



Tokyo Tech

Press Release

2023年2月24日

東京工業大学

量子ネットワークの鍵となる「同一フォトンの生成」に成功

－量子中継による長距離ネットワーク実現に寄与－

【要点】

- ダイヤモンド結晶中に、スズ (Sn) 原子と空孔 (V: Vacancy) からなる量子光源 (SnV 中心) を生成
- 複数の光源から発光波長・線幅がほぼ同一であるフォトンを生成することに成功
- 量子もつれを基盤とする量子ネットワークの実現につながる重要な成果

【概要】

東京工業大学 工学院 電気電子系の岩崎孝之准教授、物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点の谷口尚拠点長、産業技術総合研究所 機能材料コンピュータショナルデザイン研究センターの宮本良之上級主任研究員、量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所の小野田忍上席研究員らの共同研究グループは、量子ネットワーク応用が期待されているダイヤモンド中のスズ-空孔 (SnV) 中心において、複数の SnV 中心から発光波長および発光線幅がほぼ同じである**同一なフォトン** (用語 1) を生成することに成功した。

量子ネットワークでは、各量子ネットワークノード間を**量子もつれ** (用語 2) でつなぐ必要がある、その実現には発光波長および発光線幅が同じである同一なフォトンの生成が鍵となる。本研究では、高エネルギーに加速した Sn イオンをダイヤモンド基板に打ち込み、2,100°Cで加熱することで SnV 中心を形成した。高精度な**発光励起分光** (用語 3) 計測から、複数の SnV 中心から同一なフォトンの生成を観測した。今後、離れた位置の SnV 中心を用いた量子干渉計測および量子もつれ形成を実証することで、ダイヤモンド量子光源を基盤とする量子ネットワークへの応用が期待できる。

研究成果は2月23日(米国東部時間)にアメリカ物理学会の「*Physical Review Applied*」にオンライン掲載された。また、優れた論文として Editors' Selection に選定された。

●背景

量子ネットワークは、量子もつれを用いて量子状態を送受信することで盗聴を不可能にする安全な情報ネットワークとして注目されている。量子ネットワークノードと呼ばれる送受信および中継点の各点をなす固体量子光源として期待されているのが、ダイヤモンド構造に異種元素を導入した材料である。本研究グループでは、IV族元素を用いることで、優れた光学特性およびスピン特性（量子状態のメモリ時間）を両立することが可能になることを示してきた。その中でも、重いIV族元素であるSnを用いたSnV中心は、SiやGeを用いた量子光源よりも高い温度で量子状態を保存するためのスピン特性が優れるという特長を有している。スピン特性は、量子ネットワークにおける情報伝達においてその情報の保持を担うものであり、希釈冷凍機を必要としない温度での量子情報保持は実用上重要となる。また、量子もつれ生成のための光学特性としては、同一の発光波長および発光線幅を有する複数の量子光源の形成が重要となる。しかしながら、母体材料であるダイヤモンドの格子による歪みによって、容易に各量子光源の発光波長がずれてしまい、同一の発光波長および発光線幅を有するSnV中心を複数形成させることは実現されていなかった。

●研究成果

本研究では、ダイヤモンド基板への18 MeVという高エネルギーでのSnイオン注入後に、高圧下において2,100°Cで加熱処理を行うことで高品質SnV中心を形成し、複数のSnV中心から発光波長および発光線幅がほぼ同じである光子を生成することに成功した。

【SnV中心の形成と特性評価】

18 MeVという高エネルギーを加えることにより、ダイヤモンド基板へのSnイオンの注入を行なった。SnV中心はダイヤモンド表面から3 μm程度の深さで形成され、基板表面の格子歪みの影響を抑制することができ、さらに、2,100°Cでの加熱処理によりイオン注入時に発生した格子欠陥や歪みを効率的に回復させることができる。

形成されたダイヤモンド格子内のSnV中心は、格子間にSn原子が配置し、その両隣が空孔となる構造をしている（図1a）。この構造内に局所的に存在している電子が光励起された後に緩和することで発光する。電子がつくるエネルギーレベルは基底状態および励起状態とも2つに分裂しているため複数の発光線が観測される（図1b）。図1cは作製したSnV中心からの発光（PL）スペクトルであり、励起状態のうち低いエネルギー準位から各基底状態への遷移に対応している。

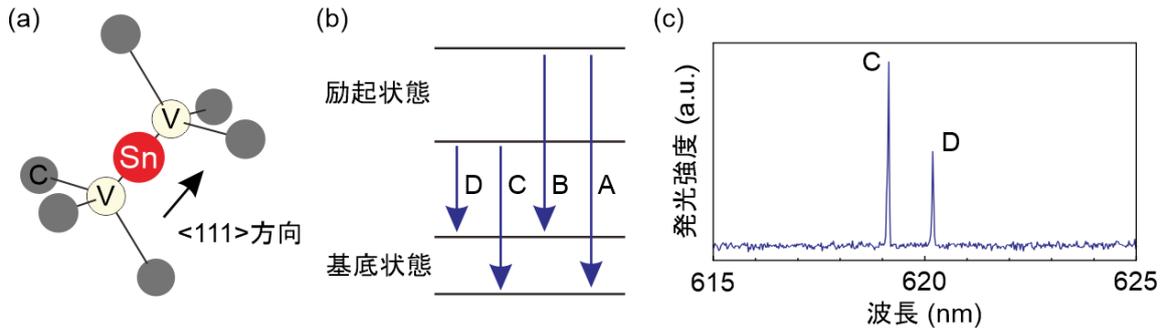


図1. ダイヤモンド中の SnV 中心。(a) SnV 中心構造の模式図。(b) エネルギー準位。(c) PL スペクトル

【PLE 測定による詳細な発光特性の評価】

検出器の分解能のため、PL スペクトルでは SnV 中心の真の発光波長および発光線幅を評価することができない。そこで、高精度波長可変レーザーおよび波長計を用いて、発光励起分光 (PLE) 測定を実施した。図 2a は 160 個の SnV 中心に対して PLE 計測を実施して得られた発光周波数分布 (波長から換算) である。発光周波数がシフトした 3 個のピークが明確に見られており、第一原理計算を含めた理論計算から、これらは 3 種類の Sn の同位体からなる SnV 中心に対応していると考えられる。量子光源の形成条件から、最もカウントが高い P1 ピークが Sn の同位体 ^{120}Sn を含む SnV 中心由来の発光であり、P2 および P3 ピークがそれぞれ ^{119}Sn , ^{118}Sn 由来だと考えられる。同位体を区別した ^{119}SnV 中心の観測は、長時間の量子状態保存を可能とする**核スピンメモリ** (用語 4) につながるものである。最もカウントの高い P1 ピークの**半値幅** (用語 5) は 3.9 GHz と非常に狭く、作製した量子光源が高品質であることを示している。この狭い発光周波数分布のため、非常に近い発光周波数および発光線幅を有する複数の SnV 中心の観測が可能となった。図 2b はひとつのダイヤモンド基板 (サンプル 1) の中に存在する複数の SnV 中心からの PLE スペクトルであり、それぞれのスペクトルの大部分が重なっている。内側のふたつのスペクトルの発光線幅は 35 MHz および 38 MHz であり、物理限界である自然線幅 31 MHz に非常に近く理想に近い状態であることがわかる。このふたつのスペクトルの中心周波数の差は 4 MHz と自然線幅の 1/8 程度に収まっており、ほぼ同一の性質を持つフォトンが生成されていると考えられる。さらに、もうひとつの異なるダイヤモンド試料 (サンプル 2) においても、サンプル 1 の SnV 中心と同一なフォトンを生成する SnV 中心を確認した (図 2c)。

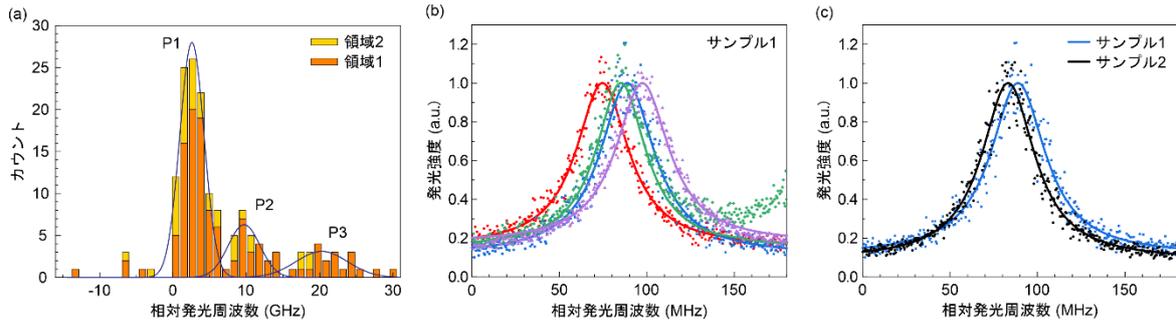


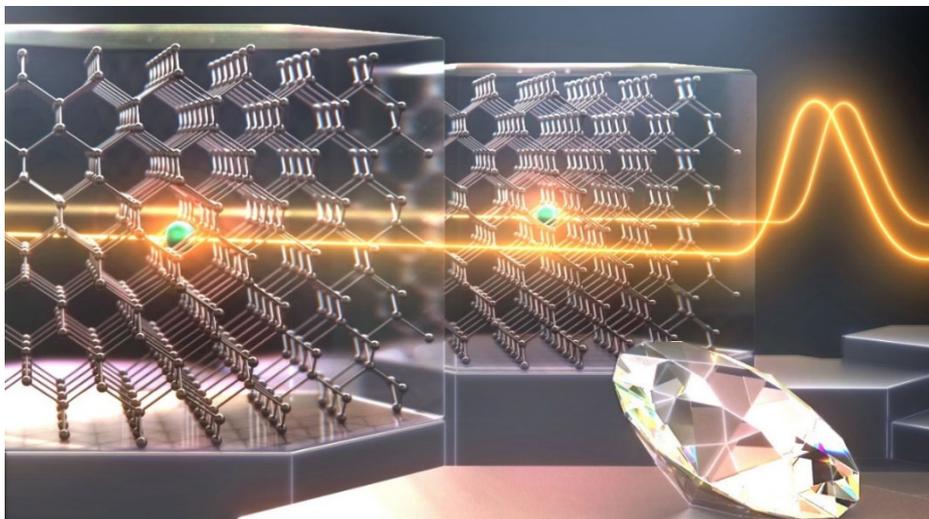
図 2. SnV 中心の発光特性の評価。(a) 発光周波数のヒストグラム。発光周波数は 484.130 THz からの相対値である。領域 1 と 2 は同じサンプルの別の領域での測定を示している。(b) サンプル 1 内での複数の SnV 中心からの PLE スペクトル。(c) サンプル 1 およびサンプル 2 内の SnV 中心からの PLE スペクトル。(c)のサンプル 1 のスペクトルは(b)の青いスペクトルと同じものである。(b)と(c)の周波数は 484.1319 THz からの相対値である。

●社会的インパクト

本研究によって、重い IV 族元素を用いたダイヤモンド量子光源において同一なフォトンの生成が可能であることを示した。これは量子中継による長距離量子ネットワークや量子デバイスをつないだネットワーク構築へ向けた重要な成果である。

●今後の展開

今回作製した SnV 中心を持つダイヤモンド試料は、異なるサンプル間においても同一の性質の光子を生成できることを確認した。このことは材料の量産において、品質の安定につながると考えられる。今後は、この高品質 SnV 中心を用いることで、離れた位置にある SnV 中心間の 2 光子干渉計測およびスピン特性と合わせた量子もつれ形成へと研究を進展させていく。本研究成果は、SnV 中心を用いた量子ネットワークノード形成への重要なブレイクスルーであり、量子中継器による長距離量子ネットワーク実現へつながることが期待できる。



同一な光子を生成するダイヤモンド結晶内の SnV 中心のデザインイラスト

●付記

本研究は JSPS 科研費基盤研究 (S) JP22H04962 および基盤研究 (A) JP22H00210、東レ科学技術研究助成、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププロジェクト (Q-LEAP) (No. JPMXS0118067395)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2062) の支援を受けて行われた。

【用語説明】

- (1) **同一なフォトン**：複数の量子光源から発せられるフォトン（光の粒子）が同じ発光波長、発光線幅、偏光を有する状態であり、量子干渉計測および量子もつれ形成において重要となる。本研究では、異なる SnV 中心からのフォトンの偏光は制御していないが、光学素子を用いることで容易に制御可能である。
- (2) **量子もつれ**：量子もつれ状態にある 2 個の粒子では、片方の粒子の状態を観測によって決めると、もう一方の粒子の状態も決まる。
- (3) **発光励起分光**：量子光源の狭い発光線幅を計測する技術。励起寿命で決まる理想的な線幅は、通常の発光スペクトル計測では測定できない。一方、発光励起分光計測では狭線幅の波長可変レーザーを用いることによって狭い発光線幅を計測でき、さらに発光波長を高精度に観測することができる。
- (4) **核スピンメモリ**：量子状態は、電子スピンおよび核スピンの保存することができる。核スピンは、電子スピンに比べ環境からのノイズの影響を受けにくいいため、より長時間にわたって量子状態を保持することができる。量子光源の電子スピンの状態を保持後、核スピンの情報を移すことで利用することができる。SnV 中心では、同位体 ^{119}Sn が核スピンメモリとして機能する。
- (5) **半値幅**：統計データの分布や分光のピークにおいて、縦軸の値が最大値の半分となる 2 点における横軸の値の差。

【論文情報】

掲載誌：*Physical Review Applied*

論文タイトル：Multiple Tin-Vacancy Centers in Diamond with Nearly Identical Photon Frequency and Linewidth

著者：Yasuyuki Narita, Peng Wang, Keita Ikeda, Kazuki Oba, Yoshiyuki Miyamoto, Takashi Taniguchi, Shinobu Onoda, Mutsuko Hatano, Takayuki Iwasaki

DOI：10.1103/PhysRevApplied.19.024061

【問い合わせ先】

東京工業大学 工学院 電気電子系 准教授

岩崎孝之

Email: iwasaki.t.aj@m.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2169

FAX: 03-5734-2169

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975

FAX: 03-5734-3661