周異なる波数を放射する多重「ティース（櫛の歯）」を含んでいるためである。その照射は、サンプル材料の分子と相互作用する。デュアルコム構造により、その測定器は、反射された放射を効率的に計測できる。反射された照射の固有パターン、つまりスペクトルシグネチャにより研究者は、サンプルの分子の性質を確定できる。

現在のテラヘルツイメージング技術は、製造が高価であり、扱いにくいが、それ対して、新しいシステムは、低コストで、1秒あたりに多くの画像を生成できる半導体設計に基づいている。この高速性により製造ラインでの薬剤錠剤のリアルタイム品質制御ができ、他の高速用途にも使える。

概念実証として研究チームは、薬剤に共通の不活性成分を含む3つのゾーンをもつ錠剤を作った、グルコース、ラクトース、ヒスチジン。テラヘルツイメージングシステムは、各成分を同定し、それらの境界を明らかにした。1つの化学物質が異なるゾーンにあふれ出すいくつかのスポットも同様に明らかにした。このタイプの「ホットスポット」は、薬剤生産では、活性成分が正しく錠剤に混ざらない時に頻繁に起こる問題を示している。

その技術は、テラヘルツイメージングの産業および医療利用を以前よりも実現可能にするが、まだ低温却を必要としており、これは実用的アプリケーションでは大きな障害である。多くの研究者が現在、室温で動作する可能性のあるレーザに取り組んでいる。プリンストン大のチームは、そのデュアルコムハイパースペクトルイメージング術は、これらの新しい室温レーザ光源で良好に動作するようになると考えている。これにより、もっと多くの用途が開ける。

テラヘルツイメージング、木の表面下虫害を暴く

昆虫の侵入が、林業ではますますコストがかかる問題になってきている。

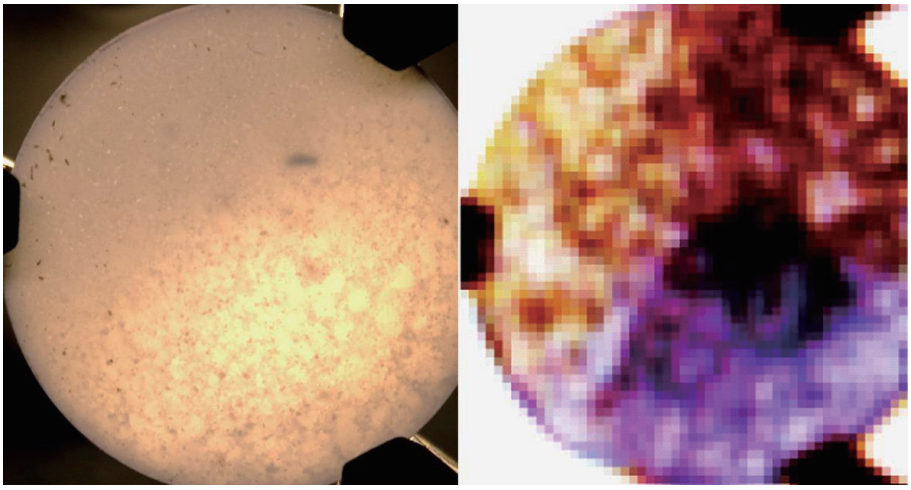

図2　研究チームの概念実証THzハイパースペクトルイメージングシステムは、非対称デュアルコム構成で使用される、一対の分散補償THz-QCL光周波数コムをベースにしている。同システムは、中心波長3.4THzで～220GHzスペクトルカバレッジ、各コムあたりの光出力が10μW以上。

新しいイメージング技術は、固体の化学成分を素早く計測する。従来のサンプルピル画像は左、右は同じ表面をTHz周波数で見ており、これによりさまざまな構成要素が多様な色で明らかになる。そのような画像は、医療診断だけでなく製薬で、品質制御や開発に役立つ。

特に気候の変化に関連して増加した干ばつや猛暑を経験するエリアでは顕著になってきている。新しいテラヘルツイメージング技術は、外側で見えるようになる前に木の内部の虫害を検出することで、こうした虫害の広がりを遅らせるのに役立つ。

独HAWK University of Applied Science and Artsの研究チームメンバー、カースティ・クリューゲナー氏（Kirsti Krügener）は、「われわれのアプローチを使って、木の幹で昆虫侵入を早期検出できる、また、輸入材、木製品でも昆虫の侵入を早期発見できる。他の国々から損害をもたらす昆虫が、森林に広がる前に阻止するのに役立つ」と説明している。

Applied Opticsに発表した論文[2]で、研究チームは、テラヘルツ飛行時間（TOF）断層撮影法を使って、他の方法では見えない昆虫（topographer beetle）の害を非侵襲的に木材サンプルで特定する方法を報告している。この甲虫は、ヨーロッパのトウヒや他の針葉樹に害を与えている。研究チームによると、木材サンプルの内部構造も再構築することができた。

「木を破壊する昆虫の掘削穴を見つけることは、一般に木を人手で検査して行われている。また、森林の感染エリアの除去も推定される。研究チームが知る限りでは、昆虫の掘削穴の検出に技術的な方法が用いられたのはこれが初めてである」と同氏は話している。

新しいアプローチをポータブル機器に組み込むことができると、森林の木々の個別評価が可能になり、虫害のある木だけを除去するようになる。その技術は、イメージングされるサンプルに損傷を与えないので、ミイラの研究にも役立ち、芸術品の研究や保存、あるいは産業の品質制御にも役立つ。

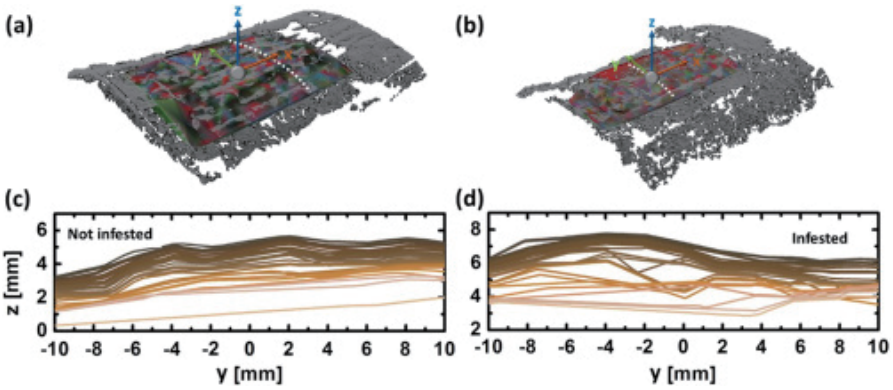

図3　テラヘルツトモグラフィアプローチを使い、虫害を受けた木のサンプル（a）と虫害を受けていない木（b）の表面モデルを示した。下の横断面は、（a）と（b）の白い点線でマークした領域。

表面下の観察

テラヘルツ飛行時間（TOF）断層イメージングは、木材サンプルの各界面がテラヘルツ照射の一定量を反射する点で超音波計測のように機能する。その反射光が、時間依存順序で検出、解析される。昆虫が作った個々の表面下トネルは、THz照射が反射される新たな界面になる。「虫害を受けたサンプルは、虫害のないものよりもTHz放射の反射が多い。界面は、非常に少ないからである。加えて、個々の反射THz信号を使って、虫害を受けた木の内部構造が可視化されるように、全エリアの画像を形成できる」と同氏は説明している。

その表面の向こう

THz TOFトモグラフィは、ほぼ20年前から使用されてきたが、最近までは、平坦なサンプルに適用できただけである。2年前研究チームは、任意形状のサンプルを点毎にスキャンするロボットアームを使う新しい手順を開発した。エミッタ-レシーバヘッドはサンプル面に垂直に、所定の距離を維持する。

研究チームは、その方法を既知と未知の構造、両方を持つ木材サンプルのイメージングに適用した。チームは、その結果を従来の断層撮影技術と比較し、THz信号から再構築された内部構造が、X線、コンピュータトモグラフィで達成できるものに匹敵することを確認した。チームは、木の表面下1cmまでトポグラファビートルの巣を発見することで虫害サンプルと害を受けていないサンプルの区別できた。

「THz計測の深さ分解能は、自由来のX線技術よりも高く、micro-CTに匹敵する。しかし、micro-CTと違い、THzシステムは、どんなサイズのサンプルでも使用可能である」とクリューゲナー氏は話している。

研究チームは、現在、計測とデータ分析のスピード改善に取り組んでいる。また、その方法を虫害木材検出に、より実用的にするためにもっと複雑なデータ解析の開発にも取り組んでいる。さらにフィールドで使えるようなポータブル計測の開発も考えている。

参考文献

（1）"Terahertz hyperspectral imaging with dual chip-scale combs" by Lukasz A. Sterczewski.

（2）K. Krügener, E.-M. Stübling, R. Jachim, B. Kietz, M. Koch, W. Viöl, "THz tomography for detecting damages on wood caused by insects," Applied Optics, 58, 22, 6063-6066（2019）. DOI: https://doi.org/10.1364/AO.58.006063

LFWJ