

# 光アンテナは光を一点に集め、ビームを方向付ける

ジェフ・ヘクト

光アンテナは、高周波と同様に、サブ波長スケールでエネルギーを集め、加熱、分光学的プロービング、光検出などの幅広いアプリケーション向けに吸収を強化できる。

エレクトロニクスでは無線アンテナが重要な役割を果たした。送信器で電気信号を電波に変換し、受信器で電波を電気信号に戻す。現在、フォトニックアプリケーションではアンテナは、ナノメートルスケールに縮小しつつある。

光アンテナは、無線アンテナと同じ電磁理論の原理に基づいている。振動する電荷が、アンテナ構造と共振周波数に基づいたパターンで電磁波をまとめて放射する。受信アンテナは入射波を吸収してそれを熱や振動電荷に変換する。しかし、原理は同じであるが、光アンテナの周波数は数十万倍高く、動作は重要な点で無線アンテナとは違っている。

これまで、ほとんどの光アンテナの動作は原理実証に集中していた、とスイス、チューリッヒ工科大学のパラシュ・バラトワジ (Palash Bharadwaj) 氏は言う。その結果は期待できるものであったが、技術的アプリケーションは遅れていた。正確に10nm以内で波長スケールのコンポーネントを作製しなければならなかったからだ<sup>(1)</sup>。

## 光アンテナの基本

電磁理論はシンプルに波長が基準となる。半世紀以上前、リチャード・ファインマン (Richard Feynman) は、アメリカ物理学会で「微細化には大いに可能性がある」と話した時、ナノスケー

ルのアンテナを頭に描いていた。ファインマンは、100~1000nmの回路から小さなアンテナアレイが立つかどうかを考えていた。「例えば、アンテナ全体から光を発することが可能だろうか、ちょうど一連のアンテナから無線を放射してヨーロッパにラジオ番組を提供するようなことが、光で可能だろうか。非常に高い強度で一定の方向に光を発射すると考えても同じことだ」と同氏は言っていた<sup>(2)</sup>。

しかし、ファインマンは、光周波数に対する材料の応答が、無線に対する応答と著しく違うことを認識していなかった。導体内の電流は、無線アンテナ

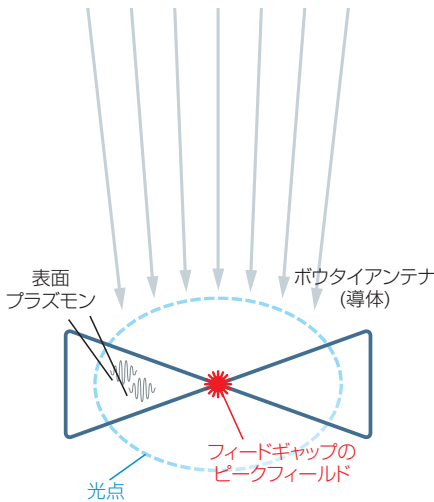


図1 光は、光「ボウタイ」アンテナを照射し、表面プラズモンを励起する。表面プラズモンは、アンテナの2つのポール間の「フィードギャップ」においてピーク電界を生成する。このギャップは、光の波長よりも遙かに小さな領域。

ナに必要なギガヘルツ (GHz) レートで簡単に変化させることはできるが、その動作は光波に必要な数100テラヘルツ (THz) にはできない。光アンテナ内の振動電荷は、非常に高速で動く表面プラズモンであるが、光周波数では伝導性が低い。表面プラズモンは、無線アンテナよりも遙かに高い電子移動度を必要とする。したがって、光アンテナとして使えるものはほとんどなく、よく知られているものは銀と金である。

重要な点は、サブ波長アンテナの光励起は光波よりも遙かに小さな表面プラズモンを生成するという点だ、図1ではボウタイアンテナで示した。「それはすばらしいことだ、なぜならフォトン、可視光の波長と、本当のナノスケール材料とのサイズのミスマッチを補完できるからだ」とローレンスバークリー研究所分子ファウンドリ (カリフォルニア州バークリー) のディレクター、ジェイムズ・シャック (James Schuck) 氏は言う。光アンテナは、ビーム操作や指向性を含むアプリケーションで探求されている。

## 分光、加熱、高調波発生

多くの重要な潜在的アプリケーションは、光アンテナにエネルギーを集中させるものとなっている。「調べたいものに近づけて、レーザーを尖った金、銀チップに照射してみなさい、チップ先端の強化された電界が強いラマン応答を起こす」とバラトワジ氏は言う。そのチップは従来のアンテナのようには見えないかも知れないが、それは伝

搬する光エネルギーをサブ波長域に集中させるので、数10nmの分解能でカーボンナノチューブに欠陥をマップすることができる。その同じ技術が、分光バイオアッセイ(生物検定法)の感度を向上させることができる。

可視光は特に貴重なプローブである。なぜなら、それは化学結合や分子構造についての情報を集めるからだ、とシャック氏は言う。「構造を理解したいなら、最も簡単な方法は光フォトンでプローブすることだ」。ナノアンテナによって光は10nmの分解能を達成できるが、これはダイポール型アンテナを二等分した「フィードギャップ」のサイズである。ギャップにはアンテナ全体に吸収されたエネルギーが集中されている<sup>(3)</sup>。図2では、カンパニーレ(鐘楼)タイプのアンテナにどのようにエネルギーが集中されるかを示しているかを挿入図に示した。

そのようなギャップに集中している光は、高調波発生に必要な高い電界強度を作り出す。韓国KAISTの研究者は、そのアプローチを使ってピークパ

ワー 100kWの10fsパルスを集中して100倍にし、 $10^{13} \text{W}/\text{km}^2$ を達成した。これにより、そのギャップを狙ったアルゴンジェットで、47nm第17高調波を発生させた<sup>(4)</sup>。これは、コンパクトな光源からでも高調波の発生が可能になることを示している。

ナノアンテナは、光エネルギーを集中させて小さな領域を熱することもできる。米国のライス大学、ナオミ・ハラス(Naomi Halas)の研究グループは、水中の金ナノ粒子に共振波長を照射した。その粒子は周囲の水を気化させるほどの大量の熱を吸収し、ナノ粒子は蒸気泡の中に取り残された<sup>(5)</sup>。こうすると全部の液体を加熱して沸騰させる必要がなくなる。これは、ナノ粒子を吸収したガン細胞の破壊のような臨床応用につながる。

### アンテナと光検出

光アンテナは、半導体に取り付けると光検出強化にも使える。米国スタンフォード大学のマーク・ブロンガーズマの研究グループは、各端に1つはオー

ミック、もう1つはショットキー(金属-半導体)を取り付けることによって100ギガヘルツを超えて応答の共鳴ナノアンテナを作り、ゲルマニウムのナノワイヤの光応答を25倍以上高めた。このデザインのもう1つのメリットは、ナノワイヤの直径を変えることで、共鳴ピークを1300~1530nmまでシフトできたことだ、これは通信アプリケーションには魅力的である<sup>(6)</sup>。

ハラスのグループは違うアプローチをとった。光アンテナの表面プラズモンが崩壊して熱い電子-ホール対になるときに発生するエネルギーを捉える。研究グループは、nドープシリコンの表面に300の矩形の金ナノロッドアレイを製作し、2つの材料間にショットキー障壁を設けた。金ナノアンテナに発生した熱い電子は、ショットキー障壁を越え、シリコンに光電流を発生させることができるだけのエネルギーを持っていた。その波長応答は、ナノアンテナの共鳴に依存しており、半導体のバンドギャップを越えて広がる。研究グループの報告によると、量子効率は実験室のデ

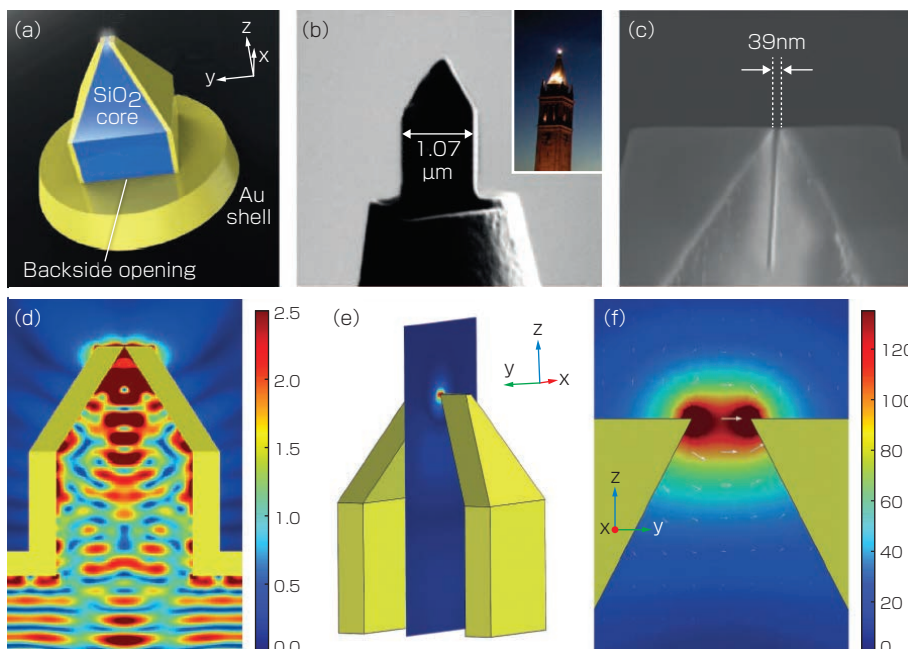
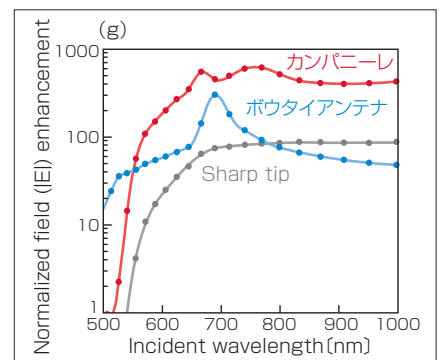


図2 より精巧なダイポールアンテナが、ボウタイと同じように中央のフィードギャップにパワーを集中している。このカンパニーレ型アンテナは、光エネルギーを10nmゾーンに集中させ、スタンフォードでプローブ計測した。



バイスでは約0.01%の範囲だったが、同グループは、1Vの逆バイスをかけ、作り方を改善することで量子効率を約2%に向上すると提案した。インジウムガリウムヒ素 (InGaAs) デテクタレンジに応答が伸びるシリコンベースのデバイスとして、ナノアンテナはシリコンフォトニクス、あるいはシリコン赤外イメージングシステムにとって魅力的なものになりうる<sup>(7)</sup>。

### トランスミッタ、ビーム成形、操作

原理的に、光アンテナは有機LED (OLED) など非効率のエミッタの効率を改善する。しかし、これまでのところ、放射ビームを成形、操作するための、無線アンテナの光アンテナフェーズドアレイ開発でのより大きな成功が報告されている。

1つのアプローチは、サブ波長間隔のフラットなプラズモニックアンテナアレイ、メタサーフェスを造ることである。これにより、散乱光の位相と偏向を変え、制御可能な方向、偏向、軌道角モーメントを持つビームが実現する。米国コロニア大学のナンファン・ユ (Nanfang Yu) 氏らは、実証研究「任意の方向に光を発するフェーズドアレイ、球面波を集束するフラットレンズ、超広帯域で動作する平面波長板、光渦巻きビームを生成する螺旋状の位相マスク」を引証している<sup>(8)</sup>。ナンファン・ユは以前、テラヘルツ量子カスケードレーザ (QCL) の出力を、180°から10°に狭くするためにサブ波長表面構造を使った<sup>(9)</sup>。

別のアプローチでは光を放射するたくさんの小さなアンテナのアレイが作製された。そこでは隣接エミッタ間で位相がシフトするようになっている。パッシブアレイは、一定方向に固定像あるいはビームを発射する。個々のエミッタのアクティブ位相シフトがビーム操作を可

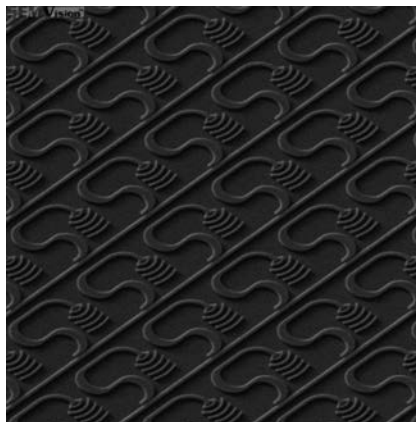


図3 MITで開発された64×64素子光トランスミッタアレイの一部。導波路面を組み合わせ「MIT」という文字を映し出すようにしている。直線がアレイの個々の螺旋素子に光を供給する導波路(MIT, Jie Sun提供)。

能にする。多くのアプリケーションでアクティブビーム操作が好まれるが、従来の光カプラや位相シフトを使っていると素子をコンパクトにパッケージすることはできない。こうした素子は波長の何万倍もの長さになるからだ。

MITのマイケル・ワッツ (Michael Watts) 氏の研究グループは、光を供給する導波路や放射するアンテナをCMOSシリコンで作製することでそのような制限を克服した。作製したのはパッシブな64×64素子アレイで、アレイの片側を走る単一の導波路が、入力光を列状の第2の導波路列に分ける。その導波路の各々が1つの列に沿ってあるアンテナに光を分割する。図3は、このアレイの一部を示している。8×8素子の操作可能なアレイを造るために、研

究グループはシリコンの電気接点を追加し、熱を導波路に加えて熱光学効果を使うことでアクティブに位相を変えられるようにした<sup>(10)</sup>。

### 展望

概念実証でもはすばらしい結果を生み出したが、光アンテナの実用的なアプリケーションはほとんどなく、あっても稀である。シャックの弁によると、エネルギーのホットスポットを10nmの小さな領域に集中できることは光イメージングや分光プローブにとって魅力的である。小さな容積で光場を強化できることは超高感度検出にとって魅力的である、例えば毒が危険な濃度に達する前を見つけるようなことだ。長期的な可能性としてはガン細胞に集中的に送り込めるナノアンテナを開発し、そこでガン細胞を殺せるだけのエネルギーを選択的に吸収するようにする。シャックもバラドゥワジも、新しい世代の超高密度ハードドライブとして熱アシスト磁気記録を光アンテナの非常に有望なアプリケーションと見ている。

長期的には他にも多くのアプリケーションが可能かもしれない、例えばビーム操作でチップ状の光信号を切り替えるようなことだ。ファイマンが言うように、微細化には数々の可能性がある。しかし、そのような構想を実用的な現実のものに変えるためにはなすべきことは多い。

### 参考文献

- (1) P. Bharadwaj, B. Deutsch, and L. Novotny, *Adv. Opt. Photon.*, 1, 438-483 (2009); doi:10.1364/aop.1.000438.
- (2) R. Feynman, "There's plenty of room at the bottom," *Eng. Sci.*, 23, 5, 22 (May 1960).
- (3) W. Bao et al., *Science*, 338, 1317 (2012); doi:10.1126/science.1227977.
- (4) S. Kim et al., *Nature*, 453, 757 (June 5, 2008); doi:10.1038/nature07012.
- (5) Z. Fang et al., *Nano Lett.*, 13, 1736-1742 (2013).
- (6) L. Cao et al., *Nano Lett.*, 10, 4, 1229-1233 (2010); doi:10.1021/nl9037278.
- (7) M. W. Knight et al., *Science*, 332, 702 (2011); doi:10.1126/science.1203056.
- (8) N. Yu et al., *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 19, 3, 4700423 (May/June 2013); doi:10.1109/jstqe.2013.2241399.
- (9) N. Yu et al., *Nat. Mater.*, doi:10.1038/nmat2822 (Aug. 8, 2010).
- (10) J. Sun et al., *Nature*, 493, 195-199 (Jan. 10, 2013); doi:10.1038/nature11727.