

## 位相制御したテラヘルツ波により、トンネル電子を ナノ空間で自在に制御することに成功 ～ナノスケールの超高速トランジスタの実証～

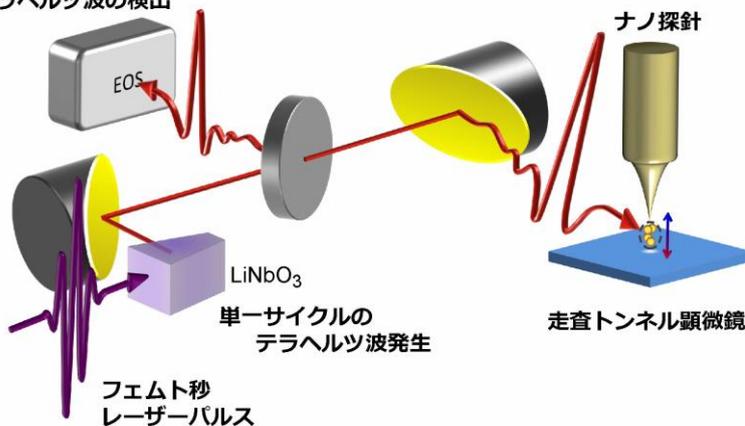
横浜国立大学大学院工学研究院・武田淳教授のグループと筑波大学数理物質系・重川秀実教授グループの研究チームは、位相制御した単一サイクルのテラヘルツ波[注1]を走査トンネル顕微鏡 (STM) [注2]の探針・グラファイト試料間の1ナノメートルのギャップに照射することにより、250フェムト秒[注3]という極短時間に数万～数10万個の電子を自在に探針・試料間で行き来させることに成功しました。これは、超高速で動作する1ナノメートルの極小トランジスタを実現したことに対応します。この成果は、次世代量子ナノデバイス、プラズモニックデバイス[注4]の進展に大きく貢献するものです。

本研究成果は、2016年11月7日（英国時間）に科学雑誌「Nature Photonics」のオンライン版に掲載されます。

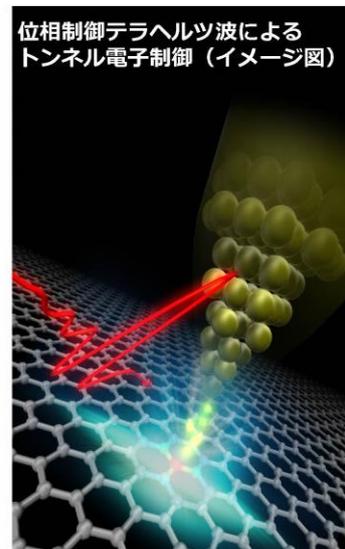
本研究は、科学研究費補助金（課題番号 15H05734, 16H03820, 16H04001, 16H06010）および総務省のSCOPE（#145003103）の補助を一部受けて行われました。

### 位相制御テラヘルツ STM の模式図とトンネル電子制御のイメージ図

電気光学効果 (EOS) による  
テラヘルツ波の検出



位相制御テラヘルツ波による  
トンネル電子制御 (イメージ図)



<掲載論文>

【題名】 Real-space coherent manipulation of electrons in a single tunnel junction by single-cycle terahertz electric fields

(単一サイクルテラヘルツ電場によるトンネル接合における電子の実空間コヒーレント操作)

【著者名】 吉岡克将, 片山郁文, 南康夫, 北島正弘, 吉田昭二, 重川秀実, 武田 淳

【掲載誌】 Nature Photonics

doi.org/10.1038/nphoton.2016.205

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 教授 武田 淳 准教授 片山郁文

筑波大学 数理物質系 教授 重川秀実

【研究の背景】

近年のめざましいレーザー技術の進展により、超短パルスフェムト秒レーザーの位相を精密に制御できるようになってきました。そして、位相制御した2,3サイクルの近赤外光パルスを用いて、様々なナノ構造体において電子の超高速コヒーレント制御<sup>[注5]</sup>が実現しつつあります。これらの研究成果は、ペタフロップス<sup>[注6]</sup>動作のコンピュータなど、次世代の超高速ナノエレクトロニクス開発に対する重要な要素技術となっています。一方、近赤外光パルスをナノ空間に集光すると、高い光子エネルギーの結果発生する大きな熱膨張によりナノ構造が容易に破壊されてしまうという問題がありました。

最近、強誘電体にフェムト秒レーザーを照射することにより、単一サイクルの高強度テラヘルツ波を発生させることができるようになりました。テラヘルツ波の光子エネルギーは近赤外光パルスのそれよりも3桁ほど低いため、テラヘルツ波を利用すれば、ナノ構造を破壊すること無く電子を超高速制御することが期待されます。一方、テラヘルツ波の位相を自在に制御する手法はこれまで開発されておらず、テラヘルツ波を用いた電子制御には限界がありました。

【研究内容と成果】

本研究では、幾何光学的手法を用いることにより、発生したコサイン型のテラヘルツ波の位相 ( $\phi=0$ ) を  $\phi=\pi/2$  (サイン型),  $\phi=\pi$  (反転したコサイン型) に変換することに成功しました。これらは、光路に1対の円筒形レンズあるいは球形レンズを挿入することにより簡単に実現できます。この位相制御したテラヘルツ波をSTMの探針と試料間の $\sim 1$ ナノメートルのギャップに照射することにより、電子移動を自在に制御することに成功しました。

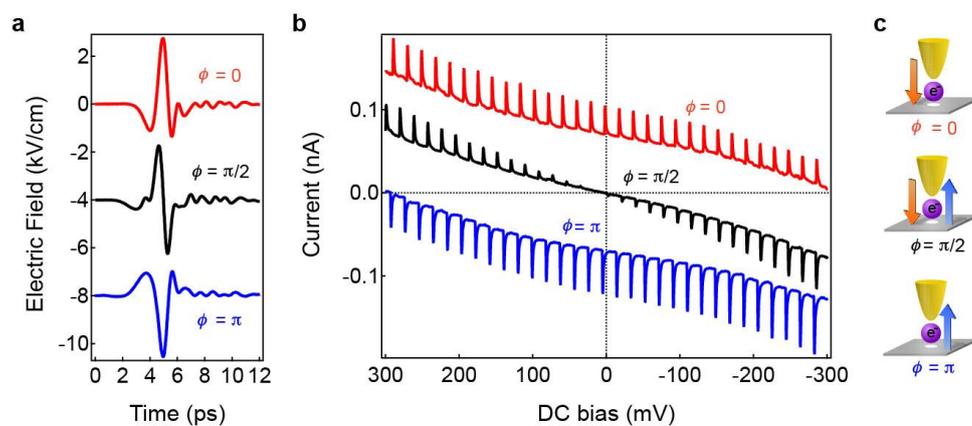
すなわち、コサイン型のテラヘルツ波を照射すると探針から試料へ、反転したコサイン型テラヘルツ波を照射すると試料から探針に電子は移動します。一方、サイン型を用いると、STM の直流電圧の符号を反転させるだけで何れの方にも電子は移動します。(参考図参照)

STM の探針増強により、入射したテラヘルツ波の電場強度は 100,000 倍にも増強されます。増強して得られた最大電場強度 ( $\sim 160 \text{ MV/cm} = \sim 16 \text{ V/nm}$ ) はこれまで報告されている最大強度よりも $\sim 2$  倍も大きいものです。単一サイクルの巨大な電場が、探針と試料間のポテンシャルを 250 フェムト秒 (=4 兆分の 1 秒) という極短時間で瞬間的に変調するため、数万 $\sim$ 数 10 万個という驚くほど多くの電子を所望の方向に一気に流すことができます。

### 【今後の展開】

本研究成果 一位相制御テラヘルツ STM— は、電子を超高速で制御する新規のプラットフォームを提供するものであり、将来のナノエレクトロニクス開発に新たな方向性を示したものです。更には、STM は原子分解能を持つことから、我々の開発した手法は、近い将来、「原子スケールかつ超高速で物質の持つ諸特性を自在に制御できる強力なツール」になるものと期待されます。

### 【参考図】



(a) 位相制御したテラヘルツ波 ( $\phi = 0, \phi = \pi/2, \phi = \pi$ ) の時間波形. (b) テラヘルツ波を照射した際の STM の電流—電圧特性. 楪上の信号がテラヘルツ波によって誘起された電流である. テラヘルツ波の位相が  $\phi = 0$  から  $\phi = \pi$  に反転すると、楪の向き (流れる電流の向き) も反転する.  $\phi = \pi/2$  の場合には、STM の直流電圧の符号の反転により流れる電流の向きを制御できる. (c) 探針・試料間の電子移動のイメージ図.

### 【用語説明】

注 1 : テラヘルツ波

光波と電波の中間領域の周波数 1 テラヘルツ (波長 300 マイクロメートル) 前後の電磁波。近年、超短パルスレーザーにより高強度のテラヘルツ波の発生が可能となった。

注 2 : 走査トンネル顕微鏡 (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 3 : フェムト秒

1 フェムト秒 =  $1 \times 10^{-15}$  秒。したがって、250 フェムト秒は 4 兆分の 1 秒。

注 4 : プラズモニックデバイス

プラズモン (金属中自由電子の集団運動) 共鳴を用いて金属ナノ構造体と光との相互作用を制御し、高感度センサー、ナノフォトニクス、生体イメージングなどの素子としたもの。

注 5 : コヒーレント制御

物質の諸特性を電磁波の位相によって制御すること。

注 6 : ペタフロップス

フロップスはコンピュータの性能指標の 1 つで、1 秒間に  $10^{15}$  (=1,000 兆) 回の浮動小数点数演算ができる能力を有することを示している。