

実用化研究報告書

光導波路素子を用いた量子情報デバイスの開発

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

次世代の情報処理技術として量子情報処理が注目されている。量子情報処理は、量子重ね合わせや量子もつれといった量子の性質を活用した情報処理で、古典計算機よりも高速なコンピューティングや、物理法則に基づく原理的に安全な暗号通信といった革新的技術を提供する。量子情報の担い手としていくつかの候補があるが、なかでも光量子は、室温中での量子演算や、演算モジュール間の通信等を可能とするため、大きく注目されている。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。我々は、光通信用途に開発されてきたシリコン光導波路等の小型光導波路素子を量子情報デバイスへと応用し、それらをシリコンチップ上へ小型集積化する研究を行っている(図 1)[1]。本研究においては、量子情報処理デバイスの中で核となる光干渉回路のさらなる小型化を試みた。



図 1 光量子情報処理用実験装置のチップ集積化

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必要となる。そのような回路をプログラマブル光干渉回路と呼び、特に任意の光干渉計を実現可能なものを万能プログラマブル光干渉回路と呼ぶ。我々は万能プログラマブル光干渉回路を世界で初めて実現している。

万能プログラマブル光干渉回路とは次のようなものである。従来、量子計算用の光干渉回路は、光学テーブル上にビームスプリッタや波長板、ミラー等の光学素子を用いて構築されていた。しかし、装置が大型であることや、回路動作が振動や温度変化に対して不安定であることから、その大規模化が困難であった。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アライメント技術や、ときに数か月程度という長い準備期間を要した。そこで我々は、光導波路回路を用い、任意の光干渉回路を実現可能な万能プログラマブル光干渉回路を実現した(図 2)[2]。この光回路は、電気回路の FPGA(Field-programmable gate array)のように

光に対する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、実験技術を持たない理論研究者ですら量子光学実験を実施できるようになった。また本デバイスは、量子情報分野[3]にのみとどまらず、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されている。

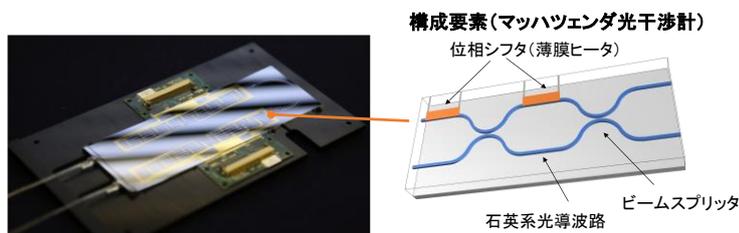


図 2 万能プログラマブル光干渉回路

しかし、万能プログラマブル光干渉回路には、回路規模とともに必要なデバイス面積が増大するという課題があった。そこで今回我々は、回路面積を従来の約半分に縮小できる新たな回路設計方式の動作実証に成功した[4]。回路面積圧縮の概念図を図 3 に示す。いずれも回路の基本単位は 2 入力 2 出力のマッハ・ツェンダー干渉計である。新方式ではマッハ・ツェンダー干渉計の両アームに位相シフタを配置することにより、干渉計外にある位相シフタ(External 位相シフタ)を除去し、光波の伝搬方向について位相シフタ段数を圧縮できる。実験では、旧方式、新方式のいずれの方式にも対応できるよう作製した万能プログラマブル光回路を用い、同一のユニタリ変換行列をそれぞれの方式を用いて逐次実装した。その結果、いずれの方式においても 99%以上という高い忠実度での行列実装に成功した[r4]。これにより新方式の旧方式との等価性を実証することができた。

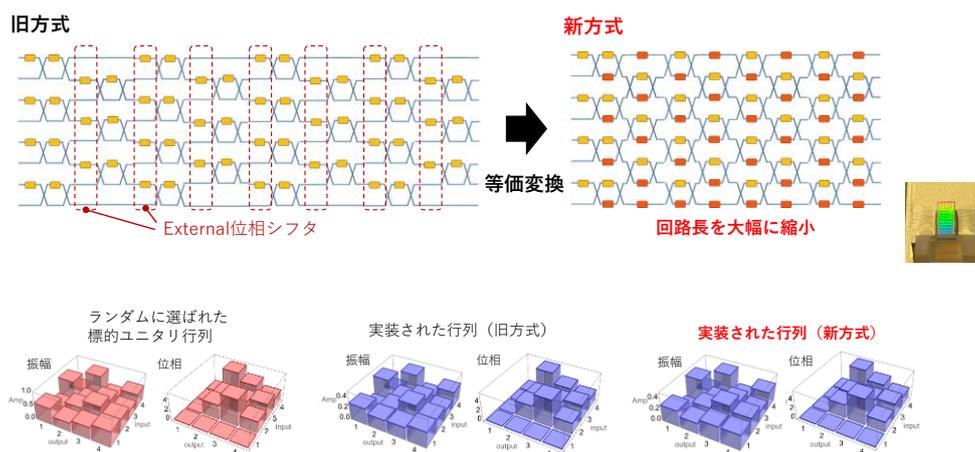


図 3 光回路レイアウトの改善による万能プログラマブル光干渉回路の回路面積圧縮方法とその動作検証結果

その他、量子光源の特性改善も試み、種々の成果を得た[5]。特に、近年注目されているガウシアンボゾンサンプリングという方式の量子計算に必須となる、1 モード真空スクイーズド光源と呼ば

れる量子光源の性能向上を達成した。具体的には、非線形光学媒質内で真空スクイーズド光を発生するための 2 波長光パルス光源の発生方法および波長フィルタリング方法を最適化し、光源雑音を大幅に低減した。その結果、従来報告の 10 倍以上高い非古典的性を示す高純度な真空スクイーズド光の発生に成功した。

今後の展望

主に光通信産業で培われ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性能や機能を達成した。今後はこれらデバイスを一体化した量子計算機の構築に向け、研究を継続する予定である。さらに研究を進展させ、実問題を高速に解決できるような革新的な情報処理装置の実現を目指したい。

謝辞

本研究の遂行にあたり、共同研究者の皆様、並びに本研究助成を賜りました公益財団法人インテリジェント・コスモス学術振興財団および関係者の皆様に、厚く御礼申し上げます。

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, *Nat. Rev. Phys.* **4**, 194 (2022).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] T. Odagawa, K. Sakaino, S. Kimura, T. Inagaki, H. Tang, K. Tanizawa, K. Ikeda, M. Okano, M. Takenaka, H. Yamada, N. Matsuda, *CLEO/Europe-EQEC 2023*, CK-8.2.
- [5] N. Matsuda, *Photonics Review* **2022**, 202205 (2022).