

2019年11月26日

(報道発表資料)

日本電信電話株式会社
国立大学法人 東京工業大学

グラフェンと光ナノ導波路で超高速・低消費エネルギーの 全光スイッチングを実現

～超高速な光情報処理集積回路へ向けて前進～

日本電信電話株式会社(本社:東京都千代田区、代表取締役社長:澤田 純、以下 NTT)は、国立大学法人 東京工業大学(東京都目黒区、学長:益 一哉、以下 東工大)と共同で、ピコ秒(1兆分の1秒)以下の超高速領域で動作する全光スイッチを世界最小の消費エネルギーで実現しました。従来の全光スイッチ技術では、超高速性と低消費エネルギーを両立させることは困難であると考えられてきました。本研究グループでは、プラズモニック導波路^{*1}と呼ばれる幅と高さが数十ナノメートルサイズの光導波路に、非線形光学材料として近年注目されているグラフェン^{*2}を組み合わせることによって、超高速かつ低消費エネルギーで動作する全光スイッチを実現しました。達成した動作速度は電気を利用した光スイッチでは到達不可能な領域にあり、将来の超高速な光情報処理集積回路への応用が期待されます。また、本成果は極限的に小さな光導波路の実装を可能とするプラズモニック導波路技術の研究を更に深化させるものです。

本研究成果は、2019年11月25日(英国時間)に英国科学誌「*Nature Photonics*」のオンライン版で公開されました。

なお、本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費助成金の助成を受けて行われました。

【研究の背景】

将来の光情報処理集積回路実現に向けて重要な素子の一つに光スイッチがあります。光スイッチは光の信号を ON/OFF、もしくは光の行先を切り替えるものですが、その制御を電気で行うか光で行うかで、その原理的な速度限界が異なります。光で光信号を制御する全光スイッチでは処理を全て光で行うため、電気回路で遅延の原因になる RC 時定数^{*3}による制限を受けません。そのため、電気制御より高速に動作することが期待できます。しかし、従来の全光スイッチは、比較的大きなエネルギーを必要としてきました。光情報処理集積回路では、光素子が高密度集積されることが想定され、個々の素子の消費エネルギーを小さくしなければならいため、この問題は重要です。

図 1 に示すように、従来の全光スイッチでは、スイッチング時間の短縮と消費エネルギーの削減とを同時に達成することは困難でした。そのため、両者の間には越えられないトレードオフが存在するものと想定されてきました。しかし、NTT では 2010 年にフォトニック結晶共振器を用いて、この想定を打ち破り、超低消費エネルギーで動作する全光スイッチを実現することに成功しました。その一方で、電気制御では到達不可能なピコ秒以下の超高速スイッチングの領域では依然としてトレードオフを破ることはできない状態が継続していました。

【研究の成果】

今回 NTT と東工大は、プラズモニクス^{※4}の原理を応用した極めて小さなナノ光導波路と優れた非線形光特性を有するグラフェンとを結合させることで、ピコ秒以下の超高速領域で動作する全光スイッチを低消費エネルギーで実現することに成功しました(図 2 左)。本成果のポイントを下記に説明します。

[1] プラズモニック導波路によるグラフェンの光吸収と非線形光学効果^{※5}の増強

光で光信号を制御するには、光の通り道に配置した物質の特性を光によって変化させることが必要となりますが、この物質の応答速度がスイッチング時間を決める大きな要因となります。そこで、我々は非常に高速な非線形光学応答を示すグラフェンを採用しました。グラフェンは高速性だけでなく、広い波長域で高い吸収係数^{※6}を有し、非常に優れた非線形光学材料と期待されています。しかし、その一方で、厚さが単原子層分しかないため、効率的に光と相互作用させることが難しく、素子長が非常に長くなってしまい、その結果大きなエネルギー消費をもたらすという問題点がありました。我々は、本成果でプラズモニック導波路を用いて光をナノサイズの領域に強く閉じ込めることにより、グラフェンと光の相互作用を飛躍的に増強し、この問題を解決しました。

今回我々は、NTT が保有するナノ加工技術を用いて導波路コアの断面サイズが 30 nm×20 nm と非常に小さなプラズモニック導波路を作製し、この上面にグラフェンを貼りつけました(図 2 右)。その断面積は従来小型導波路として用いられてきたシリコン導波路に比べて 100 分の 1 程度であり、単一モード光ファイバと比べるとおよそ 10 万分の 1 にもなります。その結果、シリコン導波路にグラフェンを貼りつけた素子に比べ、グラフェンによる光吸収の効率が 1 桁向上し、非線形光学効果を引き起こすために必要なエネルギーを 4 桁低減することに成功しました。これは素子の小型化と省エネルギー化を同時にもたらしめます。

[2] 超高速全光スイッチングの実現

全光スイッチングでは、制御光によって信号光の ON/OFF を切り替えます(図 3 左)。本素子では、制御光がグラフェンにおける非線形光学効果を引き起こし、光吸収の度合を変化させることにより、信号光の ON/OFF 状態が制御されます。図 3 右は 35 fJ という光エネルギーで 260 fs のスイッチング時間が実現されていることを示しています。従来のグラフェンを用いた光スイッチング素子に比べて動作速度が 1 桁、消費エネルギーが 4 桁改善されています。また、図 1 に示されている

るように、本結果はピコ秒以下の超高速領域で他のあらゆる光スイッチの中で最も低消費エネルギー（従来の 1/100）の光スイッチとなっており、世界で初めてフェムト秒領域の応答時間でかつフェムトジュール領域の消費エネルギーで動作するスイッチを実現したことを意味します。更に、前述のトレードオフを決めるスイッチング時間とエネルギーの積に関しても従来記録の更新に成功しています。

【今後の展開】

NTTと東工大では、プロセッサチップ内に光のネットワークを導入することでエレクトロニクスにおける速度や消費エネルギーの限界を打破することに取り組んでいます。ここで示した全光スイッチは、電気制御では到達不可能な超高速なスイッチ動作を低消費エネルギーで実現しており、将来の光情報処理集積回路において超高速制御を担うことが期待されます。プラズモニクスの技術には損失等の課題があり、実用化にはまだ時間を要すると考えられてきましたが、本結果でナノサイズの物質と組み合わせることにより格段に優れた性能を発揮できることが示され、今後、ナノ物質の特性を活かした超高速光素子を実装するためのプラットフォームとしての活用が期待されます。ナノワイヤや二次元層状物質に代表されるナノ物質の研究は非常に活発であり、今後プラズモニック導波路がその応用のためのプラットフォームを提供することが期待されます。更に、計算機アーキテクチャ分野で光ニューラルネットワークの研究が非常に活発に進められていますが、本素子の動作はその活性化関数部にも組み込めるものと期待されます。今後は、全光スイッチの更なる高性能化に取り組むとともに、受光器等の他の光素子への応用、他のナノ物質への展開を進め、これまでにない優れた性能の光素子の実現をめざしていきます。

【技術のポイント】

【1】 グラフェンの超高速な非線形光学効果を利用

超高速な動作を実現するための非線形光学材料として、我々はグラフェンを用いました。グラフェンは可視から赤外までの広い波長領域で単層あたり 2.3%の光を吸収します。これを吸収係数として考えると、一般的な半導体に比べて極めて大きな値です。また、グラフェンは非線形光学効果の一つである可飽和吸収^{*7}を示し、その応答時間は最短で 100 fs 以下に達します。これはグラフェンキャリアの緩和が一般的な半導体に比べて非常に高速であることに起因します。今回提案した全光スイッチはグラフェン光吸収の飽和状態と非飽和状態を光励起によって切り替えることで透過率変化を引き起こし、それをスイッチの ON/OFF の状態として使用するというものです。そのため、超高速な全光スイッチを実現する上で上述の特長は非常に重要となります。

【2】 プラズモニクスによって光とグラフェンの相互作用を増強

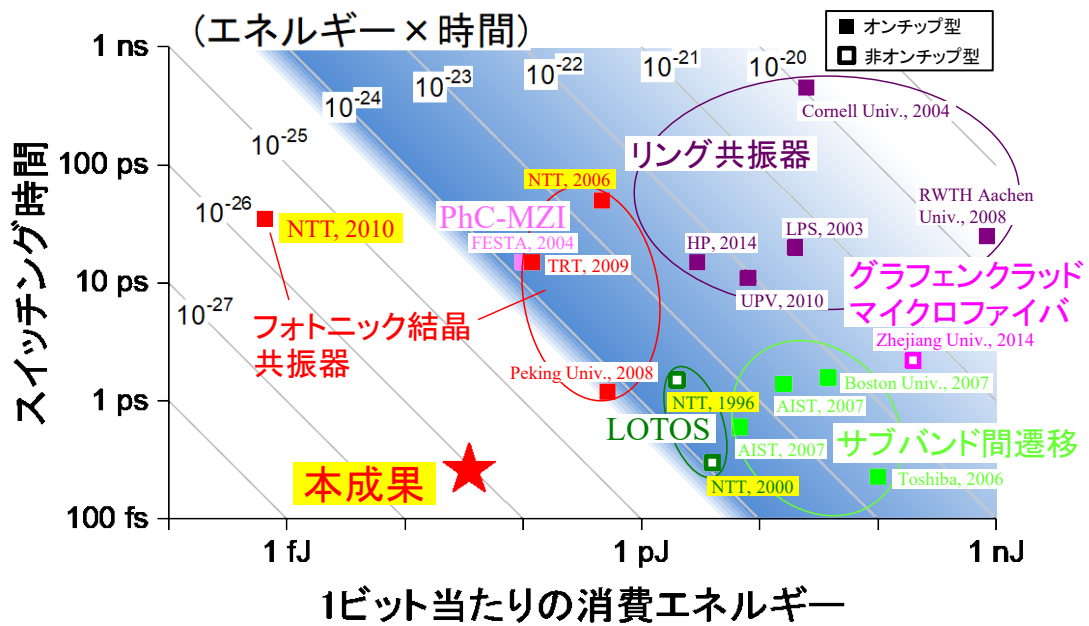
グラフェンは非常に優れた非線形光学材料ですが、光素子に応用するには薄すぎるという問題がありました。ここでは光とグラフェンの相互作用を大きく増強するため、数十ナノメートルサイズのプラズモニック導波路を利用しました。プラズモニック導波路は極限的な光閉じ込めを可能にし、

例えば導波路コアの断面サイズが $30\text{ nm} \times 20\text{ nm}$ の場合、閉じ込めの効果は $\lambda^2/4000$ (λ : 光の波長であり、 1550 nm を想定) に達します。一般的なシリコン導波路をプラットフォームとしたとき、光とグラフェンの重なりが小さいため相互作用は弱く、光吸収は $0.089\text{ dB}/\mu\text{m}$ ($1\text{ }\mu\text{m}$ あたりの 2% 程度) であると計算から予測されました (図 4)。これは光の透過強度を半分にするためには $30\text{ }\mu\text{m}$ 以上の素子が必要であることを示しています。一方、プラズモニック導波路型では $2.0\text{ dB}/\mu\text{m}$ ($1\text{ }\mu\text{m}$ あたりの 37% 程度) であり、劇的に光吸収が大きくなっていることを示しています。これによって、素子の短尺化が実現されます。また、プラズモニック導波路型では光の密度が圧倒的に高く、グラフェン位置での光強度はシリコン導波路型に比べて 310 倍にもなることが分かりました。こちらは、スイッチとしての動作エネルギーを劇的に低減することを可能にします。

これらの増強効果は実験的にも確認されました。導波路コアの断面サイズが $30\text{ nm} \times 20\text{ nm}$ の場合、 $1.7\text{ dB}/\mu\text{m}$ という大きな光吸収が得られました。一方、光強度の増強効果は可飽和吸収における飽和エネルギーの低減効果と読み替えることができます。実際に得られた飽和エネルギーは 12 fJ であり、シリコン導波路で報告されている値よりも 4 桁もの低減が確認されました。これは、光強度が 4 桁増強されたことを意味します。

[3] モード変換器でプラズモニクスの問題点を解決

プラズモニック導波路は極限的な光閉じ込めを可能にする一方で、大きな伝搬損失を持ち、サイズが波長よりも非常に小さいが故に光の入出力が困難であることが課題とされています。そこで我々は、プラズモニック導波路をグラフェンとの相互作用部にのみ用い、プラズモニックモード変換器 (図 5) によってシリコン等の低損失な誘電体導波路に結合させるという手法を取りました。本構造の作製には高い加工技術が必要となりますが、NTT では 2016 年、世界に先駆けて深サブ波長領域のプラズモニック導波路とシリコン導波路を結合させるプラズモニックモード変換器を報告しています。本技術は、光集積回路内においてプラズモニック導波路、そしてグラフェンの利点を最大限に活用することを可能にします。



PhC-MZI: フォトニック結晶ベースのマッハ・ツェンダー干渉計型光スイッチ
 LOTOS: 低温成長半導体を用いた表面反射型光スイッチ

図1: 全光スイッチの比較

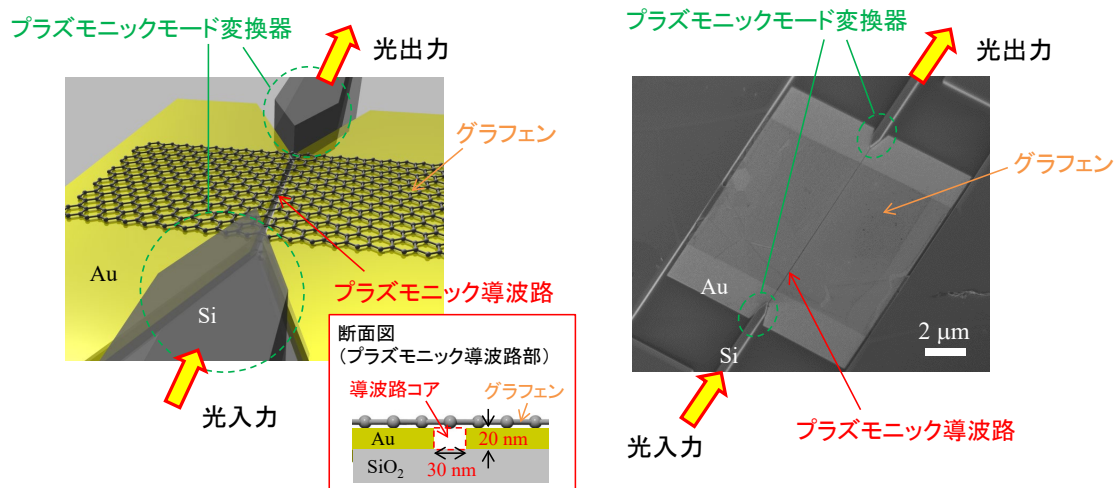
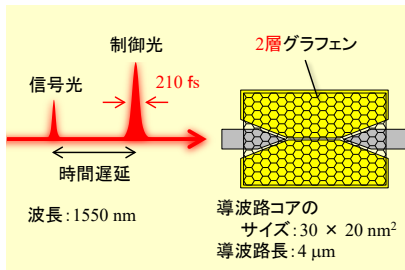


図2: グラフェンとプラズモニック導波路を結合させた素子の概念図(左)と電子顕微鏡像(右)

フェムト秒パルスによる全光スイッチング



フェムト秒領域の応答時間でかつフェムトジュール領域の消費エネルギーで動作する全光スイッチを世界で初めて実現

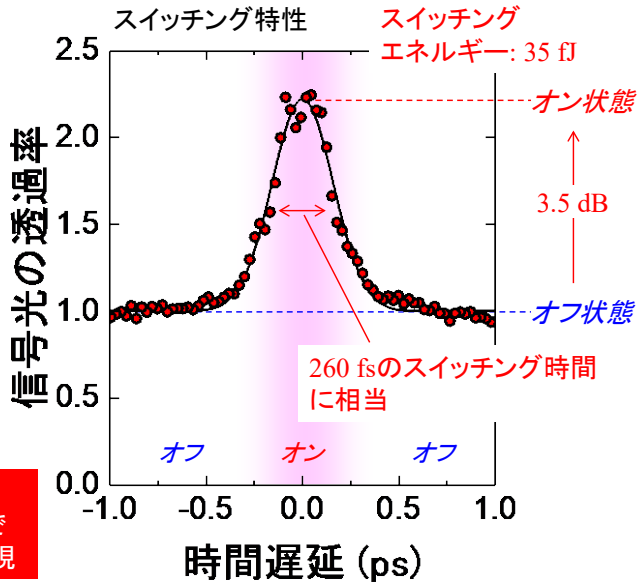


図3: 超高速全光スイッチングの実証(左:実験の概念図、右:スイッチング特性)

導波路の構造	シリコン(Si)導波路型	プラズモニック導波路型
導波路における光の分布		
導波路コアのサイズ	400 nm × 200 nm	30 nm × 20 nm
グラフェン光吸収	0.089 dB/μm (1 μmあたり2%)	2.0 dB/μm (1 μmあたり37%)
動作に必要と考えられる素子長	30 μm以上	数μm
グラフェン位置での光強度	1 (Si導波路型で規格化)	310 (Si導波路型で規格化)

図4: シリコン導波路型とプラズモニック導波路型の比較

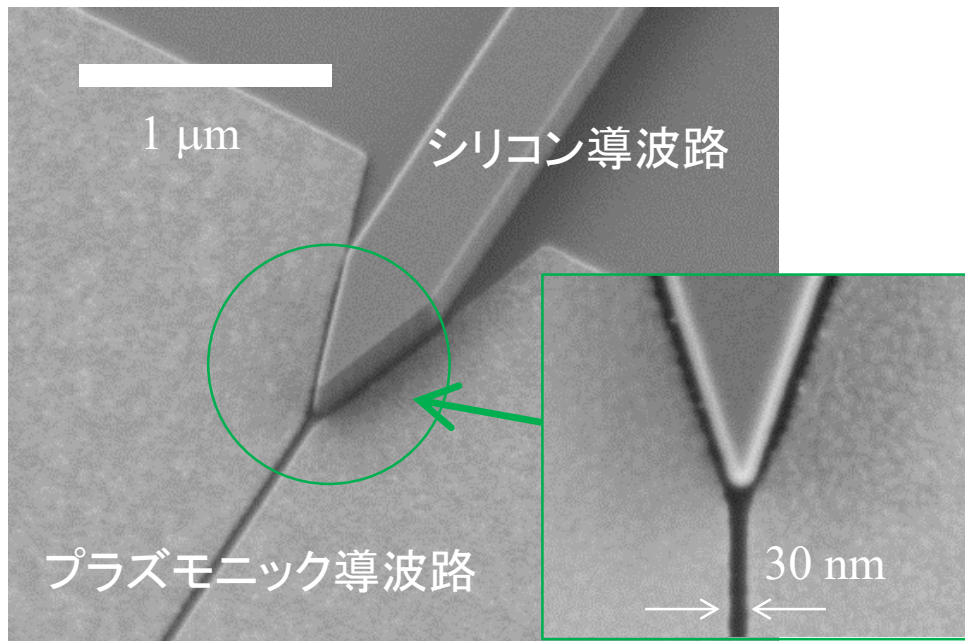


図5: プラズモニックモード変換器の電子顕微鏡像

【用語解説】

※1 プラズモニック導波路

金属表面において光は金属中の電子と結合した状態(「表面プラズモンポラリトン」と呼ばれる)で存在し、それは金属表面の極近傍に強く局在する。この特性を活用した導波路はプラズモニック導波路と呼ばれ、光をナノメートルレベルの領域に閉じ込めた状態で導波させることができる。

※2 グラフェン

炭素原子が六角形格子構造上に並んだ単一原子層厚のシート状物質。低次元性に起因した特異なバンド構造を持つことが知られ、光学的・電氣的に優れた特性を有しており、盛んに研究が進められている。ここでは特に、可視から赤外までの広い波長領域で単一原子層厚あたり2.3%も光を吸収すること、キャリア緩和が超高速であることが重要であるが、これらの性質はグラフェンの特異なバンド構造に起因する。

※3 RC 時定数

電気回路などで、入力信号の変化に対する出力の応答時間の目安となる定数を時定数と呼ぶ。特に RC 回路においては、電流を流し始めてから定常電流に至るまでの応答時間が、抵抗 R と電気容量 C の積(RC)によって決まり、RC 時定数と呼ばれる。一方、電気回路を用いない

全光素子では RC 時定数による応答速度の制限がないため、超高速動作が可能となる。

※4 プラズモニクス

光をナノメートルレベルの空間で扱い、光によるエレクトロニクスの限界打破を一つの目標としているのがナノフォトニクスである。その中でプラズモニック導波路^{※1}等の金属ナノ構造を導入することで、これを実現していこうとする分野をプラズモニクスと呼ぶ。

※5 非線形光学効果

高強度の光を入射したときに物質の応答が強度に比例しなくなる効果。可飽和吸収等の様々な現象が生じる。

※6 吸収係数

ある物質がどの程度光を吸収するのかを示す定数。

※7 可飽和吸収

高強度の光を入射したときに光吸収が飽和する現象。

【論文情報】

掲載誌: *Nature Photonics*

論文タイトル: Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides

著者: Masaaki Ono, Masanori Hata, Masato Tsunekawa, Kengo Nozaki, Hisashi Sumikura, Hisashi Chiba and Masaya Notomi

DOI: 10.1038/s41566-019-0547-7

<本件に関する問い合わせ先>

日本電信電話株式会社

先端技術総合研究所 広報担当

TEL 046-240-5157

science_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp

東京工業大学

理学院 物理学系 納富雅也

TEL 03-5734-3831

E-mail notomi@phys.titech.ac.jp

東京工業大学

広報・社会連携本部 広報・地域連携部門

TEL 03-5734-2975

E-mail media@jim.titech.ac.jp