

単一スズ欠陥中心を内包する極微ナノダイヤモンドの開発に成功

—光子を用いた量子コンピュータや量子ネットワークの実現に期待—

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}の実現には、量子力学的な相関（量子もつれ^{注3}）を持つ光子を発生させる光源や、量子もつれを利用して光子の量子状態を遠隔地に転送する量子中継器^{注4}などの開発が重要です。近年、これらを実現する発光体として、光の波長（色）がそろった単色性が高い光子を生成し、かつ、量子状態を保存するメモリとして利用可能な、ダイヤモンド中の単一スズ（Sn）欠陥（Vacancy）中心^{注5}（SnV 中心）が注目されています。しかし、これまで単一 SnV 中心の形成はバルク（塊状）ダイヤモンドに限られており、ナノメートル（10 億分の 1 メートル）サイズの微小なダイヤモンド粒子（ナノダイヤモンド）では実現されていませんでした。

今回、公立千歳科学技術大学 高島秀聡 准教授、京都大学大学院工学研究科 嶋崎幸之介 特定研究員、同 竹内繁樹 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、Sn イオンをナノダイヤモンドに注入し熱処理を施すことで、ノイズとなる背景光子の発生がほとんど無い、単一 SnV 中心を内包するナノダイヤモンドの開発に成功しました（図 1）。

今回得られた成果は、ナノダイヤモンドと超微細構造光素子によるハイブリッド単一光子源や量子中継器などの実現への道を拓くものであり、光子を用いた量子コンピュータや長距離量子暗号通信、さらには、量子センシングなど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、2025 年 8 月 13 日午前 0 時（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る予定です。

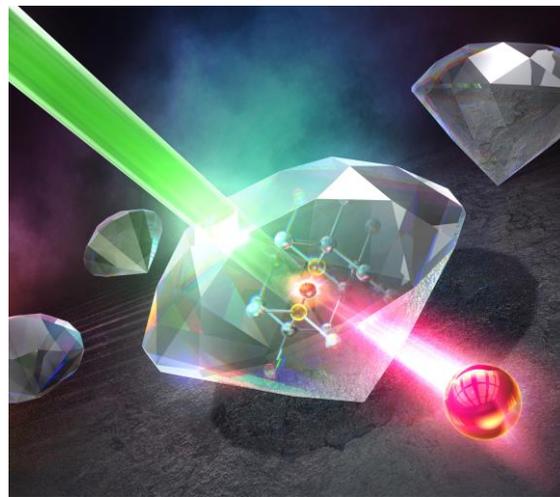


図 1 単一スズ欠陥中心内包ナノダイヤモンドのイメージ図

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を解けると期待される光量子コンピュータや、量子力学の原理を用いることで安全性が保証された通信技術である量子暗号通信の実現には、量子もつれと呼ばれる量子力学的な相関を持つ光子を発生させる光子源や、量子もつれを利用して光子の量子状態を遠隔地に転送する量子中継器などの開発が重要です。これらの実現には、単色性が高い光子を生成し、かつ、量子状態を保持するメモリとしての機能を持つ発光体が必要になります。

近年、そのような発光体として、ダイヤモンド中の単一窒素欠陥中心や、4族元素（シリコン、ゲルマニウム、スズ、鉛）を含む単一欠陥中心が注目されています。しかし、窒素欠陥中心には、発生光子の単色性に課題がありました。また、シリコン欠陥中心やゲルマニウム欠陥中心は、単色性の高い光子を発生することはできますが、長時間量子状態を保持するには動作温度を極低温の数百ミリケルビン（0ケルビン： -273.15°C 、1ミリケルビン：1000分の1ケルビン）以下にする必要がありました。さらに、鉛欠陥中心の場合は、形成時に7.7 GPa（ギガパスカル：ギガは10億を意味する、大気圧は約10万パスカル）の高圧と 2100°C の高温環境での熱処理が必要になるという課題がありました。

そのような中、高圧高温処理を必要とせず、単色性が高い光子を生成し、かつ比較的容易に到達できる数ケルビンの温度で量子状態を保存するメモリとして利用可能な欠陥中心が、スズ欠陥中心（SnV中心）です。しかし、これまで単一SnV中心の形成はバルクダイヤモンドに限られており、ナノメートルサイズの微小なダイヤモンド粒子（ナノダイヤモンド）では実現されていませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究では、イオン注入法を用いてSnイオンをナノダイヤモンドに注入し、その後、真空中で熱処理を行うことで、ノイズとなる背景光子の発生が極めて少ない、単一SnV中心内包のナノダイヤモンドの開発に成功しました。

実験では、量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤研究所にて、高圧高温法で合成されたナノダイヤモンドにSnイオンを注入しました。その後、京都大学において、真空中で 1200°C の温度で熱処理を行い、ナノダイヤモンド中にSnV中心を形成させました。図2に、熱処理後に得られたナノダイヤモンドの透過型電子顕微鏡（TEM）像を示します。観察の結果、10 nm（ナノメートル：ナノは10億分の1）以下の非常に小さなサイズのナノダイヤモンドであることがわかりました。

光学特性の評価には、波長520 nmのレーザー光を励起光として用いました（図3）。このレーザー光を、100倍の顕微鏡用対物レンズを用いて、石英ガラス基板上に分散させたナノダイヤモンドに集光しました。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。

その結果、波長620 nm付近において、SnV中心の発光ピークを観測することに成功しました（図4(a)）。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）における同時計数値が、 0.04 ± 0.11 と極めて小さな値を示しました（図4(b)）。この同時計数値は、0.5以下で単一光子発生の条件を満たし、0に近づくほどノイズとなる背景光子の発生が小さくなります。この小さな同時計数値より、ノイズとなる背景光子の発生がほとんどない、単一SnV中心を内包するナノダイヤモンドであることがわかりました。さらに、励起光強度を変化させながら発光光子数を測定したところ、発生光子数が飽和するカウント数が、毎秒492,000と推定されました（図4(c)）。この値は、同様の手法で形成されたシリコン欠陥中心よりも有意に大きく、SnV中心が明るく発光することを示しています。

3. 波及効果、今後の予定

本成果は、ノイズとなる背景光子の発生がほとんどない、単一 SnV 中心を内包する極めて小さなサイズのナノダイヤモンドの開発に成功したものです。ナノダイヤモンドのサイズが小さくなると、光の波長以下の直径をもつナノ光ファイバーなどの超微細構造光素子と一体化させたときの結合損失を小さくできます。そのため、本研究で開発されたナノダイヤモンドにより、より損失が小さく効率の高い、量子もつれ光源や、量子中継器などの実現が期待されます。それにより、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、物理的に安全性が保証された量子暗号通信の長距離化などの研究の飛躍的な発展が期待できます。

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） 戦略的創造研究推進事業さきがけ（JPMJPR2257）、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, 23K22426）、日本学術振興会（JSPS） 二国間交流事業（JPJSBP120242003）、村田学術振興・教育財団、寿原記念財団、ARIM（JPMXP1224KT0013）、日本学術振興会特別研究員奨励費（23KJ1190）などの支援を受け、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 量子もつれ

複数の量子が量子力学的な重ね合わせにあり、それぞれが独立した量子状態を持っているとは見なすことができないような状態。例えば、2つの光子が「両方とも垂直偏光にある状態」と「両方とも水平偏光にある状態」の重ね合わせ状態などがある。

注4 量子中継器

量子もつれを使って量子情報を遠距離に送るための中継器。

注5 欠陥中心

結晶中の原子が欠落したり、不純物原子と置き換わったりすることで形成される欠陥構造のことで、特定の波長の光子が発生する。カラーセンター（color center）とも呼ばれる。スズ欠陥中心の場合、ダイヤモンド中の隣接する炭素原子2つが欠落し、その間にスズ原子が挟まった構造をとる。

<研究者のコメント>

今後は、本成果に基づき、光ファイバーに結合された高効率単一光子源や多光子間の量子もつれを生成する光源、量子中継器などの開発を進めます。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：Creation of single tin vacancy color centers in small nanodiamonds (単一スズ欠陥中心内包ナノダイヤモンドの開発)

著者：高島秀聡、嶋崎幸之介、阿部浩之、大島武、竹内繁樹

掲載誌：ACS Photonics DOI : <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5c00627>

<参考図表>

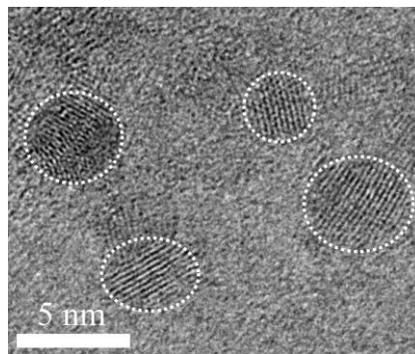


図 2 熱処理後のナノダイヤモンドの TEM 像。点線で囲った部分が、ナノダイヤモンドの粒子 1 つを表す。

