

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

完全位相制御テラヘルツ近接場による 超高速ナノ空間電子操作技術を開拓

～現代エレクトロニクスの限界を打破する極限的時空間で電子を操作～

本研究のポイント

- ・(世界初) トンネル接合部に任意の単一サイクルテラヘルツ近接場を創成
- ・(世界初) 1 nm かつフェムト秒 (10^{-15} s) の精度で自在に電子操作する技術を構築
- ・強光子場物理, 次世代超高速エレクトロニクスの発展に貢献

【研究概要】

横浜国立大学の吉岡克将 (博士後期課程 3 年・日本学術振興会特別研究員)、片山郁文准教授、嵐田雄介助教、伴篤彦 (博士前期課程 2 年)、武田淳教授、浜松ホトニクス株式会社中央研究所の河田陽一氏、高橋宏典氏、東京大学理学系研究科の小西邦昭助教のグループは、次世代エレクトロニクスの発展に不可欠な「高速化」と「微細化」の問題に新たな道筋をつける、超高速ナノ空間電子操作技術の開拓に成功しました。グループは、テラヘルツ走査型トンネル顕微鏡^[注 1]にテラヘルツ位相シフタ^[注 2]を組み込むことにより、探針・試料間のトンネル接合部に任意の単一サイクルテラヘルツ近接場を創り出すことに世界ではじめて成功しました。更に、1 nm のナノ空間かつフェムト秒 (10^{-15} s) の精度で、探針・試料間の電子を自在に操作できることを実証しました。この成果は、現代エレクトロニクスの限界を打破する超高速光ナノエレクトロニクス開発に新たな処方箋を提供するものです。また、探針・試料間の 100,000 倍に達する電場増強度を利用することにより、“強光子場物理”の学問分野に新しい扉を開くものです。

本研究成果は、2018 年 7 月 20 日に著名な米国化学会学術誌 Nano Letters 誌の on-line 版に掲載されました。尚、本研究は、一部、科学研究費補助金 (課題番号 16H04001, 16H06010, 18H04288)、日本学術振興会特別研究員奨励費 (17J05234) 及び総務省の SCOPE (#145003103) の補助を受け行われました。

<発表雑誌>

雑誌名 : Nano Letters

論文題目 : Tailoring Single-Cycle Near Field in a Tunnel Junction with Carrier-Envelope Phase-Controlled Terahertz Electric Fields

著者 : Katsumasa Yoshioka, Ikufumi Katayama*, Yusuke Arashida, Atsuhiko Ban, Yoichi Kawada, Kuniaki Konishi, Hironori Takahashi, and Jun Takeda*

(吉岡克将、片山郁文*、嵐田雄介、伴 篤彦、河田陽一、小西邦昭、高橋宏典、武田 淳*)

DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b02161

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学大学院工学研究院 知的構造の創生部門 教授 武田淳 准教授 片山郁文

電話番号 : 045-339-3953 E-mail : jun@ynu.ac.jp, katayama@ynu.ac.jp

完全位相制御テラヘルツ近接場による 超高速ナノ空間電子操作技術を開拓

～現代エレクトロニクスの限界を打破する極限的時空間で電子を操作～

【研究背景】

現代の情報技術は電子制御の「高速化」と「微細化」の推進により発展してきました。しかしながら、従来技術の延長には限界があり、高度情報化社会を支える電子制御技術の発展に陰りが見えつつあります^[注3]。近年、電子制御を飛躍的に高速化させる次世代の手法として、超短パルスレーザーや単一サイクル^[注4]のテラヘルツ (THz) 波のキャリア・エンベロープ位相 (以降, CEP) – 光・THz 波中の振動電場の位相 – を利用することが考案されました(図1参照)。これにより、光・THz 電場の振動周期よりもさらに短い究極の時間スケールで電子を操ることができるため、現代エレクトロニクスの限界を打破する超高速光エレクトロニクスの開発が可能になると考えられています。これまでに研究チームは、この超高速電子制御を光の回折限界を超えた超微細領域で行うことを目指し、金属ナノ構造体と THz 波の相互作用を利用した電子の伝導性の制御¹⁾、走査型トンネル顕微鏡 (STM) と高強度 THz 波を組み合わせた THz-STM によるトンネル電子の超高速制御²⁾とナノ空間イメージング³⁾に成功しました。特に、THz-STM を利用すると、フェムト秒かつナノ～原子スケールで固体試料表面や単分子の電子状態を追跡することができるため、世界中で精力的に研究が行われはじめています^{4,5)}。しかしながら、THz-STM の探針・試料からなるトンネル接合部と THz 波の相互作用は未解明であったため、トンネル電子を駆動する THz 波の近接場^[注5]の形状は、別途、電気光学的な計測をして得られた波形を仮定しており、その仮定の妥当性は一切検証されてきませんでした。また、探針・試料間に任意の近接場波形を創り出すことはできておらず、電子を超高速かつ微細空間で自在に操作する“処方箋”の構築はこれまで達成されていません。

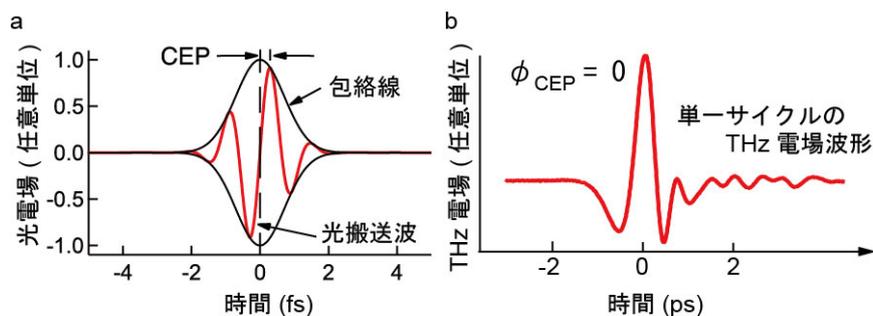


図1 (a) 超短パルスレーザー及び (b) THz 波のキャリア・エンベロープ位相 (CEP) の概念図. fs: フェムト秒 (10^{-15} s), ps: ピコ秒 (10^{-12} s). 光・THz 波中の振動電場の位相を CEP という. 電子は電場に追従して運動するため、高速で振動する電場波形の CEP を自在に操作することは、超高速電子操作にとって必須の要件である。

【研究内容と成果】

本研究では、広帯域 THz 位相シフタを THz-STM に組み込むことにより、はじめて THz 近接場波形のその場 (*in situ*) 観察を可能にしました。更に、THz 位相シフタの CEP を $0\sim 2\pi$ と連続的に調整することにより、探針形状に依らず、任意の単一サイクル THz 近接場を創り出すことに世界ではじめて成功しました。そして、実験結果と有限統合シミュレーションを比較することにより、THz 近接場波形が探針におけるマクロスコピックな電子の集団運動によって決定されることが分かりました。また、時間間隔を調整したダブルパルスの THz 近接場を用いることにより、探針・試料間に電流バーストを創り出し、そのタイミングや方向をフェムト秒の精度で制御し、直接計測できることを実証しました (図 2 参照)。この成果は、超高速かつ微細空間での電子制御技術に新たなプラットフォームを提供するものであり、次世代超高速ナノエレクトロニクス開発や強光子場物理の学問分野に新風を吹き込むものと期待されます。

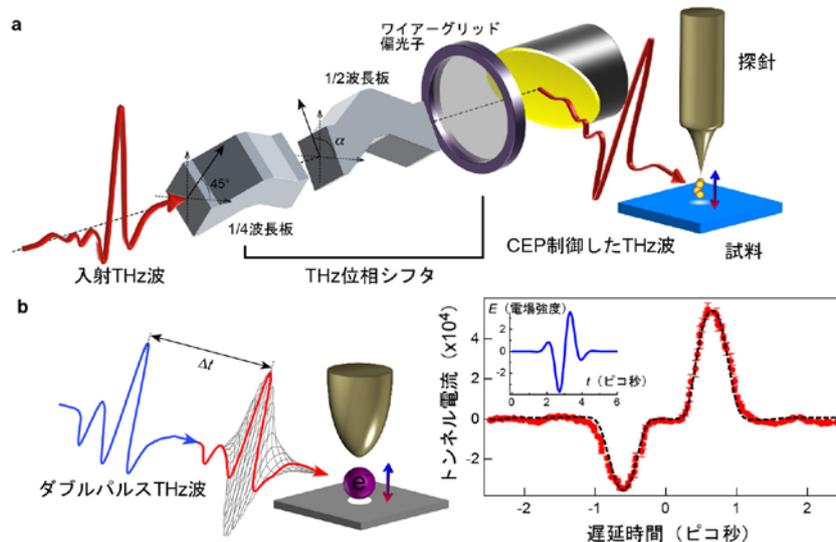


図 2 (a) 位相制御 THz-STM の概念図。(b) ダブルパルスの THz 近接場による電流バースト生成。サイン型近接場により、探針・試料間の両方向にサブピコ秒の電流バーストを生成できる。さらに、THz 近接場の CEP を精密に変調することで、電流バーストの方向やタイミングをフェムト秒の精度で自在に操ることができる。

【今後の展開】

我々が開発した位相制御 THz-STM は、通常の STM と同様、伝導性を持つあらゆる物質に適用可能です。また、超高真空中で動作させれば、原子スケールまで空間分解能をあげることができます。このため、例えば、超伝導体の超伝導ギャップや単分子の特定の電子軌道に選択的にアクセスし、それぞれのエネルギー状態に対する超高速の電子操作が可能となります。また、電場増強された高強度の THz 近接場を積極的に利用すれば、様々な物質の相転移、スピンドYNAMICS、化学反応を超高速かつ微細な空間で操作することが可能となるため、本成果を利用することで、これまでの物質科学の研究手法を別次元のフェーズに持っていけるものと期待されます。

【用語説明】

注1：走査型トンネル顕微鏡（STM）

鋭く尖った探針を導電性の物質表面に近づけ、流れるトンネル電流から原子レベルで表面の電子状態や構造を観測する装置。

注2：テラヘルツ位相シフタ

浜松ホトニクス社オリジナルの Si（シリコン）で作製した 1/4 波長板、1/2 波長板およびワイアードグリッド偏光子からなる光学素子。1/2 波長板を回転させることにより、THz 波の位相を $0\sim 2\pi$ ままで自由に調整できる。

注3：

例えば、2017 年に出荷を開始したインテル社の CPU（Central Processing Unit）「Kaby Lake」のプロセスルールは 14 nm、クロック周波数は ~ 4 GHz (250 ps) に達しているが、電子制御のさらなる微細化と高速化は困難になりつつある。

注4：（単一）サイクル

光パルスの中で電場が何回振動するかを表す量。図 1 右図は単一サイクル（1 サイクル）の振動電場に対応し、左図は数サイクルの振動電場に対応する。電子は電場に追従して運動するので、光パルス内の振動電場のサイクル数が少ない方が制御性が高く、1 サイクル内（サブサイクル）で制御するのが理想である。これは、単一サイクルパルスの CEP を精密に変調し、光パルスの電場が最も強くなるタイミングや方向を制御し、かつ電子が光の「強度」ではなく「電場」によってコヒーレントに駆動されるという状況を創り出すことによって達成される。

注5：近接場（光）

光の波長よりも極めて小さい開口部などで、局所的に存在する遠方に伝播しない特殊な光。THz-STM の場合、探針・試料間のナノ空間に局所的に存在し、回折限界を超えて波長よりも微細な構造 ($< \lambda/10,000$) を観察できる。

参考文献

- 1) K. Yoshioka, Y. Minami, K. Shudo, T. D. Dao, T. Nagao, M. Kitajima, J. Takeda, and I. Katayama, *Nano Lett.* **15**, 1036 (2015).
- 2) K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Minami, M. Kitajima, S. Yoshida, H. Shigekawa, and J. Takeda, *Nat. Photonics* **10**, 762 (2016).
- 3) J. Takeda, K. Yoshioka, Y. Minami, and I. Katayama, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 103001 (2018).
- 4) T. L. Cocker, D. Peller, P. Yu, J. Repp, and R. Huber, *Nature* **539**, 263 (2016).
- 5) V. Jelic, K. Iwaszczuk, P. H. Nguyen, C. Rathje, G. J. Hornig, H. M. Sharum, J. R. Hoffman, M. R. Freeman, and F. A. Hegmann, *Nat. Phys.* **13**, 591 (2017).