小さなエネルギーの励起光を用いて、
特定の色中心からの単一光子発生に成功
―ノイズが小さく良質な高効率単一光子源の実現に期待―

概要

超高速演算が可能な光量子コンピュータ（注 1）や盗聴不可能な暗号通信である量子暗号通信（注 2）などの実現には、光子をひとつひとつ発生させる単一光子源（注 3）が大変重要です。最近、単色性に優れた光子が室温で安定に発生する新たな光子源として、窒素とホウ素の層状物質である「六方晶窒化ホウ素（hBN）」（注 4）中の色中心（注 5）が注目されています。しかし、発光波長の異なる複数の色中心がほぼ同じ場所に存在する場合、発生する光子よりも大きなエネルギーで励起する従来の方法では、対象の色中心以外からの発光がノイズになることが重大な問題となっていました。

今回、京都大学大学院工学研究科 岡城勇大 修士課程学生、嶋﨑幸之介 同博士課程学生、鈴木和樹 同修士課程学生（研究当時）、向井佑 同助教、竹内繁樹 同教授と公立千歳科学技術大学 髙島秀聡 准教授からなる研究グループは、シドニー工科大学の共同研究グループとともに、発生する光子よりも小さなエネルギーの励起光を用いることで、特定の色中心から選択的に単一光子を発生させることに成功しました。また、この励起方法によりノイズとなる背景光子を低減できることも実証しました。

今回得られた結果は、室温で動作する良質な単一光子源への道を拓くものであり、光量子コンピュータや量子暗号通信、量子センサーの研究の飛躍的な発展に貢献すると期待されます。なお、本成果は、2024 年 9 月 5 日正午（米国東部時間）に米国化学会が発行する国際学術誌「*ACS Photonics*」にオンライン掲載されました。

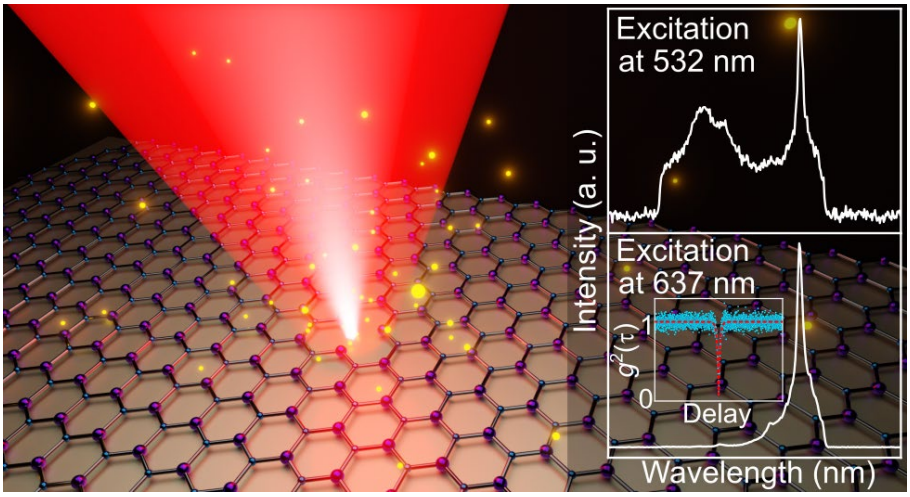

図 1　六方晶窒化ホウ素の色中心からの選択的励起のイメージ図

１．背景

「従来のコンピュータでは時間がかかりすぎて解けない問題が解ける」と期待される光量子コンピュータや、物理学的に安全性が保証される量子暗号通信などの実現には、光子をひとつひとつ発生させる「単一光子源」が重要です。この単一光子源を実現する物質として、窒素とホウ素が六角形の格子状に交互に規則正しく並んだ、原子の厚みしか持たない究極に薄い二次元の原子シートが層状に重なった「六方晶窒化ホウ素（hBN）」が関心を集めています。この hBN 内の原子をひとつだけ取り除いた色中心（欠陥中心）と呼ばれる構造は、単色性に優れた光子を室温で安定に発生する新たな光子源として、最近注目されています。

しかし、発光波長の異なる複数の色中心がほぼ同じ場所に存在する場合、発生する光子よりも大きなエネルギーで励起する従来の方法では、対象の色中心以外からの発光がノイズになり、単一光子源として機能しないことが重大な問題となっていました。

２．研究手法・成果

本研究では、通常とは異なり、色中心から発生する光子のエネルギーよりも、あえてエネルギーが小さい（波長が長い）光による励起により、特定の色中心から選択的に単一光子を発生させることに成功しました。また、この励起方法によりノイズとなる背景光子を低減できることも実証しました。

一般的に、色中心から光子を発生させる際には、発生光子よりもエネルギーが大きい（波長が短い）光を励起光として用います（図 2(a)）。しかし、hBN には、発光波長の異なる複数の色中心がほぼ同じ場所に存在する場合が多く、それら複数の色中心のうち、励起光よりもエネルギーの小さな光子を発生するものすべてが発光するため、単一の光子を発生させることが困難でした。

発生光子よりもエネルギーが小さい光では、一見、色中心を励起することはできないように思われます。しかし、hBN の原子の振動（フォノン（注 6））のエネルギーと組み合わせることにより、色中心を励起することが可能となります（図 2(b)）。このフォノンのエネルギー分布が限られているため、励起光とフォノンのエネルギーの和に一致する、特定のエネルギーの光子を発生させる色中心だけを、選択的に励起することが可能になります。このようにして、エネルギーの異なる複数の色中心が同じ場所に存在する場合にも、単一光子の発生が可能となります。

今回、比較のため、波長 532 nm（ナノメートル：ナノは 10 億分の 1）と波長 637 nm の 2 種類のレーザー光を励起光として用いました。これらのレーザー光を 100 倍の顕微鏡用対物レンズを用い、幅約 200 nm、高さ約 20 nm の hBN 粒子（ナノフレーク）に集光しました。そして、発生した光子の発光スペクトルを分光器で観測するとともに、2 つの単一光子検出器を使用して単一光子性を評価しました（図 3）。

発生光子よりもエネルギーが大きい、波長 532 nm のレーザー光で励起した場合、560 nm から 620 nm の広い帯域に、複数のピークを持つ幅広い発光が観測されました（図 4(a)）。一方、発生光子よりもエネルギーが小さい、波長 637 nm のレーザー光で励起すると、短波長側の発光ピークが大きく抑制され、615 nm のピークが顕著に観測されるようになりました（図 4(b)）。このように、エネルギーの小さな励起光を利用することにより、ノイズとなる背景光子が広いエネルギー範囲で低減できることも確認されました。

また、発生光子の単一光子性を評価したところ、遅延時間が 0 ns（ナノ秒）時の同時計数値が、波長 532 nm で励起した場合の0.53 ± 0.02から、発生光子よりもエネルギーが小さい波長 637 nm のレーザー光で励起した場合には0.08 ± 0.05まで小さくなりました（図 4(c)および(d)）。この同時計数値は、0.5 以下で単一光子源の条件を満たし、0 に近づくほどノイズの小さな良質の単一光子源であることを示します。また、温度を絶対温度 110 度から 260 度まで変化させた実験により、色中心からの発光強度が、hBN 中のフォノンの量に比例す

ることを確認し、励起光との光子のエネルギーとフォノンのエネルギーが組み合わさることで色中心の励起が行われていることも実証しました。このように、発生する光子よりも小さなエネルギーの励起光を用いることで、特定の色中心から選択的に単一光子を発生させることに成功しました。

３．波及効果、今後の予定

本成果は、単色性に優れた光子を室温で安定に発生するとして注目されている hBN の色中心について、発生する光子よりも小さなエネルギーの励起光を用いることで、特定の色中心から選択的に単一光子を発生させ、また、ノイズとなる背景光子を大幅に低減できることを実証したものです。このような良質な単一光子源は、従来のコンピュータよりも高速な計算処理が期待される、光子を用いた量子コンピュータの実現や、物理的に安全性が担保された秘密通信を実現する量子暗号通信の高度化にブレークスルーをもたらすものです。また、本手法は、固体量子センサーとして注目されているダイヤモンド中の色中心などの選択励起や低ノイズ化などへの応用も期待されます。

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)、科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR1674)、同 さきがけ （JPMJPR2257)、日本学術振興会（JSPS） 科学研究費助成事業（Nos. 24H00195, 21H04444, 26220712, 23K22426, 19K03686）等の支援を受け、シドニー工科大学と共同で実施しました。

＜用語解説＞

注１　光量子コンピュータ

光子を量子ビットとして利用する量子コンピュータ。量子コンピュータは、従来のスーパーコンピュータでは時間がかかりすぎて解けない問題を解けるとして期待されている。

注２　量子暗号通信

不確定性原理を利用した暗号通信技術。量子暗号通信では、盗聴されたことを完全に検知できるため、物理法則によって保証された安全な暗号通信を実現できる。

注３　単一光子源

光子をひとつずつ発生させる装置。

注４　六方晶窒化ホウ素（hBN）

窒素とホウ素が六角形の格子状に交互に規則正しく並んだ、原子の厚みしか持たない究極に薄い 2 次元の原子シートが層状に重なった物質。

注５　色中心

結晶中の原子が欠落した部位のことで、特定の波長の光子が発生する。カラーセンター(color center)や、欠陥中心(defect center)とも呼ばれる。

注6　フォノン（音子）

結晶内の原子の振動現象のこと。今回の場合は、結晶内で隣り合う原子が逆方向に振動する光学フォノンが、色中心の励起過程に関与している。

＜研究者のコメント＞

　今後は、本成果に基づき、光ファイバに結合された高効率単一光子源の開発を進めます。さらに光量子コンピュータや量子ネットワーク、光量子センシングの実現に向けた研究を推進します。

＜論文タイトルと著者＞

タイトル：Selective anti-Stokes excitation of a single defect center in hexagonal boron nitride （六方晶窒化ホウ素中の単一欠陥中心の選択的なアンチストークス励起）

著　　者：岡城勇大、髙島秀聡、嶋﨑幸之介、鈴木和樹、向井佑、Igor Aharonovich、竹内繁樹

掲 載 誌：*ACS Photonics*　DOI：未定

＜参考図表＞

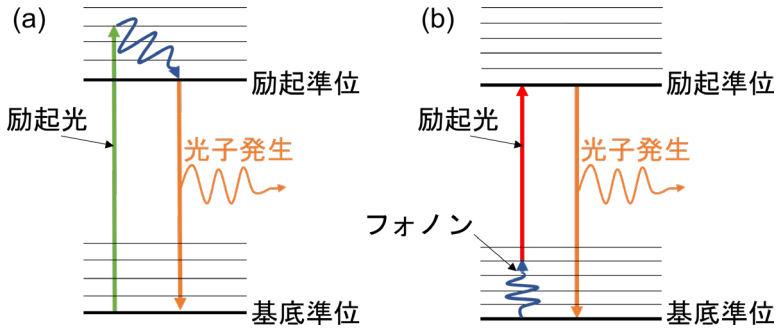

図 2（a）発生光子よりもエネルギーが大きい光を励起光として用いた場合。基底準位から励起準位に電子が直接励起され、電子が基底準位に戻る時に光子が発生します。（b）発生光子よりも励起光のエネルギーが小さい場合。この場合、励起光だけではエネルギーが足りませんが、結晶中のフォノンのエネルギーと合わさることで励起準位へと励起できるようになり、光子が発生します。

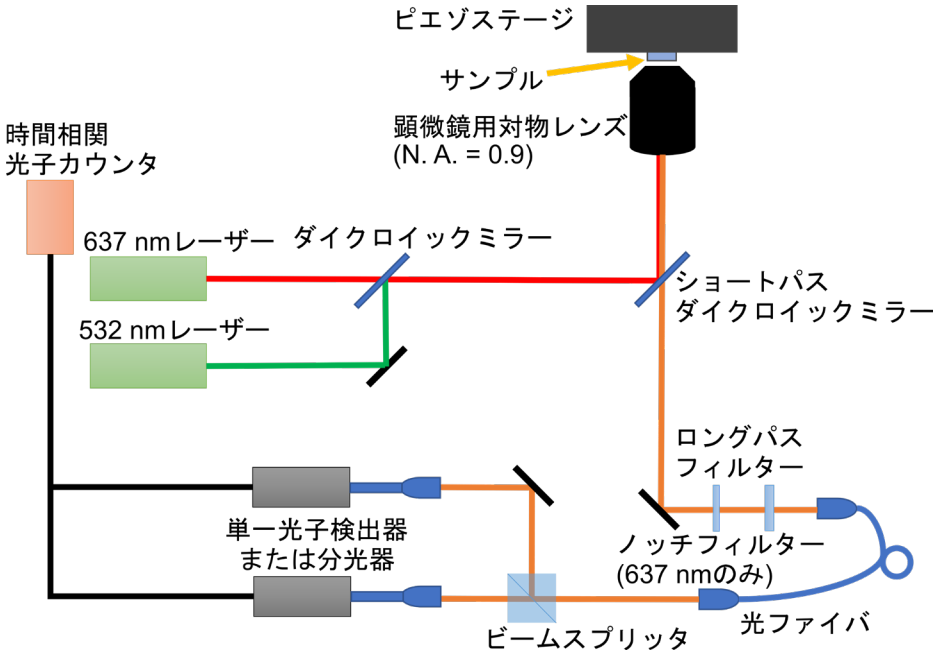

図 3　実験装置の模式図。波長 532 nm のレーザー光と波長 637 nm のレーザー光をダイクロイックミラーを使って重ね合わせ、顕微鏡用対物レンズでサンプルに集光した時に、同じ位置に集光されるようにしました。発生した光子は、同じ対物レンズで集光後、単一光子検出器もしくは分光器を用いて測定しました。

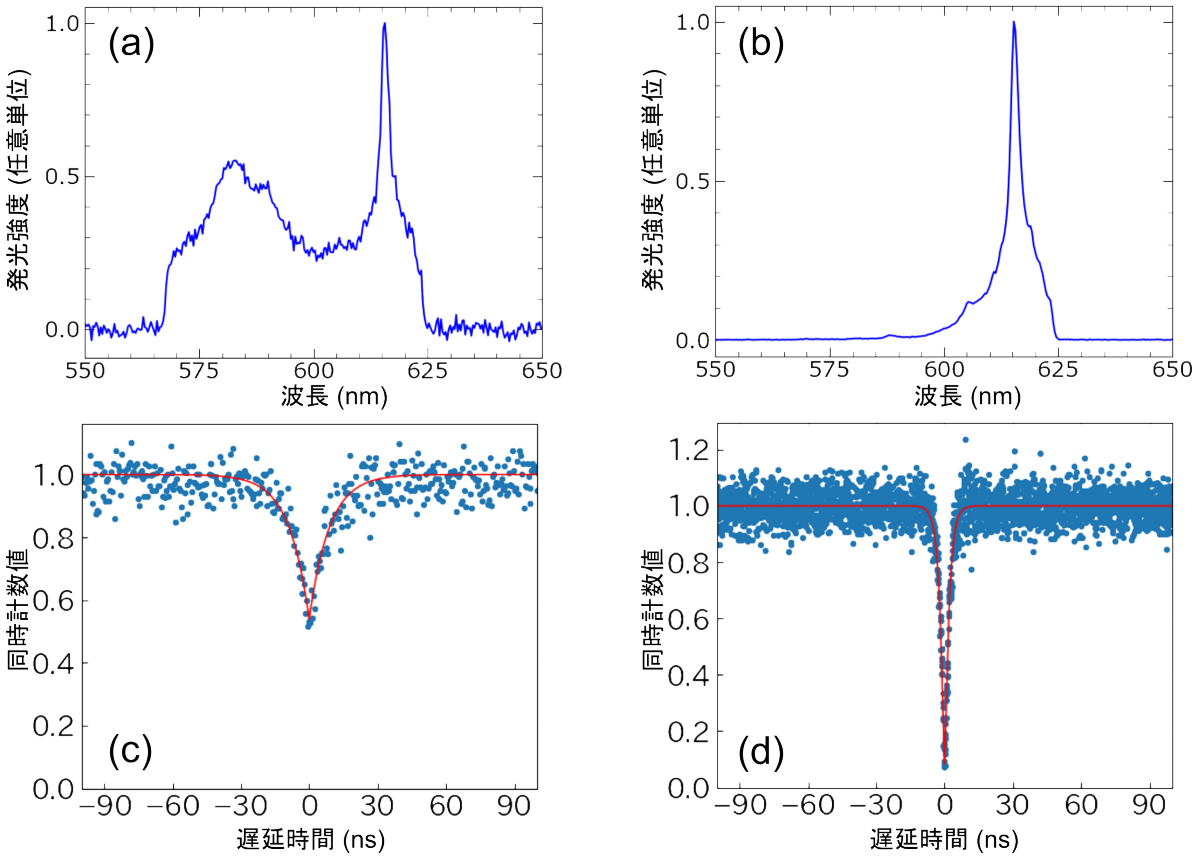

図 4 (a)および(b) それぞれ、波長 532 nm および波長 637 nm のレーザーで励起した場合の発光スペクトル。637 nm で励起した場合、532 nm で励起した際に観測された 580 nm 付近の幅広い発光が大きく抑制されました。(c) および (d) 光子の単一性を評価するための 2 次の強度相関測定の結果。波長 532 nm で励起した場合、遅延時間が 0 ns 付近の同時計数値は0.53 ± 0.02となり複数の色中心から光子が発生していることがわかりました。一方、波長 637 nm で励起した場合、同時計数値は0.08 ± 0.05まで減少し、複数の色中心が含まれる場合でも単一光子源として動作していることがわかりました。