

「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

H29 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  
ナノフォトニクスセンタ センタ長

低遅延光演算ゲートとその集積技術の研究

## § 1. 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 ナノフォトニクスセンタ 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: 石原 亨 (京都大学大学院情報学研究科 准教授)
- 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

## § 2. 研究実施の概要

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論理回路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。

本年度は、光電変換の超高効率化に関して大きな進展があった。これまで本プロジェクト中でフォトニック結晶技術を用いて、光受光器を小型化し、キャパシタンスを極限的に小さくすることで、これまでの光電変換で必須であった電気アンプを廃し、電気アンプフリーの光電変換が可能であることを示してきた。電気アンプを用いない場合、光受光器が消費する電力はバイアス電源による電流が消費する電力しか残らない。我々は、今年度フォトニック結晶光受光器が、順バイアス時に高速動作できることを見出した。本成果は、この光受光器を大きな負荷抵抗をつけたときにゼロバイアスで動かせることを意味しており、電気エネルギーを全く消費しない光電変換が可能となることを世界で初めて実証した[2,3]。

光ゲートを極限的に短くできる技術として、線形干渉を用いた演算ゲートを検討してきたが、今年度は Si フォトニクス技術を用いた Y+1 型分岐素子により、AND や XNOR などのブーリアン演算を実行できることを提案し、実際に実験により実証することに成功した。また、同様な線形素子として、光デジタルアナログ変換器を提案し、2ビットの試作素子で原理実証に成功した。

また、光ゲートをめざした新現象探索として、利得ナノ共振器と損失ナノ共振器が交互に並んだ Parity-Time 対称型結合共振器導波路を提案し、同構造の持つ奇妙な特性を明らかにした[3]。

光演算の回路技術としては、ナノ光ゲートをベースにした並列光加算器について設計をまとめて論文投稿するとともに、並列乗算器の検討を本格的に行った。光パスゲートに適した手法として、対数加算を利用した乗算法を採用し、同手法が低レイテンシで誤差が一定になる近似乗算計算となり、パタン認識や機械学習に向くことを見出した。また、多入力データに対する光論理演算回路を検討し、計算中に光・電気・光変換を導入することにより、効率よく多段化ができることを見出した。

光演算の応用検討としては、光パスゲート回路によりベクトル行列積演算を低レイテンシ化することに注目し、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た。ニューラルネットエンジンへの適用を前提として、光ベクトル積演算の性能を複数の手法を比較する形で数値検討し、従来の電気技術に比べて大きな優位性があることを見出した。

また、シリコンフォトニクス技術を使って光演算器回路動作を目指して、必要となる基盤デバイス技術および光集積技術の開発を進めた。

代表的な原著論文

[1] K. Takata and M. Notomi, “PT-symmetric Coupled-Resonator Waveguide Based on Buried Heterostructure Nanocavities”, *Physical Review Applied* vol. 7, 054023 (2017) (Editor’s suggestion).

[2] K. Nozaki, S. Matsuo, A. Shinya and M. Notomi, “Amplifier-free Bias-free Receiver

Based on Low-capacitance Nano-photodetector”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* Vol. 22, 4900111 (2018).

[3] K. Nozaki, S. Matsuo, T. Fujii, K. Takeda, A. Shinya, E. Kuramochi and M. Notomi, “Forward-biased nanophotonic detector for ultralow-energy dissipation receiver”, *APL Photonics* vol. 3, 046101 (2018). (Editor’s picks)