

集積化可能な量子もつれ光源を実現

—量子センシング、量子通信装置の飛躍的な小型化が期待—

概要

電子や光子などの量子は、通常の物体とは異なった振るまいをします。その量子の個々の振るまいや相関(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、杉浦健太 同博士課程学生、殷政浩 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、南京大学、中国科学院ら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、光通信で最も良くもちいられる波長域において、同種の素子において世界最大の波長域とモード数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、2020年6月4日に米国の国際学術誌「Applied Physics Letters」にオンライン掲載されました。

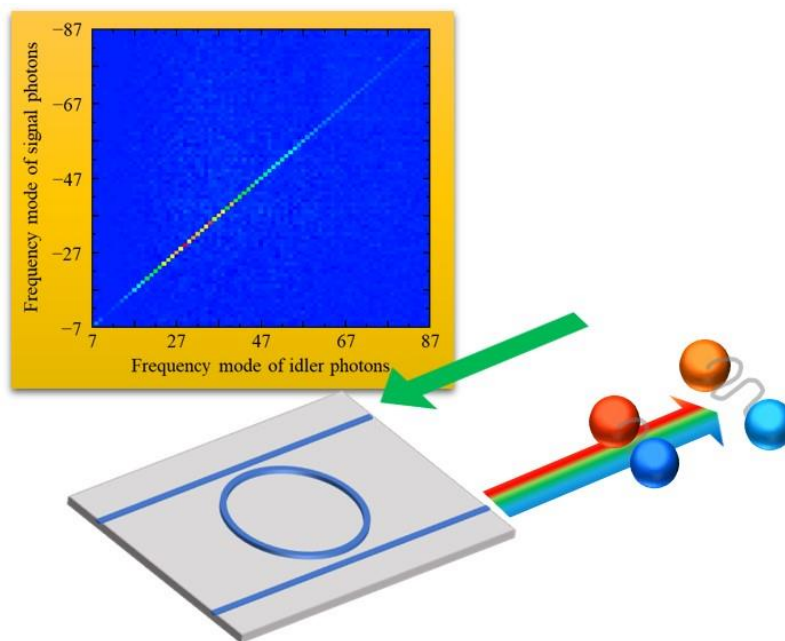


図1 集積可能な半導体素子量子もつれ光源のイメージ図

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振るまいをします。その量子の個々の振るまいや相関(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、光のさまざまな波長(色)の対となった「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。

2. 研究手法・成果

本研究では、光子発生用の素子として、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した光導波路によって作成されたリング共振器を用いました。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 1.2mm です。高品質なリング共振器を用いる事で、高効率化が可能になりました。

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)を照射すると、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。今回、そのシグナル光子、アイドラー光子の対として、既報告値で最大の 23.6nm (ナノメートル、ナノは 10 億分の 1) の帯域、59 の共振モードに渡って発生させることに成功しました。これらは、同種のリング共振器を利用した半導体素子による、従来の最大の値(それぞれ 16nm, 40 の共振モード)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、可視の検出器により赤外領域分光を可能にする「量子吸収分光」の光源として期待されています。また、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リソースとしても期待されています。今回の、集積化可能な量子もつれ光源の実現は、たとえば将来的にはスマートフォンへの実装など、これらのさまざまな応用機器の飛躍的な小型化に貢献すると期待されます。

今後は、今回実現した帯域のさらなる広帯域化、および高効率化を進め、この光源を実装した、光量子センシングを初めとする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、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業(CREST)、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)等の支援を受け、香港城市大、中国科学院、中国南京大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>

量子もつれ状態は、シュレーディンガーの提唱からまもなく 100 年を迎えます。今後も、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：Broadband generation of photon-pairs from a CMOS compatible device
(CMOS コンパチブル素子からの広帯域光子対発生)

著者：杉浦健太（京大）、殷政浩（京大）、岡本亮（京大）、L. Zhang（南京大）、L. Kang（南京大）、J. Chen（南京大）、P. Wu（南京大）、S. T. Chu（香港城市大）、B. E. Little（中国科学院）、竹内繁樹（京大）

掲載誌：Applied Physics Letters DOI：https://doi.org/10.1063/5.0009361

< 参考図表 >

