

新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする  
次世代フォトニクスの中盤技術  
平成27年度採択研究代表者

2018年度 実績報告書
-----------------

納富 雅也

日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所 センタ長

集積ナノフォトニクスによる超低レイテンシ光演算技術の研究

## § 1. 研究成果の概要

本チームでは、ナノフォトニクス技術を使って、光ゲートの超小型化、光電変換の超高効率化を実現し、この技術に光パスゲートという新しい回路方式を適用し、様々な情報処理の超低レイテンシ化を狙っている。最終目標としては、光の伝搬速度で演算が実行できることを実証し、この回路方式により実現可能となる情報処理システムを設計、提案することを目指している。

これまで光電変換の超高効率化を目指して、ナノフォト技術により光電変換素子の静電容量を極限的に小さくしてきた。我々は、静電容量が 1fF 以下のナノ共振器型電気光学変調器を用いて、42aJ/bit という EO 変換として最低消費エネルギー動作を達成し、このナノ電気光学変調器とやはり静電容量が 1fF 以下のナノ光受光器を集積することによって、O-E-O 変換による光三端子素子（一種の光トランジスタ）を実現した。この素子はスイッチ、波長変換などの光非線形素子として動作するが、従来光処理素子では難しかった信号利得を持つことが特徴である。この O-E-O 集積素子はトータルの静電容量が 2fF であり、1.6fJ の光パルスで動作する。我々が知る限り、fF レベルの光電集積は世界初であり、光素子と電気素子の高効率・低遅延の接続を可能とし、様々なハイブリッド機能の創出に向けて有望な技術である[2]。成果は Nature Photonics に受理された。

また、本プロジェクトでは電気光学型光パスゲートを用いた光加算器の構成を提案してきたが[1]、本年度はシリコンフォトニクス集積技術を用いて、4ビットの並列光加算器の動作実証に成功し、熱光学効果およびキャリアプラズマ効果の両方の素子での動作を実証した。また、シリコンフォトニクス集積技術による大規模光演算回路を目指して、大規模集積デバイスの最適化調整手法の開発にも取り組み、Bacteria Foraging Optimization (BFO)法を用いて、大規模マトリクス回路の調整を自動化する方法を開発した。

昨年度、線形干渉によって高コントラストなデジタル論理動作を可能とする光学ゲートとして、 $\Psi$ ゲートを提案したが、本年度は波長無依存性の実証などの特性評価を行った。また、同様な線形ゲートを用いて複数ビットのデジタルアナログ変換の実証にも成功した。

また、新現象探索として、これまで利得共振器と損失共振器を並べた Parity-Time 対称結合共振器系を研究してきたが、本年度は4共振器を1ユニットとすることにより、利得と損失のみで非自明なトポロジーを持つ再構成可能なトポロジカル絶縁体状態を生成できることを理論的に示すことに成功し、Physical Review Letters 誌に発表し、報道発表も行った[3]。

光演算の回路技術としては、光パスゲートをベースとして光 AD コンバータを用いた光並列乗算器を設計した。また、光パスゲート論理は元々二値による二分決定グラフ(BDD)をベースにしていたが、これを多値信号に拡大した多出力二分決定グラフ(MT BDD)方式を提案し、具体的な光回路構成を設計した。

光演算の応用検討として、昨年度よりベクトル行列積演算の低レイテンシ化に注目し、特にニューラルネットおよび機械学習を想定した応用を検討してきたが、本年度は光によるベクトル行列積演算ユニットと電気メモリとの連携を考慮した電力性能モデルを改良し、性能比較評価を行った。その際にアプロキシメートコンピューティング用光アクセラレータを想定し、電力効率改善率を評価した。またシリコンフォトニクス技術を使った光任意波形発生器を用いて、ニューラルネット用のシグモイド関数を生成するデバイス動作を実証した。

【代表的な原著論文】

1. Tohru Ishihara, Akihiko Shinya, Koji Inoue, Kengo Nozaki, and Masaya Notomi, "An Integrated Nanophotonic Parallel Adder," *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, vol. 14, no. 2, pp.1-20, 2018
2. K. Nozaki, S. Matsuo, T. Fujii, K. Takeda, A. Shinya, E. Kuramochi, and M. Notomi, "Femto-farad optoelectronic integration demonstrating energy-saving signal conversion and nonlinear functions", *Nature Photonics* (2019), DOI: 10.1038/s41566-019-0397-3
3. Kenta Takata and Masaya Notomi, "Photonic Topological Insulating Phase Induced Solely by Gain and Loss", *Physical Review Letters*, vol. 121, No. 21, p. 213902, 2018

## § 2. 研究実施体制

### (1)「NTT」グループ

- ① 研究代表者: 納富 雅也 (日本電信電話(株) NTT 物性科学基礎研究所 センタ長)
- ② 研究項目
  - ・低遅延ナノフォトニクス素子及び集積技術の開発
  - ・新しい光学現象を利用した超低遅延化の研究
  - ・超低レイテンシ演算回路およびシステムの実証実験

### (2)「京大」グループ

- ① 主たる共同研究者: 塩見 準 京都大学大学院情報学研究科 助教)
- ② 研究項目
  - ・光パスゲートと COMOS 論理ゲートが融合する光演算回路の最適設計環境の開発
  - ・光パスゲートに基づく超低遅延演算回路の研究
  - ・超低レイテンシ演算回路およびシステムの実証実験

### (3)「九大」グループ

- ① 主たる共同研究者: 井上 弘士  
(九州大学大学院システム情報科学研究院 教授)
- ② 研究項目
  - ・超低レイテンシ光電融合プロセッサ・アーキテクチャの開発
  - ・超低レイテンシ処理回路およびシステムの実証実験

### (4)「産総研」グループ

- ① 主たる共同研究者: 山田 浩治  
(産業技術総合研究所電子光技術研究部門 研究グループ長)
- ② 研究項目
  - ・シリコン低遅延光ゲート集積化技術の研究

### (5)「名大」グループ

- ① 主たる共同研究者: 石原 亨 (名古屋大学大学院情報学研究科 教授)
- ② 研究項目
  - ・超低レイテンシ光電融合演算回路アーキテクチャの研究開発
  - ・超低レイテンシ演算回路およびシステムの実証実験