

# 新規単一光子源「六方晶窒化ホウ素」からの、光子の射出方向を解明 —室温動作高効率単一光子源の実現にむけて—

## 概要

超高速演算が可能な光量子コンピュータや盗聴不可能な暗号通信であ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の開発が重要です。最近、単色性に優れた光子を、室温で安定に発生する新たな光源として、窒素とホウ素の層状物質である「六方晶窒化ホウ素 (hBN)」が注目されています。このhBNから、どのような方向に光子が射出されるのかは、高効率な単一光子源の実現に非常に重要ですが、これまで明らかにされていませんでした。

今回、京都大学大学院工学研究科 高島秀聡 助教、丸谷浩永 同修士課程学生（研究当時）、石原奎太 同学部学生（研究当時）、嶋崎幸之介 同修士課程学生、田嶋俊之 同特定研究員、および竹内繁樹 同教授らの研究グループは、シドニー工科大学、ハノーファー大学らの共同研究グループとともに、特殊な偏光を持つレーザービームを用いて、hBNから発生した光子の射出方向を明らかにすることに成功しました。

今回の成果をもとに、hBNの方向を最適化し光ファイバと一体化させると、室温動作可能な、光ファイバから光子が発生する高効率単一光子源を実現できます。それにより、光量子コンピュータや量子暗号通信の研究の飛躍的な発展が期待できます。

本成果は、2020年7月16日に米国の国際学術誌「ACS Photonics」にオンライン掲載されました。

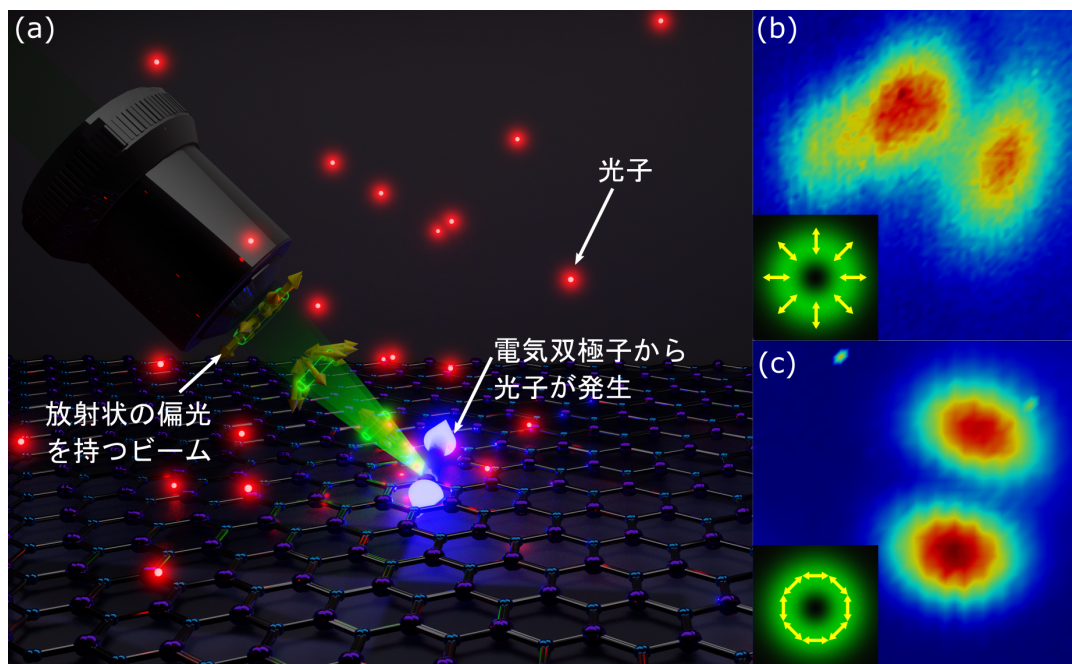


図 1 (a) 六方晶窒化ホウ素から発生した光子の方向推定のイメージ図。(b)放射状に偏光するビームで励起した場合の蛍光イメージ。(c) 円周方向に偏光するビームで励起した場合の蛍光イメージ。

## 1. 背景

超高速演算が可能な光量子コンピュータや、盗聴不可能な暗号通信であ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する「単一光子源」の実現が重要です。近年、これ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層状物質である「六方晶窒化ホウ素（hBN）」が注目されています。この hBN に、原子をひとつだけ取り除いた点欠陥と呼ばれる欠陥構造を導入すると、欠陥中に作られる正と負の電荷のペア（電気双極子）から単色性に優れる光子が、室温で安定に発生します（図 1(a)）。そのため、hBN は室温で動作する高効率単一光子源への応用が期待されていました。しかし、これまで、hBN から発生する光子が、どの方向に射出されているか明らかになっていませんでした。

## 2. 研究手法・成果

本研究では、特殊な偏光を持つレーザービームを用いて、hBN から発生した光子の射出方向を明らかにしました。通常の直線偏光のレーザービームでは、ビームの位置によらず偏光方向は一定です（図 2(a)）。一方、今回は、この直線偏光のビームとは異なり、ビームの中心から放射状に偏光するビーム（図 2(b)）と円周方向に偏光するビーム（図 2(c)）を用いました。これらのビームを用いて hBN を励起すると、直線偏光の場合ではひとつの輝点となる蛍光イメージが、電気双極子の向きによって敏感に変化します（図 3）。そのため、蛍光イメージのパターン解析によって、電気双極子の向きから光子の射出方向を明らかにすることができます。

今回、特殊な偏光光学素子を用いて、偏光方向が水平もしくは垂直の直線偏光のビームから、それら二つの特殊な偏光ビームを作りました（図 4）。それぞれの偏光ビームを、100 倍の顕微鏡用対物レンズを使い、幅約 200 nm（ナノメートル：ナノは 10 億分の 1）、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、発生した光子を、単一光子検出器で検出して発光イメージを測定し、理論結果と比較しました。その結果、測定した hBN ナノフレーク中の電気双極子はビームが進む方向から 83.5 度、垂直な面内で 163 度傾いていることがわかりました（図 5(c)）。また、いくつかの hBN ナノフレークについても測定を行った結果、電気双極子が平均で約 80 度傾いていることがわかりました。hBN ナノフレークから発生した光子は、これらの推定された電気双極子の向きと直交する方向に射出されていると考えられます。

## 3. 波及効果、今後の予定

本手法を用いて、hBN 中の向きを最適化し、光ファイバと一体化させると、室温で動作する光ファイバから効率良く光子が発生する単一光子源を実現できます。それにより、光量子コンピュータや量子暗号通信の研究の飛躍的な発展が期待できます。

また、hBN の点欠陥の構造は十分に明らかになっていませんでした。今回の測定結果は、点欠陥の構造に加え、hBN の吸収や発光に関する新しい知見を与えうる可能性があります。

さらに、分子やタンパク質など、細胞内の物質を hBN で標識し、本手法を用いて、電気双極子の方向を観察すると、それらの動きや位置、化学反応などを長期間にわたって可視化することができます。それにより、新しい生命現象の解明や、将来的には、創薬、再生医療、さらには、がんの超早期診断などにも貢献すると期待されます。

今後は、発光体の位置を制御する技術と組み合わせ、光ファイバとの一体化を実現し、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、シドニー工科大学、ハノーファー大学と共同で実施しました。

#### <研究者のコメント>

私たちの研究室では、一部を細く引き延ばした光ファイバに微細加工技術を用いて、小さな二枚の鏡を埋め込んだ特殊な光ファイバの開発を行っています。今後は、今回の手法を用い、電気双極子の向きを最適化しながら、この特殊な光ファイバとの一体化を進め、高効率な単一光子源の開発に関する研究を進めていきたいと考えています。

#### <論文タイトルと著者>

タイトル：Determination of the Dipole Orientation of Single Defects in Hexagonal Boron Nitride (六方晶窒化ホウ素中の単一結晶欠陥の双極子方向の決定)

著 者：高島秀聡、丸谷浩永、石原奎太、田嶋俊之、嶋崎幸之介、Andreas W. Schell、Toan Trong Tran、Igor Aharonovich、竹内繁樹

掲 載 誌：ACS Photonics DOI : <https://dx.doi.org/10.1021/acsphotonics.0c00405>

< 参考図表 >

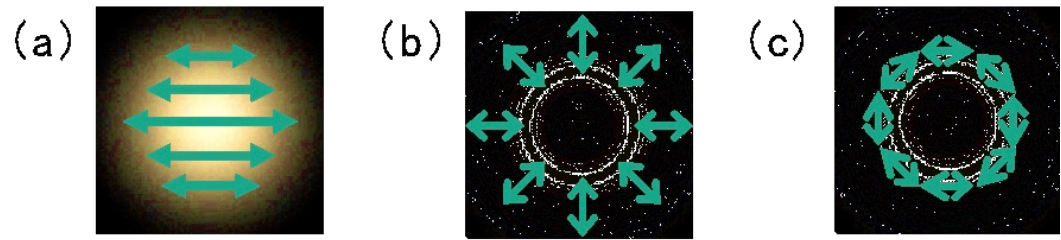


図 2 偏光方向のイメージ図。(a) 偏光方向（矢印）が一定の直線偏光ビーム。(b) ビームの中心から放射状の偏光を持つビーム（ラジアル偏光ビーム）。(c) ビームの円周方向の偏光を持つビーム（アジマス偏光ビーム）。

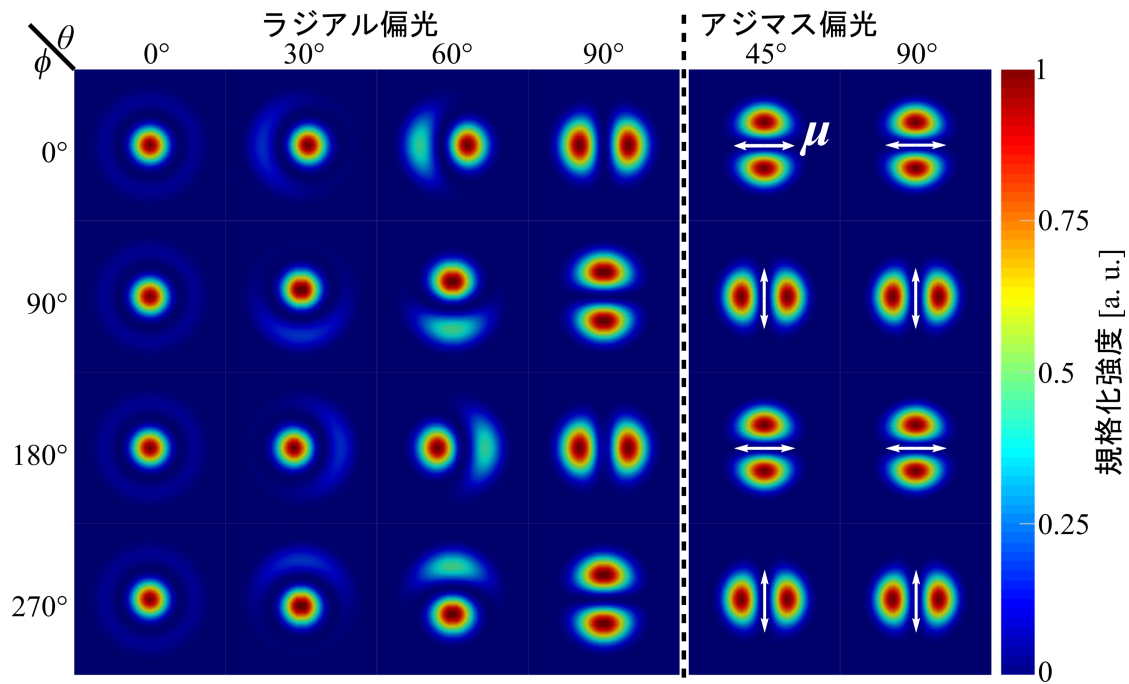


図 3 放射状の偏光を持つビーム（左側）と円周方向の偏光を持つビーム（右側）で励起した場合の蛍光イメージの計算結果。矢印の向きはビームの光軸と垂直な面内での電気双極子の向きを表す。

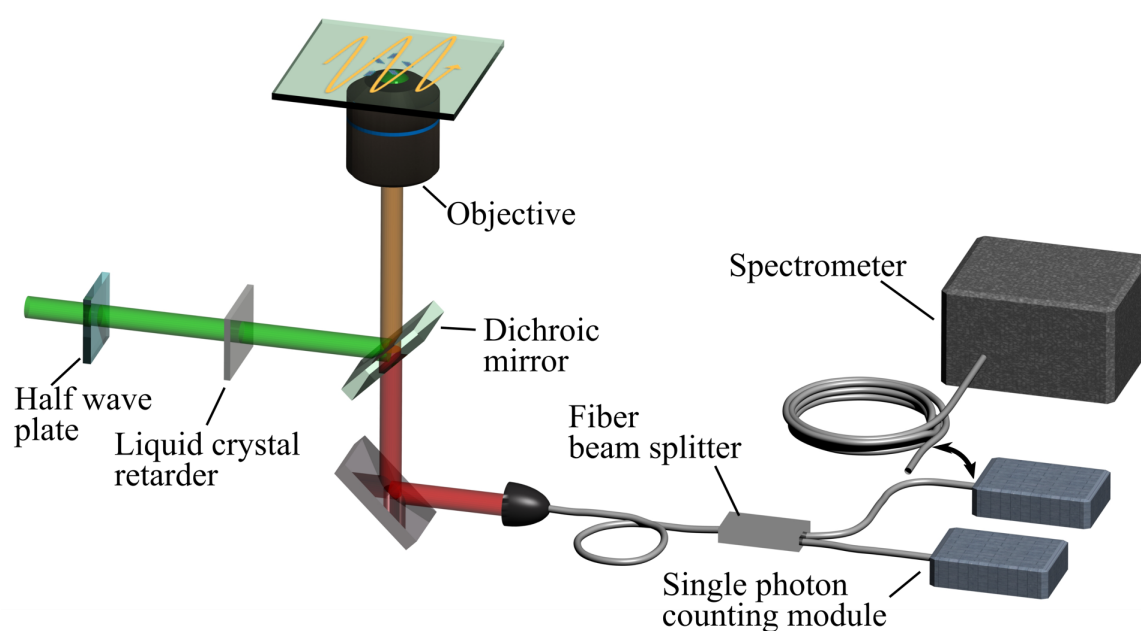


図 4 実験装置の模式図。波長 532 nm の直線偏光のビームを、液晶リターダーを用いて、ラジアル偏光ビームとアジマス偏光ビームに変換します。そして、それぞれのビームを対物レンズで集光し、hBN ナノフレークを励起します。発生した蛍光は、同じ対物レンズで集光後、単一光子検出器、もしくは、分光器を用いて測定しました。

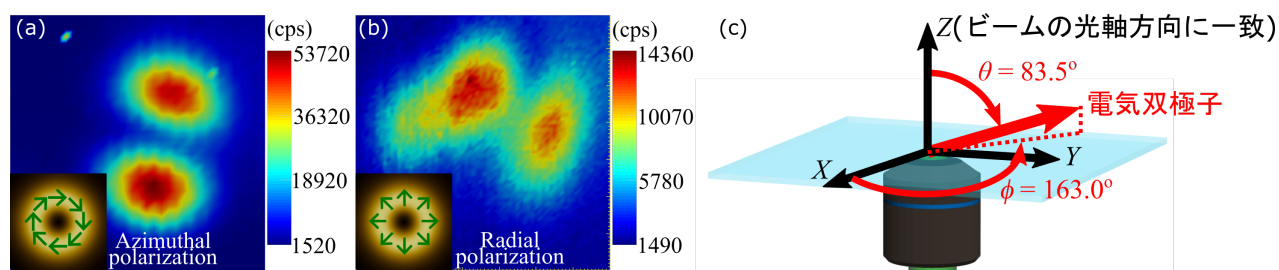


図 5 電気双極子方向の推定結果。円周方向の偏光を持つアジマス偏光ビームで励起した場合は、強度（単位は cps : カウント毎秒）がひとしい二つの輝点が現れました。一方、放射状の偏光を持つラジアル偏光ビームで励起した場合、強度が異なる二つの輝点が現れました。これらの発光強度分布を理論結果と比較すると、電気双極子の方向は、ビームの光軸方向(右図の Z 軸)から 83.5 度、光軸と垂直な面内(右図の XY 平面)で 163 度傾いていることがわかりました。