応用物理学会秋季学術講演会 注目講演プレスリリース

2023年 9月 11日

低挿入損失•不揮発性$Ge_2Sb_2Te_3S_2$強度変調器を用いた光行列演算
Photonic Matrix Multiplication using Low-insertion-loss and Non-volatile Ge2Sb2Te3S2 Intensity Modulators

深層学習に光コンピュータ技術を応用
新材料を用いた光変調器と新規構造の光回路で行列演算を実証

東大院・工[1], 産総研[2]
○宮武 悠人[1], 唐 睿[1], 牧野 孝太郎[2], 富永 淳二[2], 宮田 典幸[2], 岡野 誠[2],トープラサートポン カシディット [1], 高木 信一 [1], 竹中 充 [1]

【発表概要】

- **相変化材料「$Ge_2Sb_2Te_3S_2$」（GSTS）を開発し、優れた特性を持つ光強度変調器を提案・実証**
- **提案した光強度変調器を新規構造の光回路に組み込み、光による行列演算を実証**
- **畳み込みニューラルネットワーク（CNN）の行列演算へ応用し、手書き文字認識に対して97.34%という高い推論精度を達成**

近年、加熱するAIブームに関連し、深層学習による大量の電気エネルギー消費が社会問題化している。光通信技術から派生した研究分野であるシリコンフォトニクスを研究する東京大学竹中研究室の宮武悠人氏（博士3年）らの研究グループは、シリコン光プログラマブル光回路を用いた光行列演算による、高効率の深層学習を探求している。同研究グループは、「$Ge_2Sb_2Te_3S_2$」（GSTS）という相変化材料を開発し、優れた特性を持つ光強度変調器を提案・実証。この光強度変調器を新規構造の光回路に組み込み、光による行列演算を実証した。実証された光行列演算回路は、従来の光回路と比較して高い演算性能と演算効率が期待される。さらにシミュレーションによって畳み込みニューラルネットワーク（CNN）の行列演算への応用を行い、手書き文字認識に対して97.34%という高い推論精度を達成した。提案した光強度変調器を用いた光行列演算回路が、深層学習を用いた推論タスクにおいて非常に高いポテンシャルを持つことを示した。

【詳細】

行列演算に高いポテンシャルを持つ光コンピュータ技術

現在は電子をつかったコンピュータによる情報処理が一般的だ。しかし近年になり、大規模集積回路（LSI）の発展を支えてきた「ムーアの法則」が、半導体の微細化の限界によって終焉に近づきつつある。将来的な情報処理のさらなる高度化を見据えたとき、エレクトロニクスに基づく従来のコンピュータ技術を補完し、情報処理能力を飛躍的に高める新しい形のコンピュータが期待される。そのひとつのソリューションとしてフォトニクスによる「光コンピュータ」（※1）の実用化が視野に入ってきている。

東京大学竹中研究室の宮武悠人氏（博士3年）は、光通信技術から派生した「シリコンフォトニクス」（※2）を研究する。

「現代のエレクトロニクスを基盤とするコンピュータは、多様な情報を幅広く処理する能力を有しています。その一方で、光を利用したコンピュータは、線形演算すなわち行列演算に特異な強みを持ちます。シリコンフォフォトニクスに基づく光集積回路（Photonic Integrated Circuit〈PIC〉）が得意とする、もっとも代表的なものが深層学習（※3）です」と宮武氏は話す。

※1 **光コンピュータ** 光が持つ高速伝搬性や広帯域性などの性質を用いて情報処理をするコンピュータのこと。
※2 **シリコンフォトニクス** シリコン上で光を制御し、通信や情報処理を行う研究分野
※3 **深層学習** 人間の神経細胞の働きを模してつくられたニューラルネットワークによって行う機械学習手法のひとつ。

高いハードウェアエラー頑健性が示す、将来的なスケーラビリティ

宮武氏は、$Ge_2Sb_2Te_3S_2$という「相変化材料」（※4）を用いて、光の伝送路「光導波路」を伝播する光の強度を変える素子「光強度変調器」（※5）を提案・作製しその動作を実証した。さらに新しいアーキテクチャを持つ光回路に組み込み、光行列演算を実証した。

光強度変調器とは、光導波路を伝播する光の強度を変える素子である。光強度変調器の低消費エネルギー化のために求められる性質は「不揮発性」である。たとえば「不揮発性メモリ」は、電源を切っても記憶されているデータが消失しないメモリのことだが、不揮発性とは、外部からエネルギーを与えられて変化するが、エネルギーを取り去っても安定な状態にとどまることができる性質を指す。従って、光強度変調器を不揮発化することで、強度変調の保持に必要なエネルギーをゼロにすることができる。このような光強度変調器に好適な不揮発性を持つ物質として、宮武氏は相変化材料「GST（$Ge_2Sb_2Te_5$）」に着目した。

「GSTは書き換え可能なDVDやCDに使われている相変化材料です。私たちは光強度変調器に求められる性能を達成するためにGSTに少し工夫を加え、バンドギャップを大きくし、光強度変調器

の『消光比（※6）』を高め、『挿入損（※7）』を抑えることができる新しい材料としてGSTS（$Ge_2Sb_2Te_3S_2$）を開発し、デバイスを作製しました（図1）」（宮武）

光強度変調器の性能指数として重要なものに消光比と挿入損がある。消光比が大きいほど、光強度変調器がオン時とオフ時で変えられる光の強度がより大きくなり、挿入損が小さいほど、光がデバイスを伝搬したときの損失が小さい。したがって、消光比が大きいほど、そして挿入損が小さいほど、高性能であると言える。従来から用いられてきたGSTの代わりにGSTSを用いることで、高い消光比と低い挿入損を両立することができるのである。

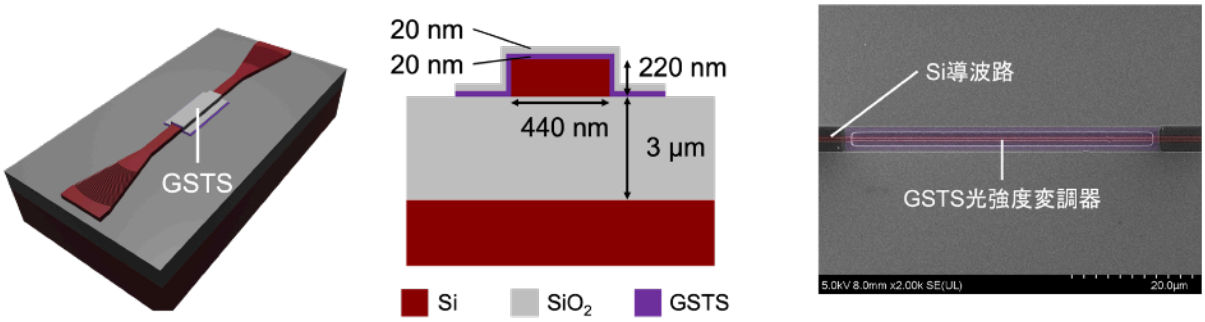

図1 （左および中）幅440ナノメートル、高さ220ナノメートルのSiストリップ導波路の上に20ナノメートルのGSTSの薄膜および、SiO_2の保護膜を作製。（右）同デバイスの電子顕微鏡写真。

次に宮武氏は、同研究室が最近提案した新規構造を持つ光回路（※8）に、今回提案した光強度変調器を組み込んだ行列演算回路を作製し、その動作を実証していった（図2）。「まず初めに24段階という細かい多値変調（※9）を実証しました。これは、GSTSを用いた光強度変調器の低い挿入損と適度な強度変調量によって可能になりました。また、今回採用した新規構造を持つ光回路は、ハードウェアエラーの蓄積に対し、高い頑健性を示すことが数値計算によって明らかになっています。光コンピュータはアナログ計算であり、エラーが生じたときの補正手段を持ちません。ハードウェアエラーの蓄積に対する頑健性は、スケールアップの上で重要な指標となりますが、今回実証した光回路は回路規模が大きくなった時にもハードウェアエラーの蓄積に対して高い頑健性を持つことが期待できます」（宮武）

※4 **相変化材料** 2つ以上の安定な相の間で、大きな物性の変化を伴う不揮発的な相変化を示す材料。GSTSの場合は、アモルファス相と結晶相の相変化をスイッチのオンとオフに割り当てている。

※5 **強度変調器** 光の導波路を伝播する光の強度を変えることができる素子。

※6 **消光比** Extinction Ratio 光が入射した際の最大透過光強度と、最小透過光強度の比のこと。

※7 **挿入損** Insertion Loss デバイスを光が伝搬する際の損失を指す。

※8 R. Tang *et al.*, “Two-layer integrated photonic architectures with multiport photodetectors for high-fidelity and energy-efficient matrix multiplications,” Opt. Express **30**(19), 33940-33954 (2022).

※9 **多値変調** ひとつの変調によって2以上の値をとる変調方式。開発されたデバイスでは、波長488ナノメートルのレーザ光を上方から照射し、長さ50マイクロメートルのGSTSを約2マイクロメートルずつ部分的に結晶化することで多値変調を実現している。

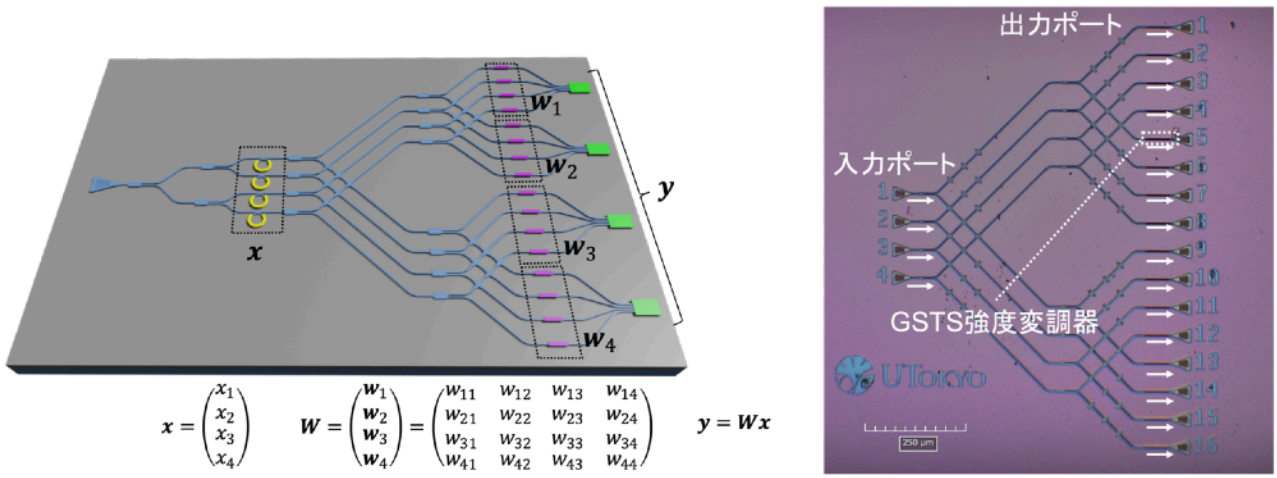

図2 導波路交差を用いて作製された一層構造の光回路の模式図（左）および光学顕微鏡画像（右）。4×4、16個の行列要素それぞれに光強度変調器が対応し（W_1〜W_4）、強度変調量を変えることによって、y=Wxの値を変化させる。

CNNで手書き文字認識に対し、97.34%という高い推論精度を達成

宮武氏は作製した光強度変調器を搭載した行列演算回路で行列演算を行った。3つの代表的な行列演算を行ったところ、16ある光強度変調器を光学的に相変化させることによって、実現することができていることを確認した。さらに、非常に幅広い波長域にわたって同じ行列計算をすることができていることを確かめた。（図3）

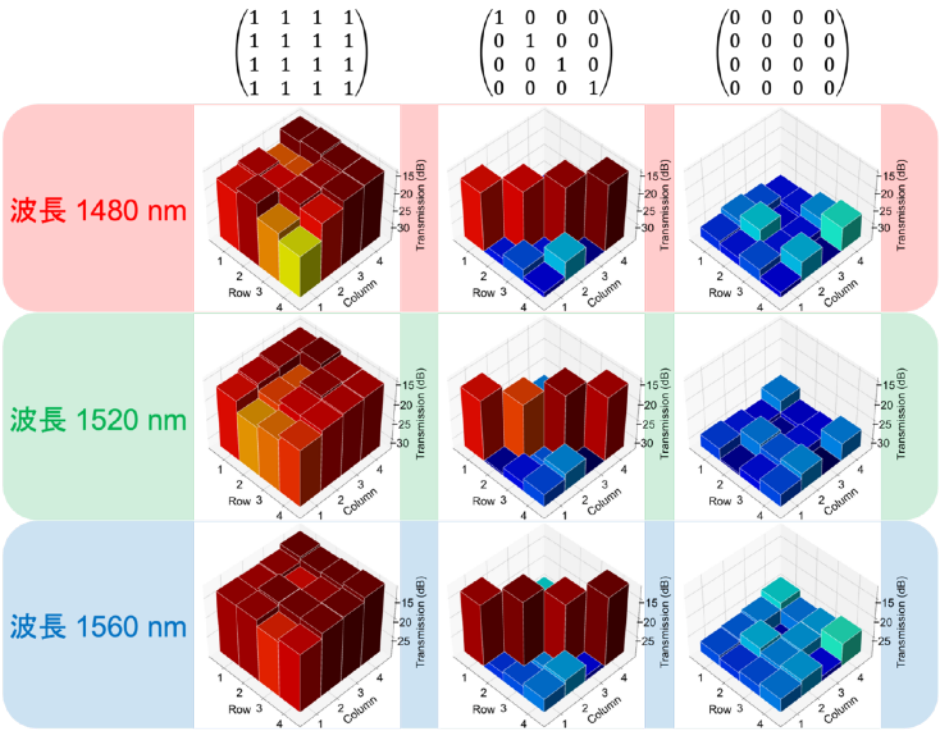

図3 4×4の行列で、要素を16持つ。強度変調器すべてがオンの状態では、すべての光が減衰することなく透過し、行列すべてで1が出力されている（図左の赤いキューブ）。強度変調器すべてがオフの状態では、すべての光が透過しないため、行列すべてで0が出力されている（図右の青いキューブ）。図中央の赤と青のキューブが混ざったものは、0と1がそれぞれ一定の割合で出力されていることが示されている。

「ここまでの成果に基づき、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）の行列演算への応用を、シミュレーションによって検討しました（図4）」（宮武）

CNNは、入力画像に対し、初めに複数のフィルターを畳み込むことで特徴を捉えることが特徴だ。宮武氏はこの部分に光行列演算回路を組み込んだ。具体的なシミュレーション条件として、3×3のサイズのフィルターを10個用いるケースを想定した。動作実証の結果から、光強度変調器は24レベルでの強度変調が可能だ。この24レベルの強度変調を、10個のフィルターに適用した場合の推論精度についての検証では、精度の低下がほとんど見られないことが明らかとなった。「この結果から、24レベルの細やかな強度変調が、CNNの推論タスクにおいては効果的であることが確認されました。そして手書き文字認識に対して97.34%という高い推論精度を達成しました」（宮武）

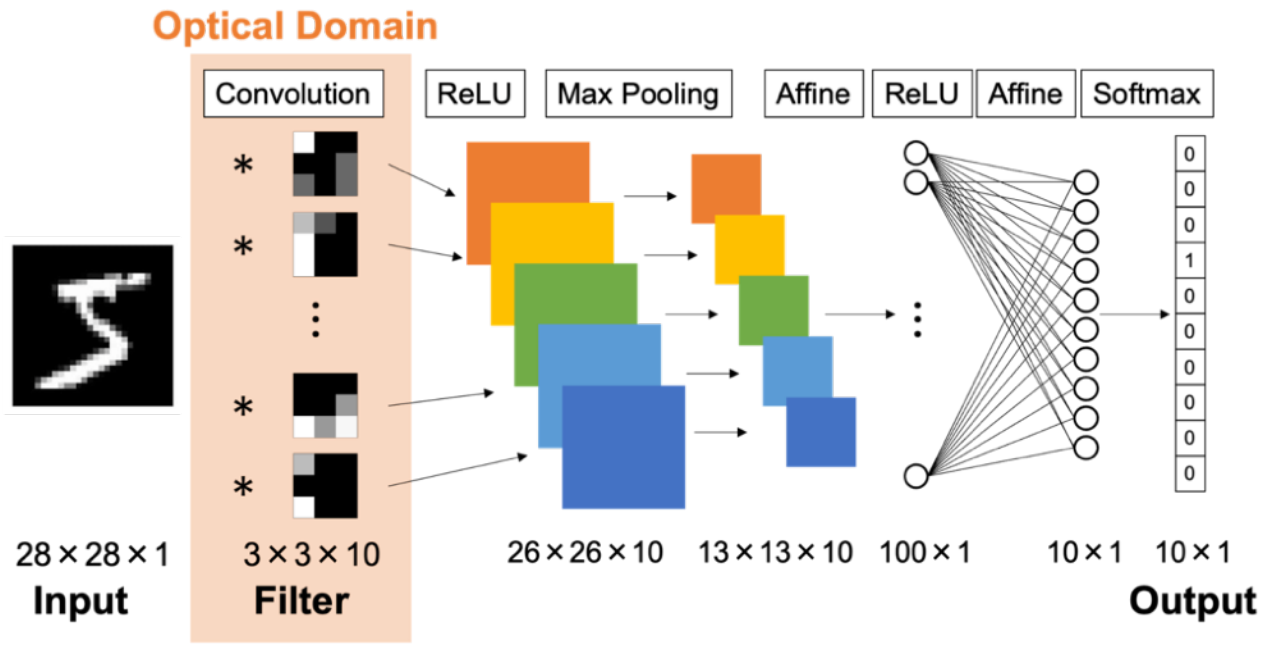

図4 手書き文字認識を行った畳み込みニューラルネットワーク（CNN）

演算性能、演算効率において高いポテンシャルを示した

その演算パフォーマンスは、従来の光回路を使用した行列演算と比較し、演算性能及び演算効率の両面で高い潜在能力を有していることが確認された（図5）。

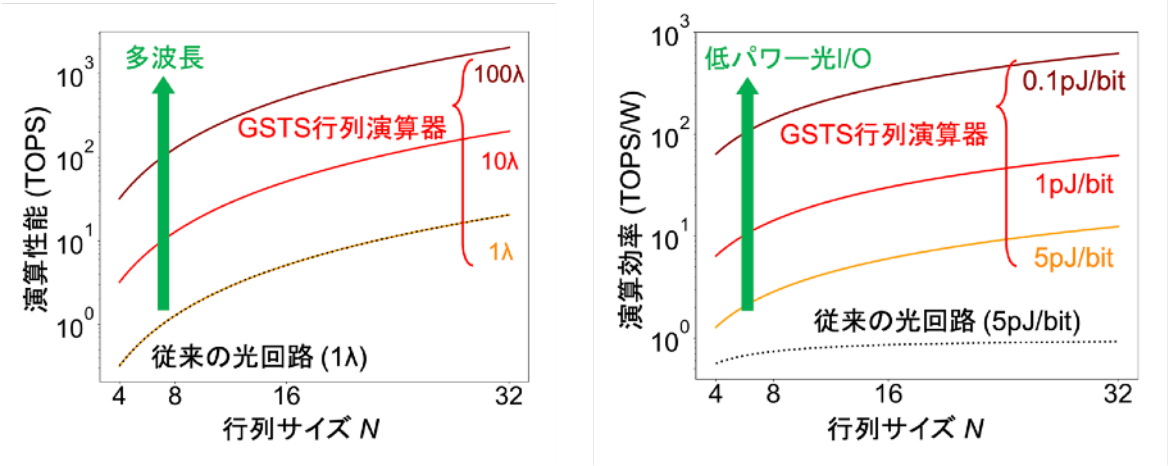

図5（左）縦軸が演算性能であるTOPS（1秒あたりの演算数）。グラフの上方向ほど、1秒間に行うことのできる演算数が増加する。横軸は行列のサイズを示す。（右）縦軸が演算効率であるTOPS/W（1ワットあたりのTOPS）を示す。横軸は行列のサイズを示す。黒の点線が示すのは、従来の光回路を使用した行列演算のパフォーマンス。

「私たちが提案するGSTSを用いた光行列演算回路は、強度変調器の24レベルという広い波長範囲で同一の行列計算が可能であり、複数の波長を使用することで、その演算数を劇的に増加させることができるため演算性能を示すTOPS（1秒あたりの演算数）は従来の光回路を使用した行列演算と比較して高くなります。また、演算効率を示すTOPS/W（1ワットあたりのTOPS）の観点では、従来の光回路では、消費エネルギーが大きい熱光学効果に基づいた光位相変調器を用いているため、特に大きな回路規模において、光回路全体の消費エネルギーが大きくなり、演算効率の向上が難しいという課題がありました。しかしGSTSを用いた光行列演算回路は、光強度変調器の不揮発性を活かし、静的な消費エネルギーを大幅に削減することが期待されます。特に、深層学習の推論の際に、固定された重み行列を用いる場面では、この効率の向上が顕著になるでしょう」（宮武）

今後の展望として、宮武氏は深層学習における消費エネルギーの節約に貢献ができるのではないかと考える。深層学習の分野でのエネルギー消費問題を解決するための一つの有望な手段として、光技術を活用し、新しい計算アーキテクチャやデバイスが開発されれば、現在のAI技術の限界をさらに押し上げることができるかもしれない。

「近年、ChatGPTをはじめとした生成AIの分野において、深層学習の活用が増えており、新たなブームが到来しているかのようです。その中で、一つの大きな課題として挙げられるのが、その消費エネルギーの大きさです。深層学習、特に学習フェーズにおいては、大量のデータと計算が必要とされるため、エネルギー消費は避けられません。そして、推論の段階においても、高度な計算が求められるため、エネルギー効率の問題は継続的に存在します。このような背景の中で、光技術の活用は大きなメリットを持っています。光を利用したコンピューティングは、電気的な方法と比べて低消費エネルギーで高速な処理を実現できる可能性があります。単位エネルギー当たりの演算能力、すなわちエネルギー効率の面で、LSIを凌駕する光回路を実現したいと思います」（宮武）