

ナノダイヤモンド中シリコン欠陥、9 ケルビンで最高品質の 「単一光子」特性観測に成功 — 高効率・高品質の単一光子源実現へ —

概要

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を解けると期待される光量子コンピュータ^{注1)}や、量子力学の原理を用いることで物理的に安全性が保証される量子暗号通信^{注2)}の長距離化（量子中継）の実現には、光の波長（色）がそろった高品質な光子をひとつひとつ発生させる単一光子源^{注3)}の開発が重要です。特に、直径が数十ナノメートルの微小なダイヤモンド（ナノダイヤモンド）中の単一シリコン（Si）空孔（Vacancy）中心^{注4)}（SiV 中心）が注目されています。しかし、高品質な光子発生を可能にする特性の観測は、従来は極めて低い温度（絶対温度で 2.3 ケルビン）でのみ行われており、単一光子源の実現に大きな課題となっていました。

今回、京都大学大学院工学研究科 嶋崎幸之介 特定研究員（研究当時）、同 坂本健伍 博士後期課程学生、同 竹内繁樹 教授、公立千歳科学技術大学 高島秀聡 准教授らからなる研究グループは、量子科学技術研究開発機構の共同研究グループとともに、シリコンイオンをナノダイヤモンドに注入し熱処理を施したサンプルを開発、従来の限界を大きく塗り替える「9 ケルビン」という温度（電気駆動の一般的な冷凍機で容易に到達可能な温度）において、高品質な光子発生特性の観測に成功しました（図 1）。

本成果により、一般的な冷凍機を用いた「ハイブリッド単一光子源」の実現へ道が開かれました。これにより、光量子コンピュータや長距離量子暗号通信などの社会実装が大きく加速することが期待されます。

本成果は、2026 年 6 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。

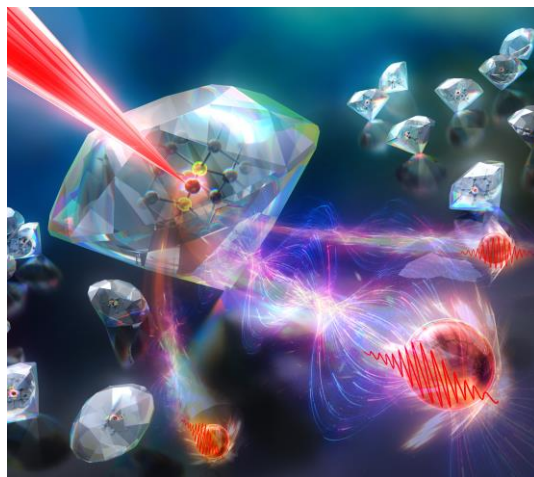


図 1 光の波長（色）がそろった高品質な光子をひとつひとつ発生させる
ナノダイヤモンド中シリコン欠陥のイメージ ©竹内研究室

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を解けると期待される光量子コンピュータ^{注1)}や、量子力学の原理を用いることで物理的に安全性が保証される量子暗号通信^{注2)}の長距離化に重要な量子中継では、光の波長(色)がそろった単色性の高い光子をひとつひとつ発生させる単一光子源^{注3)}の開発が重要です。

このような単一光子源の候補として注目を集めているのが、ダイヤモンド中のシリコン空孔(SiV)中心^{注4)}です。SiV中心は、欠陥構造の対称性が高いため、周囲のノイズの影響を受けにくい特長を持ちます。特に、直径が数十ナノメートルのダイヤモンド微粒子(ナノダイヤモンド)中のSiV中心は、ガラスや半導体導波路と組み合わせることで、高効率な単一光子源が期待できるため注目されています。

単色性の高い光子を発生できるかどうかは、一般にフォトルミネッセンス励起分光^{注5)}(PLE)により観測されるピークの線幅の細さで評価され、励起寿命によってきまる線幅(寿命限界線幅)に近いほど品質が高いことが予想されます。しかし、ナノダイヤモンド中のSiV中心における寿命限界線幅の観測は、これまで極めて低い温度(2.3ケルビン)でしか確認されておらず、単一光子源の実現に大きな課題となっていました。この温度は液体ヘリウムの沸点(4.2ケルビン)よりも小さく、一般的な冷凍機を用いたシステムの構築が難しく、高効率な単一光子源の実現に障害となっていました。

本研究では、シリコンイオンをナノダイヤモンドに注入し、熱処理を施すという独自の手法で作成したサンプルに対してPLEスペクトル測定を実施し、従来の限界を大きく塗り替える「9ケルビン」という温度(電気駆動の一般的な冷凍機で容易に到達可能な温度)においても、高品質な光子発生に必要な、寿命限界線幅の観測に成功しました。

2. 研究手法・成果

実験では、京都大学が準備した高圧高温法で合成されたナノダイヤモンドに対して、量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤研究所において、Siイオンの注入を行いました。その後、京都大学で、真空中で800°Cと1100°Cの温度での2段階の熱処理を行い、ナノダイヤモンド中にSiV中心を形成させました。

光学特性の評価では、作製したサンプルを5ケルビン以下まで冷却可能な無冷媒クライオスタットを用いて冷却して実施しました。PLE測定は、レーザー光を、SiV中心の発光ピーク付近に設定したのち、その周波数(波長)を掃引しながら、SiV中心からの発生光子数を、単一光子検出器で計数して実施しました(図2)。

図3(a)に測定結果を示します。300 ± 20 MHzの幅を持つ発光ピークが観測されました。また、パルスレーザーを用いてSiV中心を励起し、光子が生成されるまでの時間(発光寿命)を測定したところ、0.49 ns(ナノ秒:ナノは10億分の1)となりました(図3(b))。この発光寿命から計算される、PLEスペクトル線幅の理論的な最小値(寿命限界線幅)は約320MHzとなり、観測されたPLE線幅と一致していることがわかりました。この結果は、このナノダイヤモンド中のSiV中心から発生する光子が、極めて高い単色性を持ちうることを示しています。さらに、温度を段階的に上昇させても、9.0ケルビンまでこの特性が維持されることがわかりました(図3(c))。この温度は、従来、ナノダイヤモンド中SiV中心において寿命限界幅が観測されていた2.3ケルビンの約4倍、さらに液体ヘリウム温度の4.2ケルビンよりも大幅に高い温度であり、電気駆動の一般的な冷凍機で容易に到達可能な温度です。

またこれまで、微粒子ではない、いわゆるバルクのダイヤモンド中のSiV中心においても、寿命限界線幅の観測は極低温域(4ケルビン程度)に限られると考えられてきました。我々は、この高温での良質な特性が、局所的な歪みに由来する準位分裂によることを明らかにしています。

3. 波及効果、今後の予定

本成果は、ナノダイヤモンド中の SiV 中心において、液体ヘリウム温度以下への冷却の必要なく、理論的に最大の単色性を持つ光子が生成可能なことを実証したものです。本成果は、電気駆動の一般的な冷凍機を用いて、ナノダイヤモンド中 SiV 中心を利用した、高品質な単一光子源を実現できる可能性を大きく切り拓く成果です。また、今回高温化をもたらした「歪み」の効果を積極的に利用することで、他のダイヤモンド中欠陥中心の高温動作も期待されます。

これらの成果により、光量子コンピュータや長距離量子暗号通信などの社会実装が大きく加速することが期待されます。

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（JST）ERATO「竹内超量子もつれ」（JPMJER2402）、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）、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金（24H00195, 21H04444, 26220712, 23K22426）、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 さきがけ（JPMJPR2257）、日本学術振興会（JSPS）二国間交流事業（JPJSBP120242003）、日本学術振興会（JSPS）特別研究員奨励費（23KJ1190）、村田学術振興財団、松尾学術振興財団、等の支援を受け、量子科学技術研究開発機構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（光の粒子）を量子ビットとして用い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

量子力学の原理を利用した暗号通信技術。量子暗号通信では、通信中の光子を盗聴するとその状態が変化してしまうため、盗聴の有無を確実に検出できる安全性が保証された暗号通信を実現できる。

注3 単一光子源

光子を1つずつ発生させる光源。

注4 シリコン空孔中心

ダイヤモンド中に存在する原子レベルの欠陥の一種で、炭素原子の欠損部分にシリコン原子が入り込んだ構造を持つ。この欠陥は単一光子を安定して発生できるため、単一光子源などへの応用が注目されている。

注5 フォトルミネッセンス励起分光

励起に用いるレーザー光の波長を掃引しながら、単一発光体からの発光量を測定する分光法。観測されるピークの波長幅が小さいほど、発光体から放出される光子の単色性が優れていることが示唆される。線幅の最小値（寿命限界幅）は、単一発光体の発光寿命の逆数で与えられる。寿命限界幅の観測は、もっとも単色性の高い光子源と評価できる。

<研究者のコメント>

今回の9ケルビンという温度でのナノダイヤモンド中 SiV 中心の PLE 寿命限界線幅観測は、私たちの予測をも大きく上回る意外なもので、実験によって切り拓かれた研究の醍醐味が感じられた成果です。今年、1926年のシュレーディンガーの波動方程式の発見から100年の記念すべき年です。今後も、光子を操り、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科学・技術の研究を、学生、スタッフと共に推進します。(竹内繁樹)

<論文題名と著者>

題名：Lifetime-Limited Linewidth of Silicon Vacancy Centers in Nanodiamonds at 9 K

(ナノダイヤモンド中のシリコン欠陥中心の、絶対温度9度での寿命限界線幅)

著者：嶋崎幸之介 (第一著者)、坂本健伍、鈴木和樹、阿部浩之、大島武、高島秀聡、竹内繁樹 (責任著者)

掲載誌：ACS Photonics DOI： [10.1021/acsphotonics.5c02439](https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5c02439).

<参考図表>

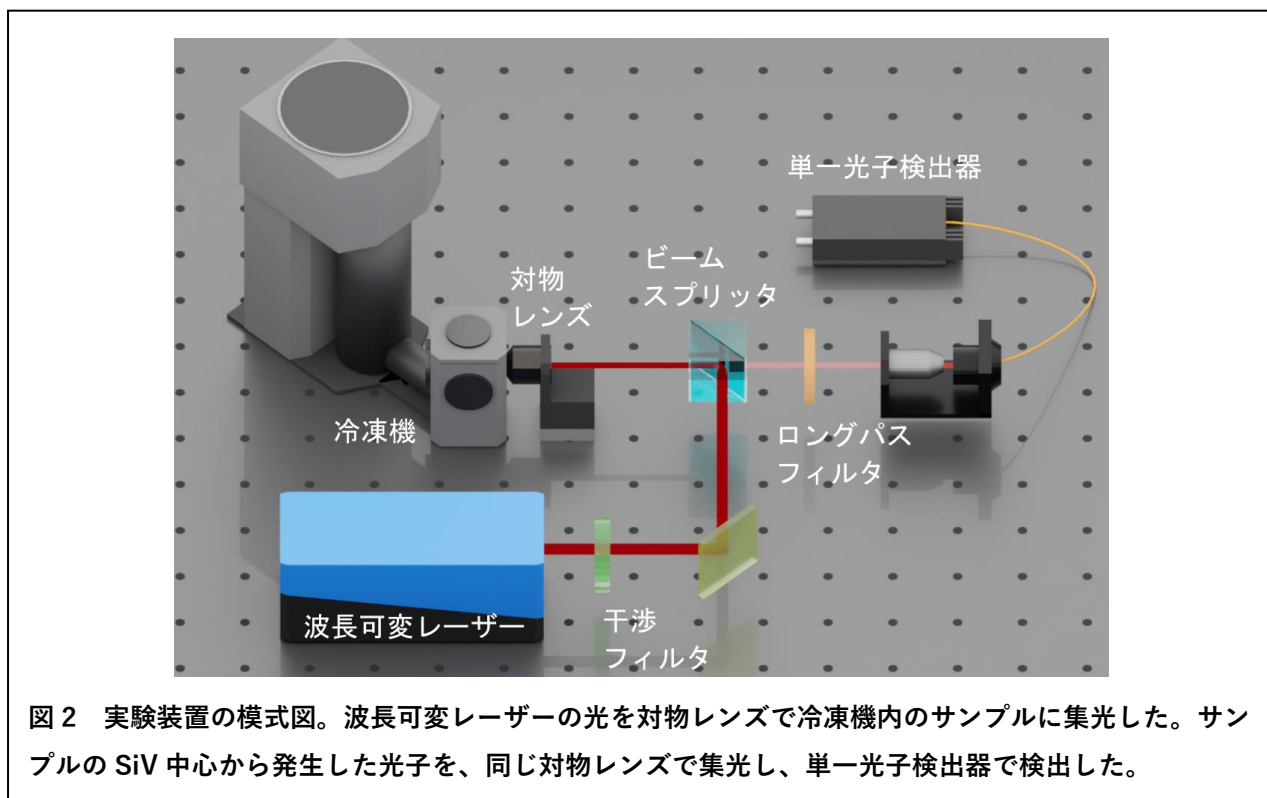


図2 実験装置の模式図。波長可変レーザーの光を対物レンズで冷凍機内のサンプルに集光した。サンプルの SiV 中心から発生した光子を、同じ対物レンズで集光し、単一光子検出器で検出した。

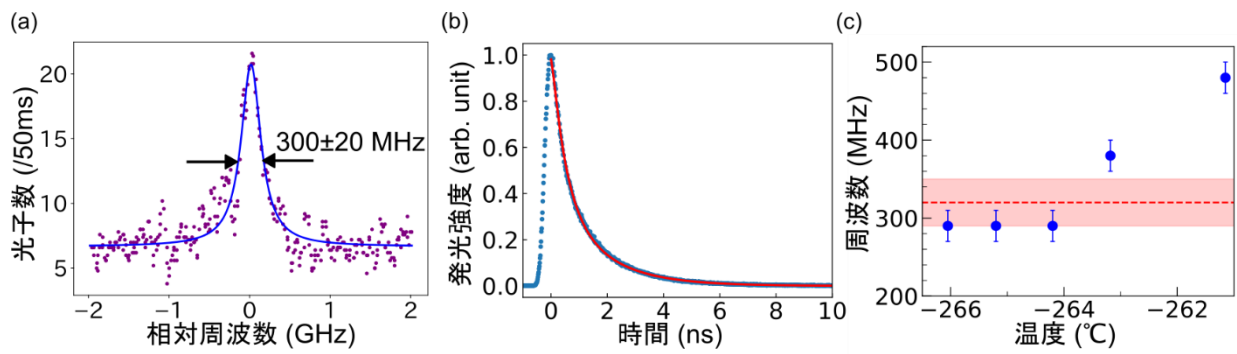


図3 (a) ナノダイヤモンド中の SiV 中心からの PLE スペクトル。紫点が実験結果、青線がフィッティング曲線。ピーク幅は 300 ± 20 MHz。(b) 発光寿命の測定結果。発光強度の減衰から、発光寿命を 0.49 ns と推定した。(c) PLE スペクトル線幅の温度変化。7.1 ケルビン(-266°C)から、9 ケルビン(-264.1°C) まで、線幅が理論限界である 320 ± 30 MHz に到達していることを確認した。