

シリコン光スイッチの大幅な省電力化に成功 ～シリコン万能光集積回路を用いた深層学習への応用に期待～

1. 発表者： 竹中充（東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 准教授）

2. 発表のポイント：

- ◆シリコン光導波路上に化合物半導体を貼り合わせることで、シリコン光スイッチの電力を6桁低減することに成功。
- ◆高速かつ低クロストーク光スイッチ動作にも成功。
- ◆光スイッチを網目状に集積したシリコン万能光集積回路の大幅な省電力化、小型化、高速化が可能に。万能光集積回路を用いた深層学習などの応用に期待。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻（工学部電気電子工学科 兼担）の竹中充准教授らは、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「超消費電力型光エレクトロニクス実装システム開発」プロジェクトの下、シリコン（Si）光導波路（注1）上に化合物半導体を貼り合わせることで、シリコン光スイッチ（注2）の電力を大幅に削減するなどの高性能化に成功しました。シリコン光集積回路（注3）上に光スイッチを網目状に多数集積した万能光集積回路（注4）は、人工知能用学習サーバーにおける光相互接続スイッチや光演算を用いた深層学習など種々の応用が期待されています。従来のシリコン万能光集積回路においては、主に熱光学効果を用いた光スイッチが用いられていました。しかし、消費電力が大きく、動作速度が遅いことが課題となっていました。本研究では、化合物半導体の一種であるインジウムガリウムヒ素リン（InGaAsP）をシリコン光導波路上に貼り合わせた金属―絶縁膜―半導体（Metal-oxide-semiconductor, MOS）構造を用いることで、光スイッチ動作を得ることに成功しました。従来の熱光学効果を用いた光スイッチと比較して、消費電力を6桁低減することに成功しました。1000倍以上高速なスイッチング動作や低クロストーク（注5）動作の実証にも成功しました。これによりシリコン万能光集積回路の大幅な省電力化、大規模化、小型化、高速化が可能となりました。この成果により、光相互接続スイッチを用いた高性能人工知能用学習サーバーの発展に寄与することが期待されます。また光演算を用いた深層学習など新たなコンピューティングへの展開も期待されます。

本成果は、2018年3月11日（米国西部時間）に国際会議 Optical Fiber Communication Conference（OFC）にて発表されました。

本研究は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」プロジェクトを受託した技術研究組合光電子融合基盤 技術研究所との共同実施にて実施されました。また日本学術振興会（JSPS）科研費 JP26709022 から一部助成を受けています。

4. 発表内容：

<研究の背景・先行研究における問題点>

膨大なデータを使って学習を行う人工知能サーバーにおいては、大量のデータをやり取りするための大規模光相互接続スイッチの役割が重要になることから、光スイッチを多数集積したシリコン光集積回路に注目が集まっています。また光スイッチを網目状に多数集積することで

さまざまな光操作を可能とする万能光集積回路を用いた光演算による深層学習にも近年注目が集まっています。しかし、従来のシリコン光スイッチは熱光学効果を用いており、消費電力が大きい、動作速度が遅いことが課題となっていました。電流注入方式を用いることで動作速度は改善可能であるものの、消費電力は改善できず、光損失やクロストークが悪化してしまいます。このことから、省電力かつ高速、低損失、低クロストークを実現可能なシリコン光スイッチの登場が強く求められていました。

<研究内容>

本研究グループは、シリコン光導波路を用いて2入力2出力の光干渉計を形成し、光位相シフト部に化合物半導体の一種であるインジウムガリウムヒ素リン (InGaAsP) を貼り合わせることで光スイッチング動作に成功しました (図1)。インジウムガリウムヒ素リンとシリコン光導波路間に電圧を加えることで、インジウムガリウムヒ素リン中に電子が蓄積し、光が出力される経路が光出力ポート1と光出力ポート2の間で切り替わる構造となっています。

光位相シフト部の断面構造を図2に示します。二酸化ケイ素上にシリコン層が形成されたSOI (Si on Insulator) 基板 (注6) 上に作製されたシリコン光導波路上に、薄膜インジウムガリウムヒ素リンが貼り合わされた構造となっています。ゲート絶縁膜となるアルミナを間に挟むことで、インジウムガリウムヒ素リン層とシリコン層の間で金属-絶縁膜-半導体 (Metal-oxide-semiconductor, MOS) と同様の構造となっています。両層の間にゲート電圧を加えることで、インジウムガリウムヒ素リン界面に電子蓄積層が形成され、光の位相 (注7) が変調されます。

インジウムガリウムヒ素リン中の電子による屈折率変化はシリコンと比べて極めて大きいことから、2V以下の電圧を加えることで光の経路を切り替えるスイッチング動作に成功しました (図3)。スイッチング時に発生する光損失も小さいことから、スイッチ時のクロストークも抑制可能であることを実証しました。光導波路の加工精度を向上することでさらなるクロストーク低減も期待されます。

光スイッチング時の出力波形を図4aに示します。スイッチング速度は20ナノ秒程度となり、熱光学スイッチと比較して1000倍以上高速に動作することを実証しました。素子の改良によりさらなる高速化が可能で、1ナノ秒を切る高速動作も期待されます。電流注入型シリコン光スイッチとの性能比較を図4bに示します。MOS構造においては電圧印加時にわずかなリーク電流しか流れないことから、クロストークの低減に加えて、スイッチング時の消費電力を1.3ナノワットに低減することに成功しました。これは熱光学スイッチや電流注入型スイッチと消費比較して6桁以上小さい消費電力となることから、大幅な省電力化に成功しました。

本成果により、省電力・高速・低損失・低クロストーク光スイッチをシリコン光集積回路上に集積可能になることから、大規模に光スイッチを集積したシリコン万能光集積回路の実現に繋がるものと言えます。

<社会的意義・今後の予定>

今回の成果はシリコン光集積回路上に多数の光スイッチを集積可能にするものであり、大規模シリコン万能光集積回路を用いた光相互接続スイッチへの応用が期待されます。これにより大量のデータ転送が必要となる人工知能の学習効率が大幅な改善が見込まれます。また、光演算を用いた超高速深層学習への応用も可能であることから、人工知能の発展に寄与することが期待されます。

5. 発表学会：

学会名：国際会議 Optical Fiber Communication Conference (OFC)

論文タイトル：Low-crosstalk, low-power Mach-Zehnder interferometer optical switch based on III-V/Si hybrid MOS phase shifter

著者：Qiang Li, Jae-Hoon Han, Chong Pei Ho, Shinichi Takagi, and Mitsuru Takenaka

6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻

准教授 竹中 充 (たけなか みつる)

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 10 号館 490 号室

7. 用語解説：

注 1) 光導波路：光を導くためのガイド。光にとっての配線に相当するもの。光が屈折率の高い部分に集まる性質を利用して、屈折率の高い部分を配線上に加工したもの。半導体や誘電体を使って作製することができる。

注 2) 光スイッチ：電圧や電流などにより、光の経路を切り替える素子。

注 3) シリコン光集積回路：大規模集積回路などの電子機器に使われてきた半導体であるシリコンを用いて、種々の光素子を集積した光回路。大規模光集積回路が実現できることから、シリコンフォトニクスと称されて世界中で活発に研究開発が進められている。

注 4) 万能光集積回路：多数の光スイッチを網目状に集積した光集積回路。理論上、任意の光線形操作が可能となることから、さまざまな機能性を同一の光集積回路で実現可能であり、シリコンフォトニクスの進展に伴い近年注目が集まっている。

注 5) クロストーク：

伝送信号が他の伝送路に漏れて混線すること。

注 6) SOI (Si on Insulator) 基板：上部シリコン層とシリコン基板との間に絶縁膜となる二酸化ケイ素が挿入された特殊なシリコン基板。シリコン基板と電氣的に絶縁されることから、高速かつ低消費電力な大規模集積回路向けに使用されている。また上部シリコン層に強く光を閉じ込めることが可能であり、シリコンフォトニクス用途で用いられている。

注 7) 光の位相：光の波が一周期内のどのタイミングにいるかを示す量。

8. 添付資料：

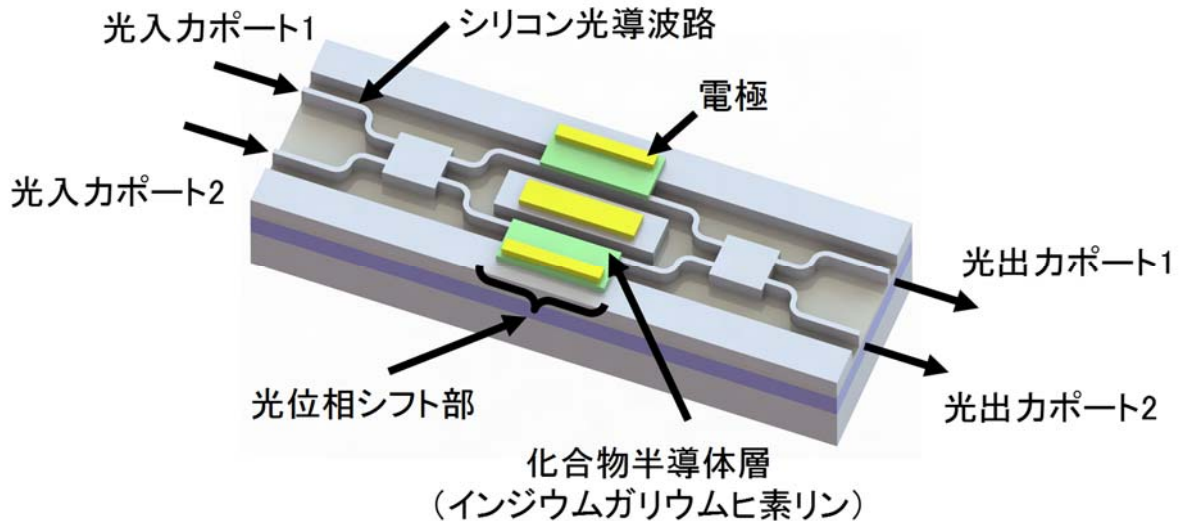


図1 本成果で実証した光スイッチのイメージ図

シリコン光導波路で形成された干渉計の光位相シフト部に化合物半導体の一種であるインジウムガリウムヒ素リンが貼り合わされています。インジウムガリウムヒ素リンとシリコン光導波路間に電圧を印加することで、光入力ポートから入射された光信号の経路が光出力ポート1と光出力ポート2の間で切り替わります。

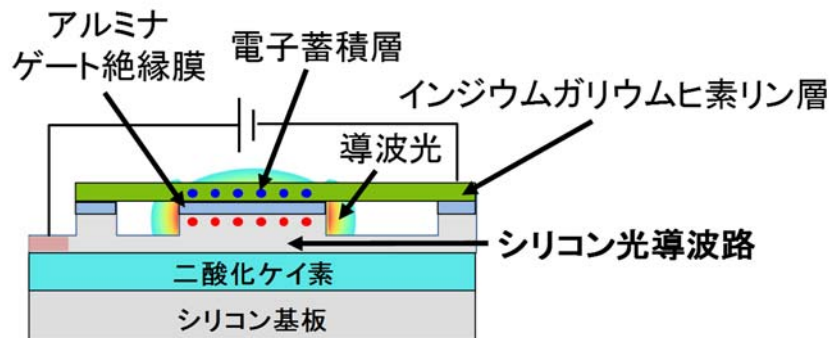
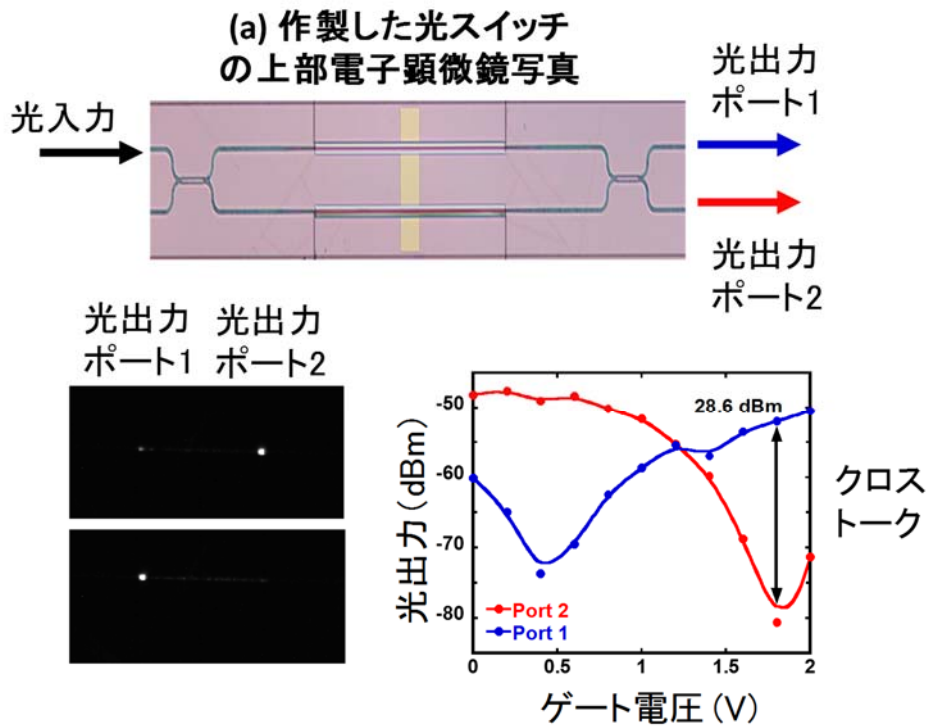


図2 本成果で実証した光位相シフト部の素子断面構造

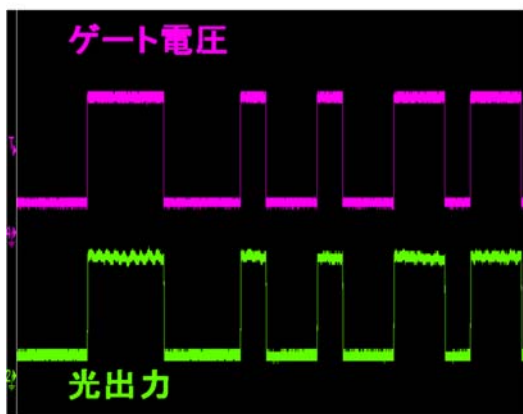
二酸化ケイ素上にシリコン層が形成されたSOI (Si on Insulator) 基板 (注6) 上に作製されたシリコン光導波路上に薄膜インジウムガリウムヒ素リンが貼り合わされた構造となっています。ゲート絶縁膜となるアルミナを間に挿入することで、電圧印加により電子蓄積層がインジウムガリウムヒ素リン界面に形成され、光スイッチング動作を得ることができます。



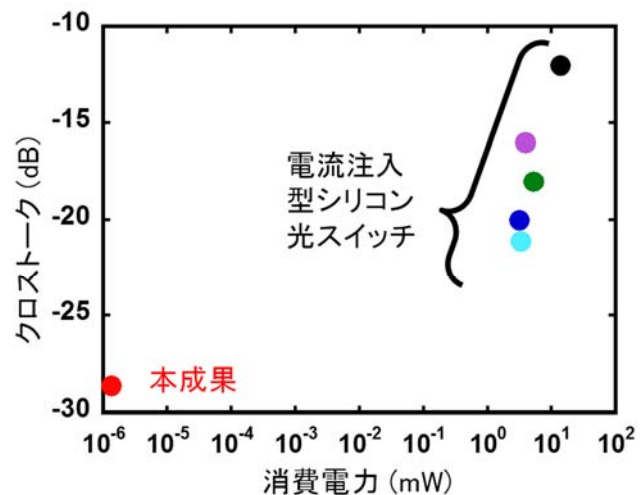
(b) 光スイッチ時の出力光像

(c) 光スイッチ特性

図3 作製した光スイッチのスイッチング特性。一方の光入力ポートから入射した光の経路がゲート電圧印加により光出力ポート2から光出力ポート1に切り替わることを実証しました。化合物半導体中の蓄積電子による位相シフトが大きいことから、2V以下でのスイッチング動作が得られました。スイッチング時の光損失が小さいことから、クロストークの低減にも成功しました。



(a) 光スイッチ動作波形



(b) 光スイッチ性能比較

図4 光スイッチ動作波形および性能比較

(a) 20 ナノ秒程度のスイッチング速度を実現しました。素子改良により1ナノ秒以下のスイッチ速度も期待されます。(b) 電流注入型シリコン光スイッチと比較して、クロストークが改善し、消費電力は6桁以上低減しました。