

通信波長帯 5 バンドにまたがる超広帯域オンチップ量子もつれ光源を実現

—量子技術の飛躍的な高性能化が期待—

概要

電子や光子などの量子は、通常の物体とは異なったふるまいをします。その量子の個々のふるまいや相関（量子もつれ）を制御することで、飛躍的な計算能力を実現する量子コンピューターや、盗聴不可能な暗号を実現する量子暗号、さらに、従来の計測技術の限界を超える量子センシングなど、「量子技術」の研究が精力的に進められています。その中でも、光子は、長距離伝送が可能で、また室温でも量子状態が保存されるため、有力な担体です。

今回、京都大学大学院工学研究科 竹内繁樹 教授、岡本 亮 同准教授、濱山友志 同修士課程学生（研究当時）らの研究グループは、香港城市大学、QXP Technology Inc.の共同研究グループとともに、光子が、さまざまな波長（色）の対となった「量子もつれ」状態を、集積化可能な「半導体チップ」として、光通信で主に用いられる 6 つのバンドのうち、5 つのバンドにまたがる世界最大の波長域（従来比で 3 倍以上）で実現することに成功しました。今回実現した光源は、光量子コンピューターや、量子暗号の高度化、また光量子センシングなどの集積化（チップ化）にブレークスルーをもたらすものです。

本成果は、2025 年 7 月 1 日に米国の国際学術誌（「APL Photonics」）にオンライン掲載されました。

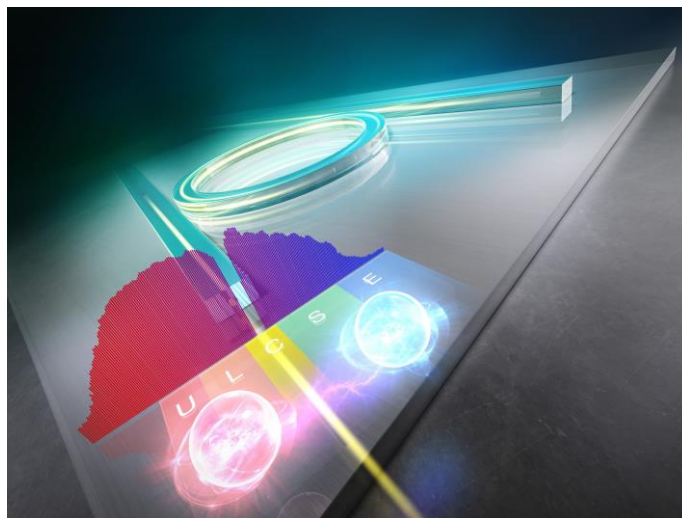


図 1 超広帯域オンチップもつれ光源のイメージ図

1. 背景

電子や光子などの量子は、通常の物体とは異なったふるまいをします。その量子の個々のふるまいや相関（量子もつれ）を制御することで、飛躍的な計算能力を実現する量子コンピューターや、盗聴不可能な暗号を実現する量子暗号、さらに、従来の計測技術の限界を超える量子センシングなど、「量

子技術」の研究が精力的に進められています。その中でも光子は、長距離伝送が可能で、また室温でも量子状態が保存されるため、有力な担体です。特に、光のさまざまな波長（色）の対となった「量子もつれ」光源の活用が注目されています。これまでに、「量子もつれ」光源の発生方法としては、特殊な石（非線形光学結晶）において生じる非線形光学効果が用いられてきました。ただこの方法では、非線形光学結晶の大きさが数 cm 程度と大きく、また一般的に集積回路の作製にもちいられているシリコン半導体素子ともその作製方法も大きく異なっているため、小型化、集積化が困難でした。

一方、光通信では、現在、光ファイバの損失が小さい、波長 1260nm~1675nm の帯域が利用されています。私たちは、この通信波長帯域の量子もつれ光源を、集積化可能な「半導体チップ」として、世界最大の波長域とモード数で実現していました (Optics Express 29, 4821 (2021))。しかし、その帯域幅は 105.3nm と、通信波長帯域のごく一部に留まっており、その帯域の拡大が望まれていました。

2. 研究手法・成果

今回、高度に設計されたリング共振器を用いる事で、さらなる広帯域化を実現しました。光子発生用の素子としては、高屈折率コントラストガラスとよばれる材料を利用して作成されたリング共振器付き導波路を用いました。この素子は、一般的なシリコン半導体素子を作成するのと同じプロセス・装置で作製することが可能です。リング共振器の直径は約 0.27mm です。この共振器に、波長 $1.55\mu\text{m}$ (マイクロメートル、マイクロは 100 万分の 1) のレーザー光 (ポンプ光) を入射すると、非線形光学効果により、ポンプ光の 2 つの光子が、そのエネルギーの和が保存される形で、別の 2 つの光子 (シグナル光子とアイドラー光子) に変換されます。シグナル光子とアイドラー光子の対がどのような波長の組み合わせで発生しているかを確認するために、特定の波長の光子を非常に広い帯域から高い精度で選びだすことができるシステムを構築しました。

その結果、シグナル光子、アイドラー光子の対として、世界記録を更新、1394.0 nm から 1745.9 nm までの、帯域幅 351.9 nm、(nm は 10 億分の 1 メートル) の帯域、212 の共振モードに渡って発生させることに成功しました。この発生帯域は、光通信で用いられる 6 つのバンド (O, E, S, C, L, U バンド) のうち、5 つのバンド (E, S, C, L, U バンド) にわたるものです。また、同種のリング共振器を利用した半導体素子による、我々自身の達成していた従来の最大の値 (それぞれ 105.3nm, 84 の共振モード, Optics Express 29, 4821 (2021)) を大きく更新するものです。

3. 波及効果、今後の予定

さまざまな波長（色）の対となった「量子もつれ」光源は、眼底の診断などに用いられている光断層撮影装置の超高分解能化や、可視の光源と検出器により赤外領域分光を可能にする「量子赤外分光」の光源として期待されています。また、特に、今回実現した、非常に幅広い帯域をもつ通信波長帯の量子もつれ光は、量子暗号通信の鍵伝送レートの増大や長距離化、光量子コンピューターの高度化に貢献すると期待されます。今後は、超広帯域もつれ光の制御技術の開発を進め、この光

源を実装した、量子暗号や量子ネットワークなどの光量子通信や、光量子センシングなどの量子技術への応用を目指します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP、JPMXS0118067634）、ERATO「竹内超量子もつれ」（JPMJER2402）等の支援を受け、香港城市大、QXP Technology Inc.と共同で実施しました。

<用語解説>

量子もつれ：量子もつれあい（Quantum Entanglement）とは、2つの異なるシステム間で相関した状態が2つ以上あり、それらが（量子において複数の状態が同時に成立する）量子重ね合わせ状態にあることを言います。たとえば今回の研究では、発生した光子の対が、「一方が1500nmで他方が1600nm」の状態の他、「一方が1510nmで他方が1590nm」など、多数の相関した状態を、量子重ね合わせ状態として同時に取って出力されます。

光導波路：光をある一定の空間に閉じ込めて伝送する線路のこと。光ファイバも光導波路の一種。本研究では、シリコンチップ上の薄膜に形成された線路を光が伝わります。リング共振器（上述の光導波路を、円形（リング）にしたデバイス。ちょうどそのリングの周回が波長の整数倍になるような波長で共振し、多数回周回（本デバイスでは100万回以上）することとなり、光強度が増強される。

ポンプ光：非線形光学効果を引き起こすために導入されるレーザー光のこと。

非線形光学効果：入射光の振幅に比例せず、2乗以上の高次の効果が現われる光学現象のこと。

シグナル光子・アイドラー光子：本研究では、3次の非線形光学効果による、4光波混合効果（原理的に4つの光子が関与する物理過程）により、ポンプ光に含まれる2つの光子が、エネルギー保存則のもとで、異なる2つの光子シグナル光子とアイドラー光子と呼ばれる）に変換される。

共振モード：共振器において、共振が生じる特定の波長のこと。論文中の図1(b)にある素子の透過スペクトルでは、多数の共振モードが観察される。

<研究者のコメント>

国連は2025年を、量子力学誕生100周年を記念し「量子科学技術年」としました。その象徴的な年にふさわしく、量子コンピューティング、量子通信そして量子センシングといった様々な量子技術が急速に発展しています。今後も私たちは、量子もつれをはじめとする量子の不思議な性質を利用した、従来の限界を超える技術の研究を、学生、スタッフと共に推進します。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Ultra-broadband photon pair generation on CMOS-compatible chip

(CMOS 互換チップ上での超広帯域光子対生成)

著者：濱山友志 (京大)、杉浦健太 (京大)、後藤啓文 (京大)、中村 暖 (京大)、Xiaotian Zhu (香港城市大), Sai Tak Chu (香港城市大), Brent E. Little (QXP Technology Inc.), 岡本 亮 (京大)、竹内繁樹 (京大)

掲載誌：APL Photonics DOI：https://doi.org/10.1063/5.0253731

<研究に関するお問い合わせ先>

竹内繁樹 (たけうちしげき) 京都大学
 大学院工学研究科・教授
 TEL：075-383-2286 (090-5076-3694)
 E-mail：takeuchi@kuee.kyoto-u.ac.jp

<報道に関するお問い合わせ先>

京都大学 広報室 国際広報班
 TEL：075-753-5729 FAX：075-753-2094
 E-mail：comms@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp

<参考図表>

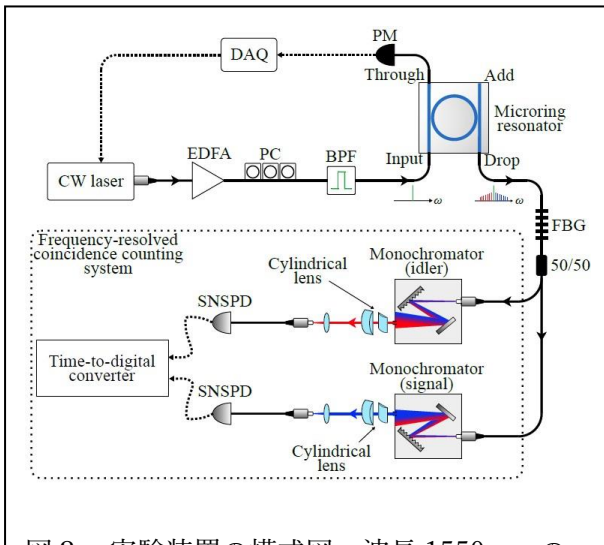


図2 実験装置の模式図。波長 1550nm の励起用レーザー光を、リング共振器の Input に入力、素子の Drop から出力される光子対を、長波長側と短波長側のそれぞれで、独自に構築した広帯域な分光システムで選別し、2 台の超伝導光子検出器 (SNSPD) で検出します。その検出時刻を解析する装置 (Time-to-digital converter) によって、同時に発生した光子対を記録します。

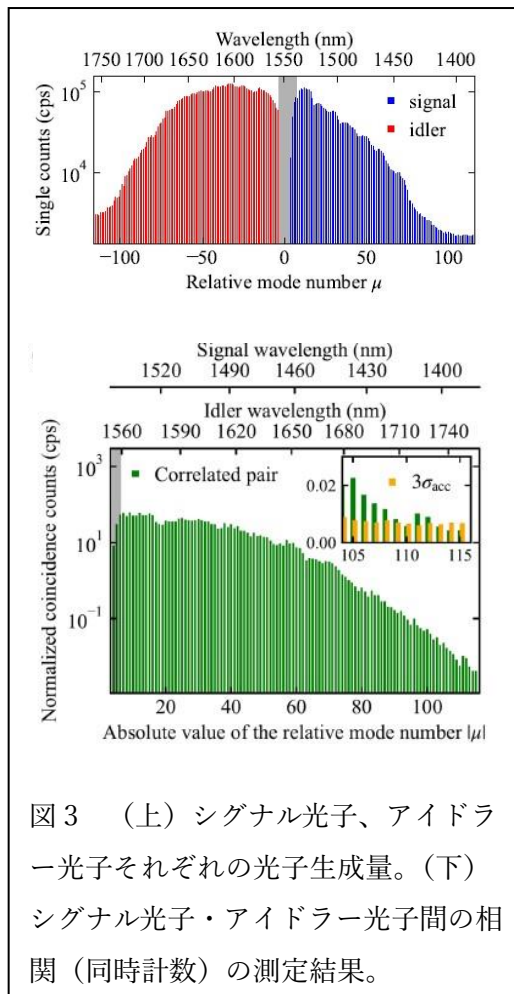


図3 (上) シグナル光子、アイドラー光子それぞれの光子生成量。(下) シグナル光子・アイドラー光子間の相関 (同時計数) の測定結果。