

単極性テラヘルツ波 エミッタの量子コンピューティングへの 新たな一歩

サリー・コール・ジョンソン

単極性テラヘルツ波エミッタ(放射源)は事実上、従来のコンピューティングを加速させ、室温での量子情報処理を実現し得る。

米ミシガン大と独レーゲンスブルク大を中心とする研究チームは、光波の固有の対称性をうまく利用して、「不可能な」単極性テラヘルツ波エミッタを構築した。このエミッタで、さらに非対称なテラヘルツパルスが実現し、半導体量子ビットを制御するよう調整できるようになる。

「コンピュータから携帯電話に至るまでのアプリケーションは、1秒間に約10億回という非常に高速なスイッチングを行う電子機器で動作している」と、ミシガン大の電気工学及びコンピュータサイエンスのマッキージョ・キラ教授(Mackillo Kira)は言う。「しかし、固体中の電子量子情報は、通常、1万倍の速さで失われるため、これまでのところ、日常の電子機器では、量子情報処理の真の力を利用できなかった」。

電子スイッチング固有の遅さについては、非常に高速な電磁波を使用して電子量子状態を切り替え、特性評価し、制御することで克服できる。

光波は電子機器の約100万倍の速度で振動し、次世代装置はペタヘルツ級(毎秒最大1000兆回)に到達する可能性がある。このような背景から、理想的な量子電子スイッチパルスは、正(または負)のみの半周期振動で、最小の時間(半周期)と最大の効率(往復振動がない)で量子状態(量子ビット)

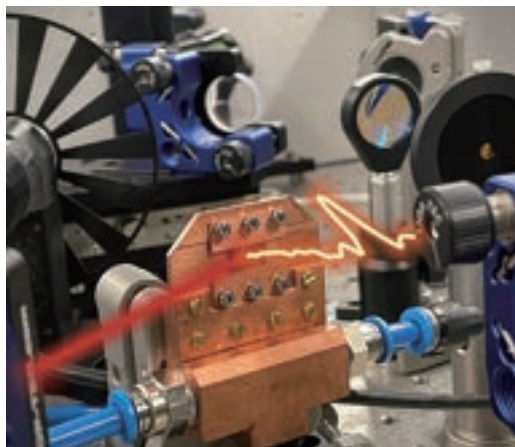


図1 フェムト秒赤外線レーザーパルス(赤色のビーム)で励起すると、水冷銅製マウントの量子井戸エミッタは、ほぼ単極性のテラヘルツ波形(オレンジ色)を生成する。(画像提供: 独レーゲンスブルク大 クリスチャン・マイネケ氏 [Christian Meineke])

を反転させるものである。

テラヘルツ光は、赤外線(IR)とマイクロ波(MR)の中間に位置し、必要な速度で振動をする一方で、その波形はこれまでは「不可能な」問題であった。純粋に正または負のみの波は、物理的にあり得ない。すべての波は、正と負の振動の和がゼロになるように構成されている。

レーゲンスブルク大物理学のルパート・フーバー教授(Rupert Huber)は次のように述べている。「我々は長い間、この波形の制限を回避する方法を見つけ、最終的にペタヘルツ光波エレクトロニクスを駆動できる最短の波形を作りたいと考えてきた。この志は、非常に鋭い高振幅の正の光波のピークが、2つの長い低振幅の負のピークに挟まれている単極性波の発見につながった。

正のピークは電子状態を切り替えたり移動させたりするほどの強度を持つが、負のピークはほとんど影響を及ぼさない」。

テラヘルツエミッタの構築

研究ではまず、わずか数原子薄のナノ薄膜のスタックの開発から着手した。これは、インジウムガリウムヒ素(InGaAs)などの異なる半導体材料を、ガリウムヒ素アンチモン(GaAsSb)上にエピタキシャル成長させたものである。

電子と正孔の動きを利用して、テラヘルツ放射を設計した。電子と正孔は、基本的に、半導体中で電子が移動するときに見える空間である。

ナノ薄膜の界面では、超短赤外レーザーパルスが電子と正孔を励起して引き寄せ、単一電荷の振動が生成される(図1)。



図2 コンパクトなテラヘルツ波の生成・検出装置の概要。これを用いると、生成したパルスの電界波形をストロボスコープで正確に検出できる。(画像提供:独レーゲンスブルク大 クリスチャン・マイネケ氏)

「高速の充電振動とそれよりも低速の充電振動を組み合わせると単極性波を放出し(図2)、遠赤外スペクトル領域で効果的な半周期の光パルスとして調整した」と、キラ教授は述べる。「要するに、電子と正孔が放出するパルスの形状を制御するために、帯電と単電荷振動という2つの相反する効果を利用して、制御しているのだ。まず、超高速パルスによって超高速の電荷分離が起こり、その後に低速の単一電荷振動が起こる。これらは別々の物理プロセスであるため、調整して持続時間の異なる単極性パルスが生成されるというわけだ」。

大きな前進

光波とエレクトロニクスのシームレスな融合が実現すれば、デジタル情報技術や量子情報技術に全く新しい可能性と高速化がもたらされるだろう。

「我々が実証した単極性波源は、次世代エレクトロニクスや光波エレクトロニクスの構成要素になる可能性を秘めている」と、フーバー教授は言う。「また、次世代の超高速電子機器にとって、時計のような正確性も発揮するだろう」。

エレクトロニクスの次世代への可能

性のみならず、研究では、他の多くの予期せぬ用途にも、遠赤外分光領域とテラヘルツ分光領域の超短光パルスに高い需要があることが見出されている。

フーバー教授は次のように述べている。「テラヘルツ電界が効果的に単極化されると、今までにない量子材料を微視的電子運動の固有時間スケールで制御できる強力なツールとなる。さらに、この新しいエミッタは、最新の産業等級の高出力固体レーザーと組み合わせると動作させるのに最適であり、基礎科学と産業の両方に応用でき、非常にスケーラブルな製品の形成が可能になる」。

単極性テラヘルツ放射のメリット

その結果、驚くほど単極性のテラヘルツが放射され、唯一の正の半周期のピークは、2つの負の電界励起よりも約4倍高い(図3)。

フーバー教授は次のように述べている。「我々は、少ない発振周期で効果的に光パルスを生成する方法を長年研究してきたが、半発振周期以下の短いテラヘルツパルスの生成は、我々の大胆な夢さえ超えるものだった。この新しい設計のエミッタは互いに積み重ね

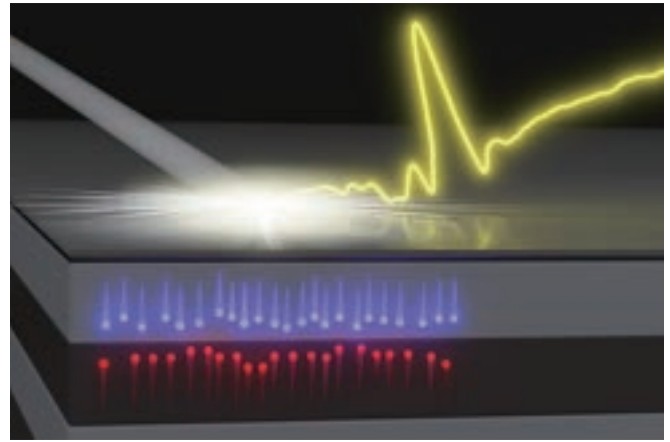


図3 フェムト秒赤外レーザーパルス(白色ビーム)が、界面(明暗の境界)を横切って電子(赤丸)と正孔(青丸)を分離する様子の模式図。電荷の振動が始まると、単極性のテラヘルツパルス(黄色)が発生する。

られ、エミッタの横方向の領域を広く拡張できるため、この新しい光源を高ピークのテラヘルツ電界強度に対応するようにも設計できる」。

光波は、その速度を100万倍に高め、室温での量子応用への扉を開くことによって、次世代エレクトロニクスに革命を起こそうとしている。「このような未来がすぐそこまで来ているというのは、本当に素晴らしいことだ」とキラ教授は言う。

数年前の研究では、光波で量子情報を反転させたが、現在では単極性パルスで極めて正確に行っている。次のハードルは、量子情報処理シーケンスを認識して完全に制御し、最終的には、このような量子イノベーションをチップに統合することである。

「我々は、このパルスを使用して、量子情報処理の新しいプラットフォームを開拓し始めた」と、キラ教授は言う。

さらに、このパルスを走査型トンネル顕微鏡に結合すると、「原子分解能の顕微鏡を数フェムト秒の時間スケールにまで高速化し、電子の実空間・実時間運動を実際の超低速顕微鏡映像でとらえられる」、とフーバー教授は付け加えている。