

## 第15回青葉工学会賞



## 量子情報通信のための革新的単一光子制御デバイスの開発

東北大学大学院工学研究科  
通信工学専攻  
准教授 松田 信幸

量子暗号通信や量子計算に代表される「量子情報技術」は次世代の情報通信技術として世界的に大きな注目を集めている。当該技術の進展により、原理的に盗聴不可能な暗号通信や、現代コンピュータで解くことが困難な複雑な問題（組み合わせ問題、創薬計算など）を効率よく解くことのできる計算機が実現され、これにより超スマート社会の実現に向けた革新的情報処理基盤の創出が期待される。

量子情報技術において、光の量子である光子は、通信・計算をはじめとする様々な用途に用いることのできる極めて有用な情報媒体である。光を用いた量子情報研究のためには、単一光子等の量子的な（非古典的な）光を効率よく発生させる量子光源や、多数の光子の状態を巧みに操作して演算を行う量子演算回路が必要となるが、それらは従来の光学技術の延長で容易に実現できるものではない。我々は、光子の発生やその制御を行う技術や装置の小型化、高効率化、高機能化を目的とし、光量子情報デバイスの開発に取り組んできた。

光量子情報処理のための実験装置は、従来、光学テーブル上にビームスプリッタ、波長板、ミラー等の光学素子を用いて作製されていた(図1) [1] が、装置のサイズが大きいこと、装置動作が振動に弱いことなどから、大規模化が困難であった。そこで、半導体シリコンチップ上に製造可能なシリコンや石英からなる微小な光導波路回路を用い、装置や素子のオンチップ集積化を実施した [2-7]。

量子演算回路の構築のためには、従来、長い準備期間と専用の光学設計スキルを要した。この課題を解決するため、我々は、光導波路回路技術を用い、任意の光量子演算回路を実現可能な万能ハードウェアである「ユニバーサル光量子回路」を開発した [2]。この光回路は、外部から入力する電気信号の組合せを適宜プログラムすることで、電気回路のFPGA (Field-programmable gate array) のように、所望の光回路へと組み替えることができる。この回路の実現により、量子演算回路構築にかかる時間が数週間から数秒へと大幅に短縮され、光量子情報処理研究の大幅な加速をもたらした。実験においては約1000通りの回路パターンを実装し、量子論理ゲート回路、量子もつれ回路、量子計算回路といった様々な量子演算回路として動作させることに成功した。また本デバイスは、量子計算に限らず、光を用いた演算技術（例えば機械学習計算）一般に用いることが可能である。

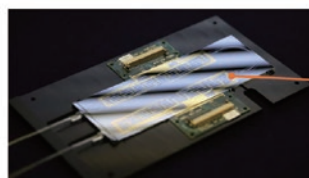
量子光源について、長さ1 cm程度のシリコン光導波路中

の非線形光学効果を用いることで、単一光子を発生させることが可能である。我々はこの技術を拡張し、偏光量子もつれ光子対と呼ばれる光波を発生する装置をチップ状に小型集積化することに初めて成功した [3]。量子もつれとは、離れた2つ以上の粒子の間の量子的な相関のことである。量子もつれ光源は様々な量子実験のための基本的なツールであり、その小型化が待ち望まれていた。我々は、2本のシリコン光導波路と偏波回転素子を組み合わせた独自設計の素子を提案・試作し、高い忠実度の量子もつれ光子対を発生することに成功した。また、シリコン導波路にフォトリソニック結晶構造を導入し、導波路を伝搬する光の速度を1/100程度に遅くする（スローライト効果）ことで、光と物質の相互作用を大幅に増強し、単一光子発生効率（導波路単位長さあたり）を約100倍に増強することに成功した [4]。他、光量子情報処理の必須技術である単一光子の波長変換について、常に光子損失の生じない新手法を提案し、光ファイバを用いてその実証に成功した [5]。これら一連の研究は、光量子情報デバイスの高度化に寄与した。

従来の光量子情報処理装置



シリコンチップ上に集積化



構成要素 (光干渉計)

位相シフタ(薄膜ヒータ等)

シリコン光導波路

ビームスプリッタ

図1 光量子情報処理装置のオンチップ集積化

- [1] N. Matsuda *et al.*, Nat. Photon. 3, 95 (2009).
- [2] J. Carolan *et al.*, Science 349, 711 (2015).
- [3] N. Matsuda *et al.*, Sci. Rep. 2, 817 (2012).
- [4] N. Matsuda *et al.*, Nanophotonics 5, 440 (2016).
- [5] N. Matsuda, Sci. Adv. 2, e1501223 (2016).
- [6] A. Peruzzo *et al.*, Science 329, 1500 (2010).
- [7] C. Sparrow *et al.*, Nature 557, 660 (2018).