

広い波長可変性を持つ 前例なきテラヘルツレーザ

ヴァレリー・コフィ・ロズィヒ

量子カスケード励起レーザを用いると、広帯域にチューナブルな新しいクラスのコンパクトなテラヘルツ光源が実現する。

何十年もの間、室温で動作できる強力なコンパクトなテラヘルツ光源を生成する研究が挑戦されてきた。0.3～10THzのテラヘルツ周波数でコヒーレントなレーザを発振させると、プラスチックや繊維などの素材を傷つけずに安全に通過させ、金属や液体の水を検出できるため、分光、イメージング(画像化)、セキュリティ、レーダなどの用途に理想的である。

テラヘルツ光源は少々存在し、ある種のスタンドオフ検出やイメージングへの応用が可能である。しかし、そのような光源はかさばり、省電力性に欠け、低温動作が必要とされるため、テラヘルツ無線通信や波長可変レーザには使用できない。さらに、波長可変性にも欠ける。

2019年、米ハーバード大ジョン・A・

ポールソン工学・応用科学スクール(SEAS)の研究にて、量子カスケードレーザ(QCL)による分子ガスの励起が効率的であることが発見された。それは省電力と室温動作という長年のトレードオフを克服し、広帯域テラヘルツ波長で波長可変性を実現するものである⁽¹⁾。この新しいクラスのテラヘルツ光源のメカニズムは、亜酸化窒素やフッ化メチルなどのさまざまな気体分子の回転・振動の遷移を励起するものである⁽²⁾。

ハーバード大SEASのCapassoグループが率いる複数の研究機関のチームは、最新の研究にて、QCLポンプを用いたアンモニアの発光を予測し、実証した。アンモニアQPMLが、純粋反転(PI)と回転反転(RI)という2つの発振メカニズムを実現し、この発見

を導き出した。

実験装置は、50cm×4.8mmの細長い銅管の共振器で、前方・後方のピンホールに検出器を搭載している(図1)。ハーバード大のポール・シュヴァリエ助教授(Paul Chevalier)らは、米ディーアールエス・デイライト・ソリューションズ社(DRS Daylight Solutions)製の、920～1194cm⁻¹の中赤外域でチューナブルな外部(EC)共振器型QCLを用いて、アンモニア共振器の励起に成功した。後方チューニングミラーで共振器の長さを調整し、ゴーレイセル検出器で後方ピンホールから全領域のテラヘルツ周波数を収集した。前方のアンモニアガス吸収セルで、目的の回転・振動遷移のチューニングを監視した。

この実験では、アンモニアでRI遷移とPI遷移により予想される発振周波数を確定し、いずれも0.45mW以下の出力で適度な電力効率を実現した。さらに、共振器の前方に搭載したショ

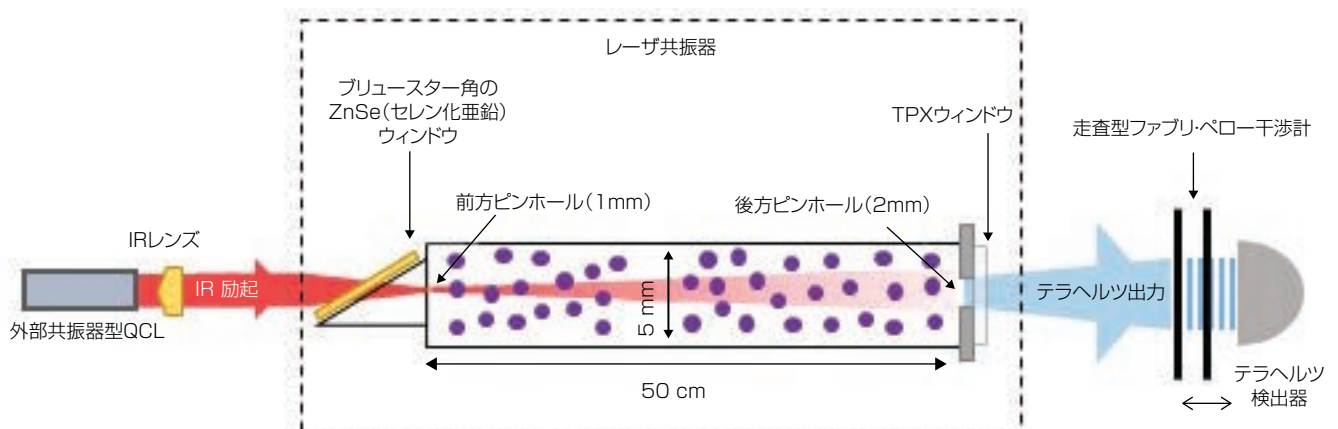


図1 コンパクトなアンモニアQPML(量子カスケードレーザ励起分子レーザ)の模式図。アンモニアを含む50cm×5mmの銅製レーザ共振器と両端のピンホールカプラ、920～1194cm⁻¹帯域でチューナブル(波長可変可能)な外部共振器型QCL(量子カスケードレーザ)を用いた励起を示す。このアンモニアQPMLレーザでは、0.763～4.459THzの帯域の24種類の異なるテラヘルツ周波数を、0.45mW以下の出力レベルで生成される。

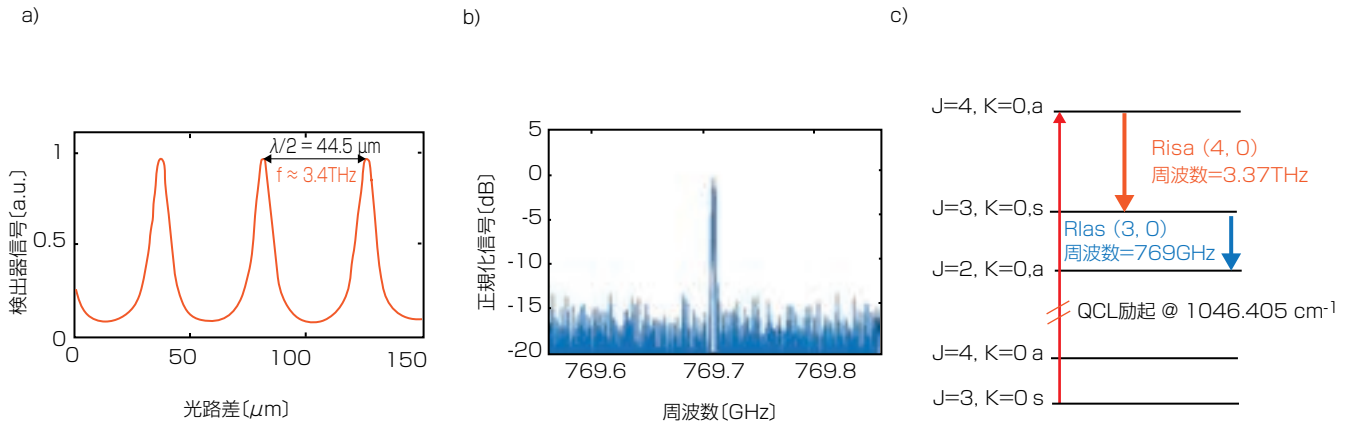


図2 (a)共振器後方の走査型ファブリ・ペロー干渉計によるインターフェログラム。レーザ発光周波数3.4THz(波長 $\lambda=89\mu\text{m}$)を測定している。(b)受信ミキサで、共振器前方からの予期せぬ同時レーザ発振周波数769GHz(0.769THz)を測定している。(c)QCL励起は 1046.4cm^{-1} であり、この驚くべき同時レーザ発光のメカニズムは、直接遷移とカスケードRI遷移である。

ットキーダイオード検出器で、多数の発光信号を検出できた。この驚異的な同時発振ピークは、励起回転状態の下のカスケード遷移から生じたものである。つまり、QCL励起分子レーザ(QPML)を用いると、アンモニアが3、4種類的大幅に異なる周波数を一度に発生させる可能性があることを示している。研究では、0.762~4.46THz帯域の34種類の発振遷移をすべて観測し、そのうち7種類は複数の励起経路に起因するものであることが明らかになった。アンモニアQPMLのマルチライン性質により、0.140~9.6THz帯域で数十のチューナブルな周波数が発生可能で、そのうち同時発生するものもある(図2)。

このプロジェクトの共同研究者は、ディーアルエス・デイライト・ソリューションズ社、デューク大、DEVCOM陸軍研究所であった。米陸軍がこの研究に関心を寄せる要因は何だろうか。アンモニアQPMLは、1km以下の距離には低周波で、100m程度の近距離には高周波で動作するタイプの可変距離レーダに使用できる可能性がある。このような可変周波数源では、例えば、

検出することも第三者が妨害することも不可能なレーダを生成される可能性がある。これは、戦場の兵士にとって有用な技術となる。

経験則として、1THz以上の周波数よりも、1THz未満またはそれに近い周波数のほうが、より長い大気伝搬に適している、とシュヴァリエ氏は述べている。つまり、高周波のQPML動作は、近距離の伝搬に特に有効なのである。「アンモニアQPMLは、有望な利得媒体であるのみならず、QPMLコンセプトの普遍性を示している。特に、短距離通信、レーダ、生物医学、イメージングなど、1THzを超える周波数に到達できる」と同氏は言う。アンモニアQPMLは、コンパクトに作ることができ、おそらくパン箱と同じくらい小さいので、持ち運びに便利で、将来的には商用化できるようになると考えられる。

同氏は、この技術を市場に参入させるための次のステップとして、光変換効率のさらなる向上と、コンパクトで操作が簡単なターンキーシステムの開発を挙げている。

SEASの応用物理学のロバート・L・

ウォレス教授(Robert L. Wallace)と、電気工学のVinton Hayes上級研究員で、QCLの共同発明者でもあるフェデリコ・カパッソ氏(Federico Capasso)は、次のように語っている。「コンパクトで室温動作する、広帯域にチューナブルなテラヘルツレーザは他にはない。私の研究室をはじめ多くのグループが、市販のQCLを用いて、室温動作する中赤外域の、広帯域にチューナブルなレーザを実現しようと何年も試みている。少々皮肉なことに、我々は同じ中赤外域QCLを用いて、広帯域にチューナブルな、コンパクトで、室温動作する、新しいクラスのテラヘルツレーザを生成した。従って、この開発は非常に重要なのである」。

参考文献

- (1) P. Chevalier et al., Appl. Phys. Lett., 120, 081108 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0079219>.
- (2) S. Cole Johnson, Laser Focus World, 58, 3, 14-17 (Mar. 2022); see www.laserfocusworld.com/14232942.

著者紹介

ヴァレリー・コフィ・ロズイッチは、Laser Focus World誌の寄稿記者。
e-mail: stellaredit@gmail.com. LFWJ