

高出力と多様化が際立つテラヘルツエミッタ

ダリッシュ・サイドキア

テラヘルツフォトンクスには2つのアプローチ—電気と光—があり、それぞれ固有の利点がある様々なタイプの光源が開発されてきた。

フォトンクス、エレクトロニクス、通信におけるテラヘルツ技術の前進は、新たな領域に入ってきた。今やトランジスタ機能はテラフリップ毎秒 (teraflop/s) を実現、ワイヤレスデータ通信はテラビット (Tbps) 速度に達しつつあり、テラバイトハードドライブ記憶装置も現実になっている。

過去20年にわたり学术界と産業界の両方でフォトンクスに関する積極的な研究開発が進められてきたことで、マイクロ波と赤外 (IR) スペクトラム間のテラヘルツギャップが埋められた。コヒーレントテラヘルツ信号の生成、検出、操作を目的とするコンパクトなテラヘルツ光源とディテクタが開発された。テラヘルツセンシングやイメージングシステムはすでに市販されており、テラヘルツ無線通信も実現が見通せるようになっている。

強力で信頼性の高いテラヘルツ光源を提供できるようになった最近のイノベーションによって科学と技術に新たな機会が訪れている。パフォーマンスや機能面での大きな前進はまだ期待できるが、現状の市販テラヘルツ光源はすでに、様々な分野の多くの研究者や技術者が利用できるテラヘルツスペクトラムを実現している。カバーする分野は生物学や医療から化学、薬学、環境科学などに広がり、これらの分野のユーザは、テラヘルツ波の下で科学的な諸問題を再検証することができる。

テラヘルツ光源技術分野における過去数年の進歩は、多くの実際的なアプ

リケーションでテラヘルツ照射利用の可能性に道を開いた。テラヘルツフォトコンダクティブ (光伝導) アンテナは、周波数1THz超の帯域で光-電気 (O/E) 変換効率や最大出力に関してパフォーマンスが大きく改善された。テラヘルツフォトコンダクティブアンテナ用に新しい材料システムが開発され、光通信波長で動作するようになった。ローコストのレーザーダイオードや高出力ファイバ増幅器、その他の光通信コンポーネントを活用することで今では、テラヘルツシステムのコストを大幅に削減することが可能になっている。

小型電子ビーム光源が開発され、周波数の上限や電力効率が高くなったことで個体光源や周波数通倍器のパフォーマンスが着実に改善されている。テラ

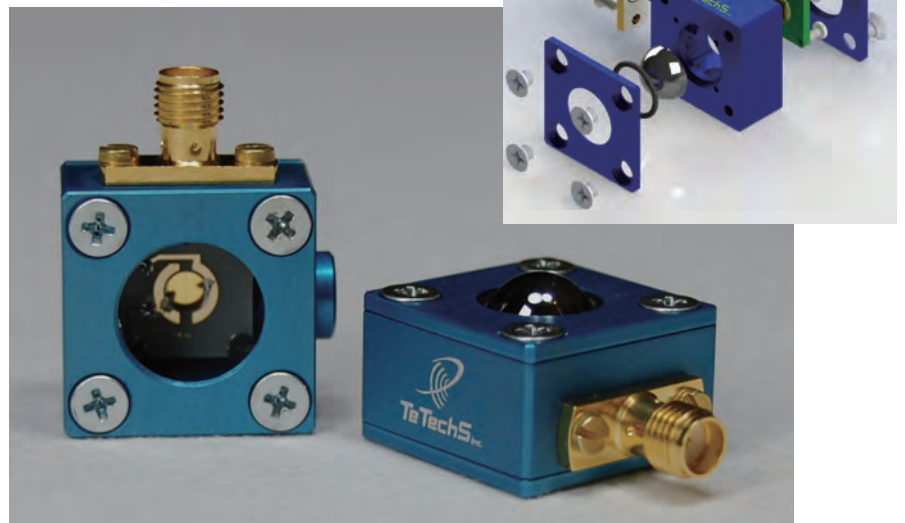
ヘルツ量子カスケードレーザ (QCL) は、過去数年で急速に改善された。その出力レベルや動作温度が改善される一方で、最小動作周波数は下がり続けている。

テラヘルツ光源は大きく分けて2つのカテゴリーがある、電気と光だ。周波数通倍器と電子ビームおよび個体光源は、広く使用されているテラヘルツ電子光源だ。テラヘルツフォトコンダクティブアンテナとテラヘルツ QCL が最も一般的なテラヘルツフォニック光源である。

テラヘルツフォトコンダクティブアンテナ

レーザー駆動 THz フォトコンダクティブアンテナ (THz-PCA) は、コヒーレントテラヘルツ光源である。これは、様々なテラヘルツアプリケーション向けに、

図1 TeTechSのT-Eraシリーズテラヘルツフォトコンダクティブアンテナはコリメートシリコンレンズを使って実装されており、用途はテラヘルツ分光器、イメージングアプリケーション。



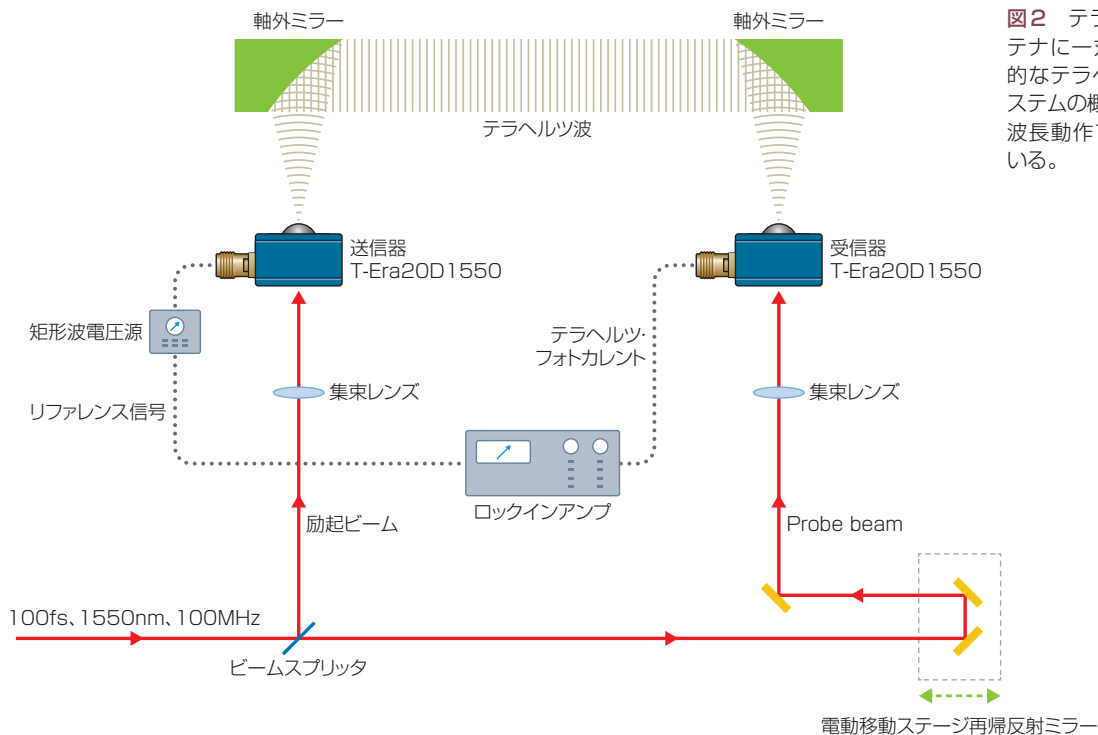


図2 テラヘルツ送信および受信アンテナに一对のTHz-PCAを用いた典型的なテラヘルツタイムドメイン計測システム概念図。ここでは、1550nm波長動作フェムト秒レーザーで駆動している。

コンパクトで低消費電力、高い耐久性、低コストの分光器やイメージングシステム開発で最も有望な候補となっている。アンテナを搭載したTHz-PCAは、密集した金属電極パターンに接続した平面金属アンテナ構造で構成されている。これらはアンテナの給電ポイントにある超高速フォトコンダクティブ材料に印刷されている。生成されたテラヘルツ信号はこのアンテナ構造に結合され、ここからテラヘルツ波が効率よく自由空間に放射される。スロットアンテナやダイポールアンテナのような共鳴構造の放射効率は相対的に高い。しかし、ワイドバンドアプリケーションには、ボウタイアンテナもしくは自己補対らせんアンテナの方が適している。

従来のアンテナ結合THz-PCAの光電気変換効率は、全光入射に対する全テラヘルツパワーの比で定義され、1個のデバイスで 10^{-5} 以下となる。1個のTHz-PCAデバイスからの最大利用テラヘルツパワーは、装置故障前の継

続維持可能な最大光パワーとDCバイアスで限界づけられている。低温成長ガリウムヒ素(LT-GaAs)のできた室温動作THz-PCAの継続維持可能な全光パワーは、バイアス $4V/\mu m$ の時、約 $0.9mW/\mu m^2$ になる⁽¹⁾。継続維持可能な最大光パワーは、LT-GaAsフィルムを、シリコンかダイヤモンドのような熱伝導性が高い基板に換える、あるいはLT-GaAs膜の下にアルミニウムヒ素(AlAs)のような熱拡散エピ層を成長することにより増やすことができる⁽²⁾。

低温成長GaAsは、800nm波長帯で動作するTHz-PCAで、超高速フォトコンダクタとして普及している。これは、サブピコ秒のキャリア寿命、高い破壊電界、相対的に高いキャリア移動度によるものだ。THz-PCAは、他の材料系を用いた開発にも成功している。例えば、1000nm帯の波長で使用する、GaAs半絶縁性基板上に低温成長した格子整合インジウム・ガリウム・ヒ素($In_{0.3}Ga_{0.7}As$)、1550nm動作を狙

ったインジウム・リン(InP)半絶縁性基板上に低温成長ベリリウム(Be)添加格子整合 $In_{0.53}Ga_{0.47}As-In_{0.52}Al_{0.48}As$ 多重量子井戸がある。

後者の材料系は、通信波長で動作するTHz-PCAに適したフォトコンダクティブ材料開発におけるブレイクスルーである。これは、オールファイバで、耐久性の高いテラヘルツセンサシステム開発に新たな機会を開くことになる。このようなシステムは、リアルタイムセンシング、イメージング能力を持つので、工業環境に導入できる。新しい $In_{0.53}Ga_{0.47}As-In_{0.52}Al_{0.48}As$ 多重量子井戸材料系をベースにしたTHz-PCA技術は、コンパクトな規定通りのシステムアーキテクチャで、全光ファイバレーザー光伝送システムを活用できる。

THz-PCAの連続波(CW)動作モードでは、テラヘルツ域で周波数の違う2つのCWレーザービームが、光ファイバ内もしくは空間で適切に重ね合わされ、光吸収媒体で混合されてビート周

波数信号を生成する。数kHzの線幅を持つテラヘルツ信号がTHz-PCAで生成可能である。テラヘルツ信号の周波数は、レーザの波長を調整することで変えられる。従来のTHz-PCAの光出力は、1THz約2 μ Wから、3THzでは0.1 μ Wに落ちる。

その他のテラヘルツ光源

量子カスケードレーザ(QCL)は、最も有望なテラヘルツ半導体レーザであり、伝導体もしくは価電子帯が複数のサブバンドに分割された単極性レーザである。キャリア遷移が起こるのは、同一バンド内の離散エネルギーレベル間である。複数の量子井戸を結合した半導体ヘテロ構造で、離散的なエネルギー準位ができる。2THzで出力10mWのQCLsがこれまでに実証されている。動作温度93Kが、3.2THzテラヘルツQCLとして報告されている⁽⁴⁾。

テラヘルツ信号は、光学結晶内の近IRフォトンと光振動モードのパラメトリック相互作用により生ずる。パルス幅3.6ns、平均出力9nW、周波数チューニングレンジ0.7~2.4THzの準連続発振(quasi-CW)テラヘルツ信号の生成が報告されている⁽⁵⁾。

テラヘルツ信号は、非線形結晶内で異なる周波数をミキシングすることでも生成できる。燐化ゲルマニウム亜鉛(ZnGeP₂)結晶で、パルス幅1nsの2波長イッテルビウム(Yb)ファイバレーザミキシングにより、2.45THzで平均出力2mWが生成された⁽⁶⁾。

テラヘルツ電子源

ジャイロトロン、自由電子レーザ、後進波発振器は、最も広く使われている電子ビーム源である。これらの動作は、高エネルギー電子ビームと、共振キャビティあるいは導波路内の強磁界

との相互作用がベースになっている。ここでは、電子ビームと電磁波間のエネルギー移転が生ずる。140GHz動作、1MWのジャイロトロンの開発が成功している⁽⁷⁾。後進波発振器は、300GHzで出力50mWが可能であり、1THzでは数mWとなる⁽⁸⁾。

固体光源の中では、周波数レンジ400~560GHzで数mWの出力が出せるガンデバイスが実用可能になっている。動作周波数355GHz、出力140 μ Wのトンネル注入走行時間効果(TUNNETT)ダイオードも報告されている⁽⁹⁾。

テラヘルツ周波数多重器では、駆動源の周波数が非線形デバイス内で多重され、高調波を発生する。プレーナシヨトキーバクタダイオード(PSVD)は、周波数多重器で一般に使用されている。これは、基板損失を減らすためにGaAs基板レスの技術を利用している。最も効率的なテラヘルツ多重器は、一連の周波数多重器、周波数3倍器で構成されている。2THzまでの信号は、周波数多重で得られる⁽¹⁰⁾。

テラヘルツシステム大量普及の主要な障害となっているのは、高い所有コストだ。現行の市販テラヘルツイメージングシステムは6桁ドルの値札をつけており、消費市場にも、また多くの

産業用途にも高価すぎる。安価なシリコンチップでテラヘルツ信号を発生するCMOSベーステラヘルツ源の開発が進めば、コンパクトで低コストのテラヘルツイメージングシステムが実現可能となる⁽¹¹⁾、⁽¹²⁾。

テラヘルツタイムドメインシステム

ブロードバンドテラヘルツパルスは、超高速レーザでTHz-PCAを励起して発生できる。100fs光パルス列、平均出力数100mWのフェムト秒レーザを用いて、周波数成分が5THzまでスケールし、平均出力数 μ Wのテラヘルツパルスが生成できる。周波数成分が5THzを超えるブロードバンドテラヘルツパルスの検出にも、フェムト秒レーザビームで駆動するTHz-PCAは使用できる。

フェムト秒短パルスレーザで駆動するTHz-PCAを用いたタイムドメインシステムは市販されており、物質のセンシングや品質制御などの産業アプリケーションで導入されている。室温コヒーレントタイムゲーティング検出技術を使用することでタイムドメインシステムは、他の室温テラヘルツイメージング、センシングアプローチと比べて、大きな信号対雑音比(SNR)、大きなダイナミックレンジを実現している。

参考文献

- (1) S. Verghese et al., Appl. Phys. Lett., 71, 19, 2743 (1997).
- (2) T. Ackemann et al., J. Appl. Phys., 112, 12, 123109 (2012).
- (3) M. Missous et al., IEEE Sensors Journal, 13, 1, 63 (2013).
- (4) S. Kumar et al., Appl. Phys. Lett., 84, 14, 2494 (2004).
- (5) K. Kawase et al., J. Phys. D, Appl. Phys., 34, R1 (2001).
- (6) D. Creeden et al., IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 13, 3, 732 (2007).
- (7) G. Dammertz et al., IEEE Trans. Plasma Sci., 30, 3, 808 (2002).
- (8) L.P. Schmidt et al., "THz measurement technologies and applications," Proc. 14th Int. Conf. Microwaves, Radar, and Wireless Commun., 2, 581 (2002).
- (9) H. Eisele, Electron. Lett., 41, 6, 55 (2005).
- (10) J. Ward et al., "Capability of THz sources based on Schottky diode frequency multiplier chains," Proc. IEEE Microwave Theory and Techniques Soc. Int. Microwave Symp. Dig., 3, 1587 (2004).
- (11) Y.M. Tousei et al., IEEE J. Solid-State Circuits, 47, 12, 3032 (2012).
- (12) K. Sengupta and A. Hajimiri, IEEE J. Solid-State Circuits, 47, 12, 3013 (2012).

著者紹介

ダリイシュ・サイドキア(Daryoosh Saeedkia)は TeTechS の社長/CEO、カナダ、オンタリオ州ウォータールー(295 Hagey Blvd, 1st Floor, Waterloo, ON N2L 6R5 Canada)