



2022年2月16日

報道関係者各位

慶應義塾大学

グラフェンマイクロヒーターによるシリコンチップ上高性能光スイッチ —次世代大容量光通信、光集積回路、量子情報チップへの応用が期待—

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科の牧英之教授らは、原子オーダーで薄い炭素材料であるグラフェン（注1）を用いたマイクロヒーターをシリコンフォトニクス（注2）と融合することにより、高性能なシリコンチップ上光スイッチ（注3）を実現しました。本技術は、光通信における通信経路の高速な切り替えや、シリコンチップ上に集積した光集積回路や光量子情報チップなど、新たなシリコンチップ上光デバイスへの応用が期待されます。

光スイッチは、光信号の経路を電気信号に変換することなくダイレクトに切り替える素子であり、光通信においては、データを転送する通信経路の切り替えに用いられるなど、高速通信を支える重要な素子です。現在、様々な方式の光スイッチが開発されていますが、次世代の高集積で小型な光スイッチとしては、シリコンチップ上に集積した光導波路を用いた光スイッチが注目されています。この方式では、ヒーターによる加熱によって屈折率を変化させる熱光学効果で動作する光スイッチが主流となっていますが、現在の金属によるヒーターでは、スイッチ速度や効率といった性能向上の限界が課題となっていました。

今回、従来の金属に代わり、優れた熱特性を有するグラフェンを用いて、シリコンフォトニクスデバイスに対してダイレクトにグラフェンマイクロヒーターを形成した新しい光スイッチを開発しました。その結果、従来の金属ヒーターと同様の素子構造の光スイッチにおいても大幅に性能が向上し、応答時間が数マイクロ秒という極めて高速な光スイッチを実現しました。本技術により、二次元系材料であるグラフェンは、シリコンフォトニクスにおける光スイッチ用材料として極めて有望であることが示されました。今後、次世代の大容量光通信用チップ、光インターコネクタや光集積回路、量子情報チップなど、様々なチップ上集積光デバイス技術への応用が期待されます。

本研究は、東京大学先端科学技術研究センター（研究当時は慶應義塾大学理工学部）の門内靖明准教授と共同で行ったものです。

本研究成果は、2022年2月14日に米国化学会（ACS）のACS Nano オンライン版で公開されました。

1. 本研究のポイント

- ▶ 従来の光スイッチで用いられてきた金属ヒーターに代わって、優れた熱特性を有するグラフェンを用いることで、マイクロヒーターをシリコン導波路上にダイレクトに形成した新しい光スイッチを実現。
- ▶ 応答時間が数マイクロ秒という極めて高速な光スイッチを実現し、従来の金属ヒーターによる熱光学効果光スイッチと比べて大幅に性能が向上した。
- ▶ 次世代の大容量光通信用チップ、光集積回路、量子情報チップなどへの応用が期待される。

2. 研究背景

近年の情報化社会の急速な進展に伴って、様々なサービスや機器情報が光通信によるインターネットを介して行われる時代となっていますが、大容量通信を支える重要な素子の一つとして光スイッチがあります。光スイッチは、光信号の経路を電気信号に変換することなくダイレクトに切り替える素

子であり、光通信においてデータを転送する通信経路の切り替えに用いられるなど、光通信でのネットワーク技術を支える重要な素子です。現在の光スイッチとしては、機械方式、MEMS 方式をはじめ、ガラス基板上の導波路を用いた光スイッチなどの様々な方式が実用化されていますが、スイッチ速度は、およそ1~10 ミリ秒程度と低速です。次世代の高速な光スイッチとしては、シリコンチップ上の光導波路を用いたシリコンフォトニクスによる光スイッチが注目されており、10 マイクロ秒オーダーの高速なスイッチ速度も報告されています。多くのシリコン上光スイッチでは、温度変化に伴う屈折率の変化（熱光学効果）を利用し、金属ヒーターを用いた局所加熱による光スイッチが主流です。しかし、金属ヒーターによる光スイッチについては既に多くの素子が研究開発されましたが、次世代の大容量光通信用チップ、光インターコネクトや光集積回路、量子情報チップなど新たな集積光デバイスの実現には、さらなるスイッチ速度や効率の向上が必要となっており、全く新しいイノベーション技術の導入が必要とされています。

3. 研究内容・成果

今回、シリコン上の光スイッチに関する新たな技術として、従来の金属ヒーターに代わってグラフェンを用いることで、シリコンフォトニクス素子上にダイレクトに形成して、高速で動作する光スイッチを初めて開発しました。グラフェンは、原子オーダーで薄いカーボン材料であり、その低次元性に起因して優れた熱特性を有することが知られており、当研究グループも、最高でGHz オーダーの超高速な温度変調が可能であることを明らかにしてきました（注4）。そこで本研究では、グラフェンの優れた熱特性をマイクロヒーターとして応用することで、従来の金属ヒーターよりも高速な光スイッチを開発しました。本素子では、シリコン基板上において、レーストラック型共振器に対して2つの導波路を形成した光スイッチ素子を設計し、シリコン共振器上にダイレクトにグラフェン素子を形成しました（図1）。このグラフェン素子に電圧を印加して共振器をジュール加熱することで、共振器の屈折率を熱光学効果で変調し、共振器内への光の結合の有無を電氣的に制御することで、透過光出射と分岐光出射を選択可能な光スイッチ動作を実現しました（図2）。また、実際に、リアルタイムでの高速光スイッチ動作を行い、100kHz での動作を確認するとともに、その立上がり、立下り時間がそれぞれ1.2、3.6 マイクロ秒という高速なスイッチングが可能であることを実験的に実証しました。このスイッチ速度は、同じ機構の金属ヒーター光スイッチと比べて数~数十倍高速であり、金属をグラフェンに置き換えるだけで大幅に特性が向上可能であることを示しています。さらに、この高速動作のメカニズムをデバイスの熱伝導シミュレーションによって解析し、グラフェンの優れた熱伝導特性に起因する高速動作であることを理論的に示しました。

4. 今後の展開

現在の情報社会を支える集積デバイス技術は、単純な電子回路のみでは小型化・高速化・低消費電力化の限界を迎えており、これを打破する次世代デバイス技術として、シリコンフォトニクスなどの集積光デバイスが注目されています。今回のグラフェンによる高速な光スイッチ技術は、光通信経路を高速に切り替えることを可能にする技術であることから、次世代の大容量光通信向けチップとしての応用が可能です。さらに、シリコンフォトニクスは、従来の長距離の光通信だけではなく、機器間や機器内部の配線を光に置き換える光インターコネクトや光集積回路などの次世代光技術、さらには、チップ上での量子計算チップや量子暗号チップなどの量子情報チップなど、様々な光デバイス技術への応用が検討されています。グラフェンやカーボンナノチューブなどのナノカーボン材料は、今回の光スイッチにとどまらず、シリコンチップ上光源や量子光源などの新たなチップ上光デバイス応用も報告されており（注5）、様々なナノカーボンデバイスを集積したナノカーボン集積光デバイスの実現も期待されます。

本研究の一部は、科学研究費補助金(16H04355、23686055、18K19025、20H02210)、JST 研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 産学共同 (JPMJTR20R4)、地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所 (KISTEC) 戦略的研究シーズ育成事業、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業 (NIMS 微細加工プラットフォーム) の支援を受けて実施されました。

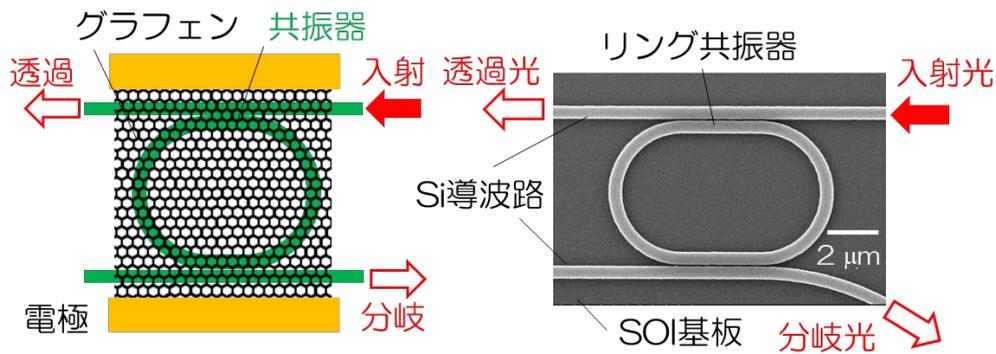


図1 左図：開発したグラフェン光スイッチの模式図。
右図：実際に作製した光スイッチの共振器部分の電子顕微鏡像。

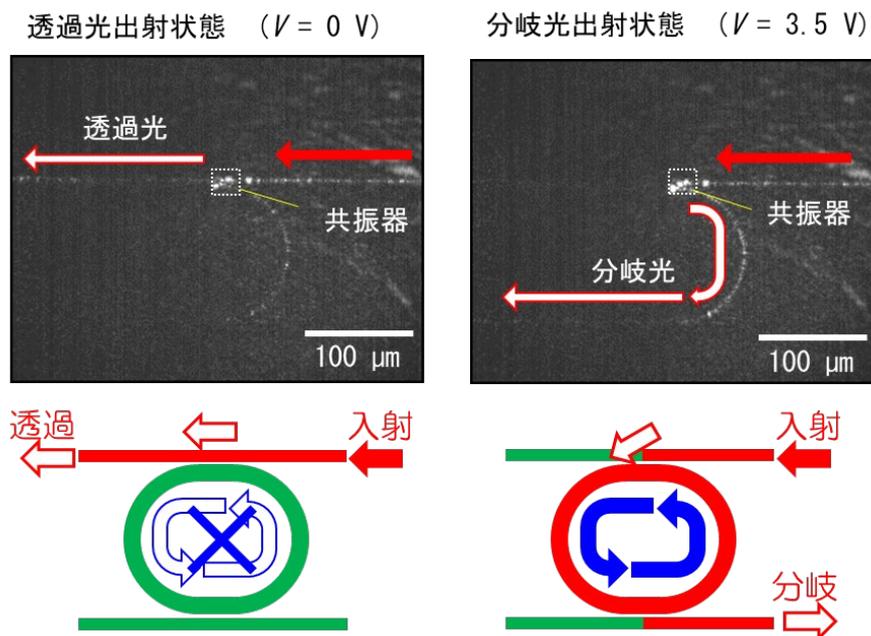


図2 上図：光スイッチの様子。透過光出射状態（左）と分岐光出射状態（右）。
下図：光スイッチのメカニズム。グラフェンへの通電の有無によって共振器の屈折率が変わるため、共振器への光の結合が制御されており、透過光出射状態（左）と分岐光出射状態（右）をスイッチすることができる。

<原論文情報>

“High-Speed and On-Chip Optical Switch Based on a Graphene Microheater”

Shoma Nakamura, Kota Sekiya, Shinichiro Matano, Yui Shimura, Yuuki Nakade, Kenta Nakagawa, Yasuaki Monnai, Hideyuki Maki

ACS Nano, <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c09526>

<用語説明>

(注1) グラフェン

鉛筆の芯等の原料である層状物質グラファイトの一層から数層を取り出したナノ材料。

(注2) シリコンフォトニクス

シリコンチップ上での微細加工技術を用いて、高集積な光技術を実現する新たな光デバイス技術。従来の集積回路では、シリコン半導体チップ上に集積化された電子デバイスによって信号の送受信や演算を行ってきたが、高速化と低消費電力化の両方を進めるには限界があることから、次世代の集積デバイス技術として、その一部を光に置き換える技術が注目されている。

(注3) 光スイッチ

光通信などにおいて、光信号の経路を電気信号に変換することなくダイレクトに切り替える素子。光信号のまま経路を切り替えるため、高速性を保ったまま通信経路を切り替えることが可能であり、高速通信を支える重要な素子である。

(注4)

※プレスリリース (2018年3月30日配信) 「シリコンチップ上のグラフェン高速発光素子を開発 ～チップ上光集積素子へ新たな道～」

<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2018/3/30/28-43298/>

(注5)

※プレスリリース (2020年1月14日配信) 「量子暗号に向けたカーボンナノチューブ高純度・高効率単一光子源」

<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2020/1/14/28-66850>

※プレスリリース (2020年8月13日配信) 「シリコン光回路に集積した高効率・狭線幅カーボンナノチューブ光デバイス –通信波長駆動により光集積回路・量子暗号チップへの応用が可能に–」

<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2020/8/13/28-74127/>

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 教授 牧 英之 (まき ひでゆき)

TEL : 045-566-1643 E-mail : maki@appi.keio.ac.jp <http://www.az.appi.keio.ac.jp/maki/>

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (澤野)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640 Email : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>