

# 光混合テラヘルツ光源を 効率化させるナノアンテナ

ヘンドリックス・タノート、テン・ジンファ、ステファン・A・マイヤー

ナノアンテナ構造をフォトミキサに組み込むことによって、相互くし型構造の汎用フォトミキサに比べて、テラヘルツ波の放射強度を2桁以上増大させることに成功した。

光混合技術を使ったテラヘルツ光源は、半導体レーザーとフォトニクス集積技術の進歩により、連続波(CW)放射、波長可変性、小型化の実現への見通しは明るい。しかし、効率の良い室温動作が実現できていないことが、いぜんとして小型のテラヘルツシステムの開発を阻む大きな技術的障害となっている。シンガポールの科学技術研究庁(A\*STAR)と英インペリアル・カレッジ・ロンドンの研究チームは、ナノアンテナ構造をフォトミキサに組み込むことにより、くし型電極を使った汎用テラヘルツフォトミキサに比べ、放射強度が2桁以上増大することを見出した。この新しいナノアンテナを組み込んだフォトミキサは、高解像度イメージングや分光システムに使われる、極めて高効率な小型CWテラヘルツ光源を実現する技術になり得る。

## なぜ光混合か？

テラヘルツ波を含む遠赤外(IR)電磁波の研究は、黒体放射のような研究をきっかけに20世紀初頭、実質的に開始された<sup>(1)</sup>。そしてここ20年の間に、一般および国家による凶器の持ち込みや巧妙な密輸活動といったセキュリティ問題に対する関心の強まり、超広帯域通信の必要性の増大、生物医学イメージングやバイオサイエンスの道具としての需要の増加などに刺激されて、テ

ラヘルツ波に対する科学的関心が復活した<sup>(2)</sup>。

最新のテラヘルツシステムは、特に、自然界に存在する材料を選んで半導体とすることによる集積回路とオプトエレクトロニクスの著しい発展を背景に、小型、高効率で手ごろな価格になると期待される。オーストンスイッチに基づくパルステラヘルツ光源は最初の実用半導体テラヘルツ光源の1つである<sup>(3)</sup>。高パルスエネルギーのフェムト秒レーザーで励起されたそのような光源は最大でミリワットレベルの光を出力し、テラヘルツ時間領域分光やイメージングシステムに広く利用されている。現在、これらのシステムは、ニッチ用途、特に生物医学、調剤、食品産業などの非破壊検査に使用されている<sup>(4)</sup>。

残念ながら、フェムト秒レーザーペー

スのテラヘルツ時間領域システムの多くは可変同調性を欠き、高コストで大型である。低価格で、容易に入手できるCW半導体テラヘルツ光源を励起源とする、ポータブル、低価格、波長可変、そして高スペクトル分解能のテラヘルツシステムが望ましい。

半導体CWテラヘルツ光源の開発において最もエキサイティングな技術の1つは量子カスケードレーザー(QCL)であり、これは、従来の半導体レーザーのような電子正孔対によるバンド間遷移の代わりに、半導体多量子井戸(MQW)構造の繰り返しスタックにおける単極キャリアとバンド内遷移を利用する<sup>(5)</sup>。

QCLの発振波長はMQW構造のバンド内エネルギー準位を調整することによって決まるので、もはや構成半導体のバンドギャップエネルギーで完全に決定することはできない。しかし、特に、低テラヘルツ領域での動作で光子エネルギーが下がると、電子の熱エネルギーが優勢になり、低温冷却が不

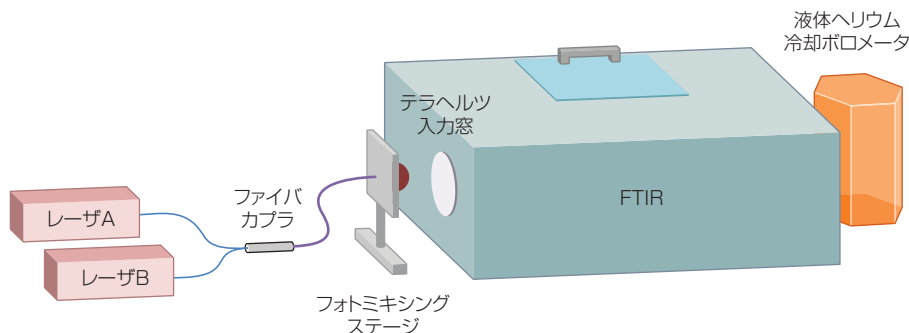


図1 光混合セットアップの図は、光伝導性デバイス内にキャリアを生成させるための光ポンプとして使われる光ファイバに結合された小さなオフセット周波数を持つ2台のレーザーを示す。発生したAC電流は平面金属アンテナを駆動し、テラヘルツ波を真空フーリエ変換赤外分光(FTIR)システムの入力窓へと放射させる。最終的に、液体ヘリウムで冷却されたポロメータを使ってテラヘルツ波を検出する。

可欠になる。いくつかの新しいQCL構造、例えば散乱支援設計は163Kでの1.8THz動作が可能であったが、低テラヘルツ領域でのQCLの室温動作の実現はいぜんとして厳しい課題として残される<sup>(6)</sup>。共鳴トンネルダイオード技術を使った半導体電子素子は最高1.1THzで動作可能であったが、達成された最大放射強度はたった100nWであった<sup>(7)</sup>。

適切な出力レベルと高解像度同調で室温CWテラヘルツ放射を発生させる有望な技術は光混合である<sup>(8)</sup>。半導体レーザとフォトニクス集積技術の進歩と、最近のテラヘルツメタ材料研究の急激な増加によって、テラヘルツ波を制御して動作させるための多くの新しい方式が提供された<sup>(9)</sup>。

われわれの光混合実験装置では、特定のテラヘルツオフセット周波数を持つ2つの波長可変レーザを光ポンプとして使用した(図1)。これらのレーザをフォトミキサの活性領域に集光させて、光伝導性材料内にキャリアを生成した。続いて、外部から電場を印加して、これらのキャリアを電極フィンガへとドリフト移動させ、テラヘルツ周波数で振動する電流を発生させた。この電流が平面金属アンテナを励起し、テラヘルツ波が放射された。この過程では、フォトミキサのキャリア生成領域(活性領域)内のキャリア捕獲効率が放射されるテラヘルツ波パワーに影響する最も重要な因子の1つである。

一般的な最先端CWテラヘルツフォトミキサの活性領域は元来金属-半導体-金属フォトダイオードに使用されているくし型電極フィンガからなる。そのような電極配置においてキャリア捕獲効率を改善しようとする、電極フィンガ間隔とキャリア生成強度とのトレードオフに直面するはずだ。

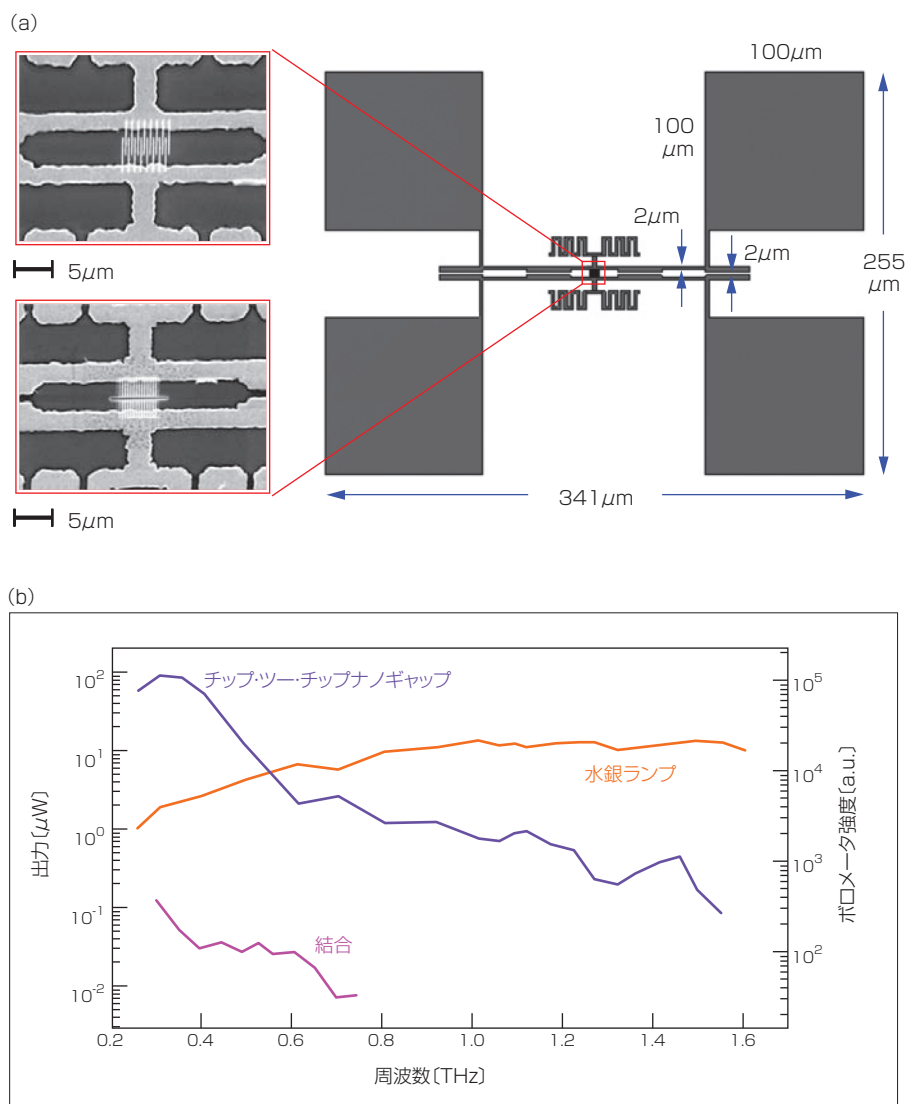


図2 走査電子顕微鏡(SEM)画像(a)はテラヘルツフォトミキサ装置(右)内のくし型電極(左上)とチップ・ツー・チップナノギャップ電極(左下)を持つ活性領域を示している。このフォトミキサの出力が水銀ランプを基準として用いてプロットされている(b)。

### ナノギャップ電極構造

われわれが開発した活性領域構造は、1チップをもう1つのチップからたった100nmのギャップで分離するチップ・ツー・チップ(Tip-to-Tip)配置のユニークなナノサイズ金属電極から成り、これが本質的にテラヘルツ放射パワーを増強するナノアンテナとして機能する<sup>(10)</sup>。われわれは、この目的に適した特性、すなわちサブピコ秒のキャリア寿命、高抵抗、高いキャリア移動度を表す低温成長ヒ化ガリウム(LT GaAs)材

料を使ってフォトミキサを組み立てた。

汎用フォトリソグラフィ処理を使ってマイクロアンテナ構造の形を決定し、電子ビームリソグラフィ技術を使ってナノギャップ電極の活性領域を決定した。続いて、電子ビーム金属蒸着と金属リフトオフを行い、くし型電極とチップ・ツー・チップナノギャップ電極をもつフォトミキサを創成した(図2)。

活性領域の電極フィンガの幅と間隔は100nmと300nmであり、それぞれくし型電極とチップ・ツー・チップナノ

ギャップ電極と同じである。両デバイスを、テラヘルツ放射用の改良メアンダテラヘルツアンテナを使用して、同様の条件の下でテストした。GaAs基板側から放出されたテラヘルツ波はシリコン超半球レンズに結合させ、液体ヘリウムで冷却されたシリコンポロメーター検出器付きの真空フーリエ変換赤外分光法 (FTIR) で測定した。

CWテラヘルツフォトミキサの出力を概算するために、われわれは水銀ランプ黒体パワー放出源を基準として使った。くし型電極とチップ・ツー・チップナノギャップ電極をもつフォトミキサの測定されたCWテラヘルツ放出は約1.3THzの帯域幅にわたってかなりの出力の増強を示した。この動作領域内で、チップ・ツー・チップナノギャップ電極をもつフォトミキサの出力はくし型電極だけをもつフォトミキサの出力に比べて約2桁強く、放出帯域幅は2倍であった。

### テラヘルツパワー増強の源

差分時間領域 (FDTD) と独コンピュータ・シミュレーション・テクノロジー社 (CST) からの CST Microwave Studio シミュレーションソフトウェアを使って、1THzの平面波照射下におけるフォトミキサ内の電場 (近傍場) 分布を調べることによって、チップ・ツー・チップナノギャップ活性領域において強く増強された電場強度を観測した (図3)。このシミュレーションで使用された寸法は組み立てられたフォトミキサと同じであり、入射テラヘルツの平面波強度は両フォトミキサに対して1V/mを保った。

入射テラヘルツ平面波の電場をDCバイアス電場と同一方向のy軸に沿って整列させることによって、チップ・ツー・チップ電極内のテラヘルツ波電場は、くし型電極構造内のそれに比べて、

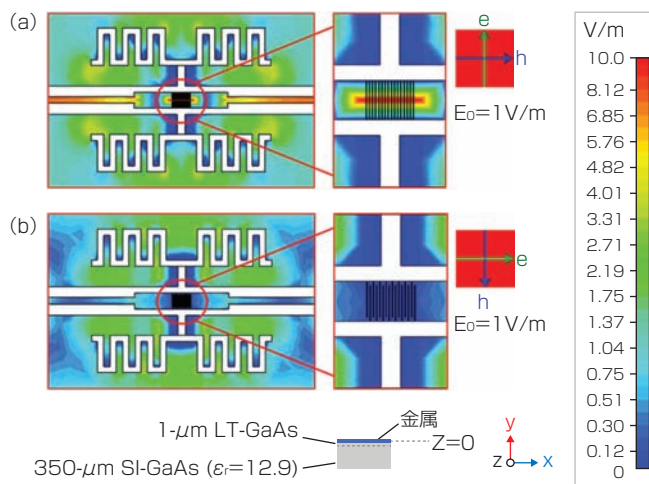


図3 1THzの平面波照明下でのフォトミキサのシミュレーションされた電場テラヘルツ分布を、(a)チップ・ツー・チップ電極活性領域を持つフォトミキサと(b)くし型電極活性領域をもつフォトミキサについて示している。挿入図はシミュレーションで使われた試料構造を示す。

約100倍強い透過率を示した。そうである以上、このフォトミキサの活性領域はナノアンテナとして作動していることになる。活性領域の電場をさらに強めることによって、テラヘルツアンテナによって放射された電場の強度も強まった。

逆に、くし型電極構造を持つフォトミキサはかなり低い電場振幅を示す。入射テラヘルツ平面波の電場をDCバイアス電場の主方向に平行である、x軸に沿って設定した。この配置でも増強は起きるが、この電場は放射されずに基板内にトラップされた。くし型電極構造は平行板コンデンサに類似するので、電磁エネルギーの大部分は、チ

ップ・ツー・チップナノギャップ電極構造に比べて、放射されずに蓄積される。

最終的に、スウェーデンCOMSOL社のCOMSOL Multiphysicsシミュレーションソフトウェアを使うことによって、チップ・ツー・チップナノギャップ電極の静電容量がくし型電極の静電容量の3分の1以下であることが明らかになった。この低い静電容量はRC時定数がかかなり低いことを意味し、これは、特に高いテラヘルツ周波数でのデバイス動作に有利である。測定されたテラヘルツパワーの特筆すべき増強の起源は、より強いテラヘルツアンテナ放射の蓄積効果とナノアンテナからの放射にある。

### 参考文献

- (1) E.D. Palik, J. Opt. Soc. Am., 67, 7, 857-865 (1977).
- (2) M. Tonouchi, Nat. Photon., 1, 97-105 (2007).
- (3) X.C. Zhang et al., J. Appl. Phys., 71, 326-338 (1992).
- (4) C. Jansen et al., Appl. Optics, 49, E48 (2010).
- (5) B.S. Williams, Nat. Photon., 1, 517-525 (2007).
- (6) S.Kumar et al., Nat. Phys., 7, 166-171 (2011).
- (7) M. Feiginov et al., Appl. Phys. Lett., 99, 233506 (2011).
- (8) E.R. Brown et al., Appl. Phys. Lett., 66, 285-287 (1995).
- (9) H. Tao et al., IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 17, 92-101 (2011).
- (10) H. Tanoto et al., Nat. Photon., 6, 121-126 (2012).

### 著者紹介

ヘンドリック・タノト (Hendrix Tanoto) はシンガポール科学技術研究庁 (A\*STAR) 物質材料工学研究所パターニング・製造・ケイバビリティチームの科学者であり、テン・ジンファ (Jing Hua Teng) はシニアサイエンティスト、メタマテリアルプログラムマネージャ、副リーダーを兼務する; e-mail: jh-teng@imre.a-star.edu.sg/www.imre.a-star.edu.sg. ステファン・A・マイヤー (Stefan A. Maier) はプラズモニクス・メタマテリアルセンターの共同ディレクターであり、インペリアル・カレッジ・ロンドンのナノフォトニクス教授である; www.3.imperial.ac.uk.