



丸文研究奨励賞 受賞者

松田 信幸
東北大学 大学院工学研究科
准教授

光導波路素子を用いた 量子情報デバイスの集積化と高機能化

光の集積回路を用いて量子の世界を切り拓く

研究の背景

量子情報処理は、究極的に安全な暗号通信や、創薬や材料開発といった重要分野における高効率な計算技術を提供するため、次世代の情報処理技術として注目を集めている。中でも光の量子である光子を用いた方式は、室温での動作や遠距離通信が可能であることに加え、最近では現代コンピュータよりも高速な量子計算（量子超越性）が実験的に示される等、きわめて優れた方式の一つである^[1]。

しかしながら、光学テーブル上に従来作製されてきた量子情報処理装置は大型かつ不安定であり、大規模化が困難であった（図1a）^[2]。そこで本研究では、光通信デバイスとして構築されてきたシリコン光導波路、石英系平面光波回路、光ファイバ等の小型光導波路素子を量子情報デバイスへと応用し、システムのチップ集積化や小型安定化、高機能化を図った（図1b）。

研究の成果

1. 万能光量子回路

（ユニバーサル線形光学回路）の実現

光量子計算のための演算装置として、光子の量子的干渉を制御するための大規模な干渉回路が広く用いられる。そのような光干渉回路は、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（線形光学素子）を用いて作製される（図1a）。しかし、装置が大型であることや、干渉計動作が振動に対して不安定であるといった課題があった。また、目的に応じて複雑な光回路を都度構築する必要があり、そのためには専門的な光学系設計技術や、ときに数週間～数か月程度の長い準備期間を要した。そこで本研究では、光導波路回路技術を用い、任意の光干渉回路を実現可能な万能光量子回路（ユニバーサル線形光学回路）を実現した（図2）^[3]。この光回路は、外部から入力する電気信号の組み合わせを適宜

プログラムすることで、電気回路のFPGA（Field-programmable gate array）のように回路構成を自在に組み替えることができるものである。この光回路の実現により、実験系の構築時間が数秒へと大幅に短縮されるとともに、スキルフリー性のため理論研究者ですら実験を直接行うことが可能となった。実験においてはおよそ1,000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^[3,4]。この万能回路の設計は1994年に提案されていたが、技術的要求水準が高く実現されていなかった。本研究では、成熟した商用光導波路回路技術を適用することで、高い動作精度とともに当該回路を実現することに成功した。また本デバイスは、量子情報分野にとどまらず、古典的光情報処理や光通信等、光エレクトロニクス分野全般において広く応用が可能である。

2. 量子光源のチップ集積化と高効率化

2022年のノーベル物理学賞は量子もつれの研究者に贈られた。量子もつれとは複数粒子の状態間の非局所的な相関のことである。量子もつれ状態にある光子を発生する量子もつれ光源は様々な量子情報実験のための基本的なツールである。本研究では、特によく用いられている光子の偏光状態に関する量子もつれを発生する素子を、シリコンチップ上に超小型化することに初めて成功した（図3a）^[5,6]。この素子は、光子対と呼ばれる非古典的な光のペアを高効率に発生するシリコン光導波路と、光波の偏光を操作するシリコン偏波回転素子からなる独自の設計に基づく。実験の結果、本デバイスから高い水準の量子もつれ光子対を発生することに成功した。

図1 (a)従来の光量子情報処理装置と、その(b)チップ集積化のイメージ



図2 万能光量子回路（ユニバーサル線形光学回路）

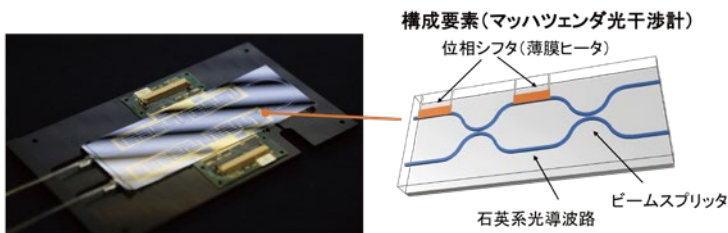
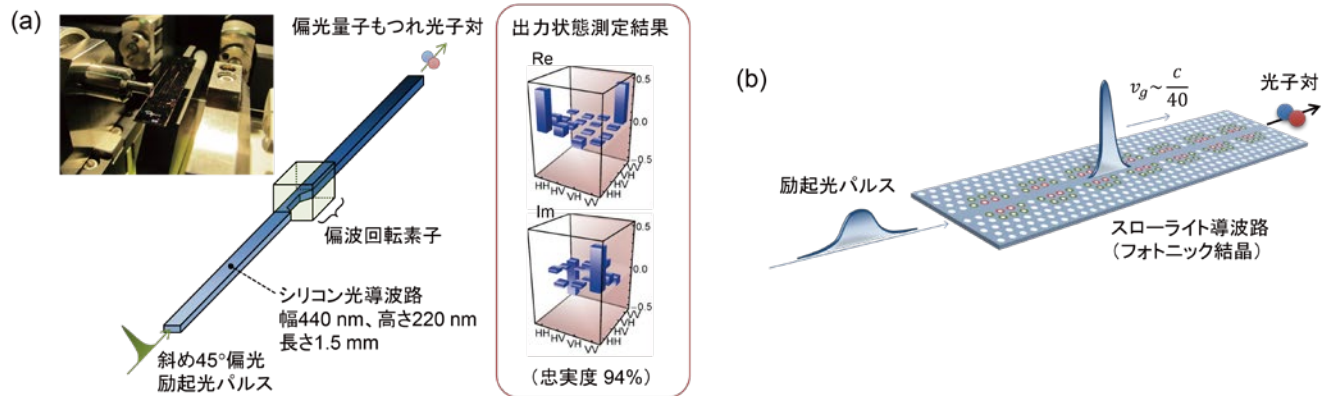


図3 量子光源のオンチップ化 (a)偏光量子もつれ光源 (b)スローライト導波路による高効率光子対源



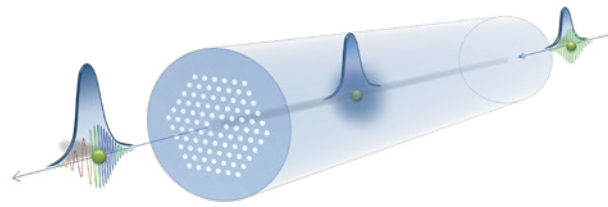
加えて、シリコン光導波路の光子発生効率自体を向上する研究も実施した。シリコン導波路にフォトニック結晶と呼ばれる構造を導入し、光の伝搬速度を真空中の1/40に遅くしたスローライト導波路を作製した(図3b)。スローライト効果により、励起光が導波路中のシリコンと相互作用する時間が長くなり、これにより光と物質の相互作用を大幅に増強することができる。本研究では、導波路単位長さあたりの光子対発生効率を、従来より約2桁向上することに成功した[7]。ほか、高非線形な二次元材料であるグラフェンから光子対を発生することにも初めて成功している[8]。

3. 無損失単一光子波長変換器の

提案と実証

量子情報処理の要素技術である単一光子の波長変換について、それまで実現されていなかった常に効率100%での(光子損失のない)変換手法を初めて提案し、実証した(図4)[9]。光ファイバ伝送路中で光信号のスペクトルや時間波形を歪ませる原因である「相互位相変調」と呼ばれる非線

図4 フォトニック結晶ファイバを用いた無損失単一光子波長変換



形現象の決定論性に注目し、同現象を単一光子波長変換に適用することで、決定論的な光子波長変換器を実現した。

将来の展望

本研究では、光通信産業で培われた成熟した光導波路デバイス技術を量子情報分野に適用することで、デバイスの小型集積化に加え、従来技術では実現が困難であった機能性や拡張性を実現することに成功した[3-9]。現在、これらデバイスを一体化した量子情報処理システムの構築に向けた研究を実施している。しかしながら、光導波路を用いることで、自由空間中比べて光の伝搬損失が増加するといった新たな

課題も生じる。そのような課題の解決に向け、今後は光導波路の性能を「成熟」のさらに先へと発展させることが必須であり、その取り組みが世界的に始まっている。さらなる研究の進展により、量子情報処理が困難な実問題を解決することができれば、超スマート社会にむけた革新的な情報処理技術となることが期待される。

謝辞

本研究は多くの方々のご支援、ご協力のもとに行われたものです。NTT物性科学基礎研究所、NTT先端集積デバイス研究所、東北大学、ブリストル大学をはじめとする国内外の研究機関の共同研究者の皆様深く御礼申し上げます。

References(参考文献)

- [1] E. Pelucchi, G. Fagas, I. Aharonovich, D. Englund, E. Figueroa, Q. Gong, H. Hannes, J. Liu, C.-Y. Lu, N. Matsuda, J.-W. Pan, F. Schreck, F. Sciarrino, C. Silberhorn, J. Wang, K. D. Jöns, Nature Rev. Phys. 4, 194 (2022).
- [2] N. Matsuda, R. Shimizu, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, Nature Photonics 3, 95 (2009).
- [3] J. Carolan, C. Harrold, C. Sparrow, E. Martín-López, N. J. Russell, J. W. Silverstone, P. J. Shadbolt, N. Matsuda, M. Oguma, M. Itoh, G. D. Marshall, M. G. Thompson, J. C. F. Matthews, T. Hashimoto, J. L. O'Brien, A. Laing, Science 349, 711 (2015).
- [4] C. Sparrow, E. Martín-López, N. Maraviglia, A. Neville, C. Harrold, J. Carolan, Y. N. Joglekar, T. Hashimoto, N. Matsuda, J. L. O'Brien, D. P. Tew, A. Laing, Nature 557, 660 (2018).
- [5] N. Matsuda, H. Le Jeannic, H. Fukuda, T. Tsuchizawa, W. J. Munro, K. Shimizu, K. Yamada, Y. Tokura, H. Takesue, Sci. Rep. 2, 817 (2012).
- [6] N. Matsuda, H. Takesue, Nanophotonics 5, 440 (2016).
- [7] N. Matsuda, H. Takesue, K. Shimizu, Y. Tokura, E. Kuramochi, M. Notomi, Opt. Express 21, 8596 (2013).
- [8] Y. Yonezu, R. Kou, H. Nishi, T. Tsuchizawa, K. Yamada, T. Aoki, A. Ishizawa, N. Matsuda, Opt. Express 27, 30262 (2019).
- [9] N. Matsuda, Science Advances 2, e1501223 (2016).