

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度  
課題番号：20H05661  
研究課題名：ダイヤモンド量子ストレージにおける万能量子メディア変換技術の研究

研究代表者氏名（ローマ字）：小坂 英男（KOSAKA Hideo）  
所属研究機関・部局・職：横浜国立大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：20361199

研究の概要：

ダイヤモンド窒素空孔中心（NV）の周囲にクラウド状に分布する炭素同位体集団で構成される量子ストレージにおける万能な量子メディア変換技術を確立する。NV 遠方の深層炭素集団を量子ストレージとし、幾何学的デカップリングによる深層炭素の個別量子もつれ生成、単一光子から単一深層炭素への選択的な量子メディア変換、任意の深層炭素間の量子もつれ測定、量子符号化による誤り耐性などを実現する。

研究分野：ナノマイクロ科学、量子情報、スピントロニクス

キーワード：ダイヤモンド、NV 中心、量子ストレージ、量子メディア変換、量子コンピュータ

1. 研究開始当初の背景

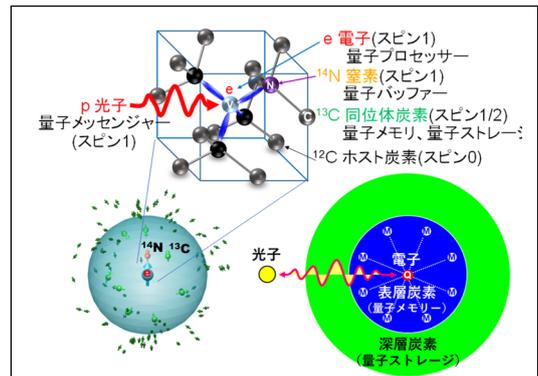
近年、超伝導量子ビットによる量子コンピュータの開発競争が世界的に本格化しているが、一方で物理的に安全性の保証された暗号通信を可能とする量子インターネットの開発も始まっている。さらに、DNA バンク、ビットコインなどの普及により絶対に漏洩の許されない個人情報の安全な保存に向けた量子ストレージの必要性も急速に高まっている。これらを組み合わせた量子コンピュータネットワークの構築により、分散処理により高速化された分散量子計算、秘匿な入出力が可能な秘匿量子計算、地球規模の重力場望遠鏡、精密地震予測などが可能となる。その実現には量子コンピュータの心臓部となる超伝導量子ビットとの整合性が高く、長時間量子状態を保持できる大規模な量子ストレージとその量子インターフェース開発が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、ダイヤモンド窒素空孔中心（NV）の周囲にクラウド状に分布する炭素同位体集団で構成される量子ストレージにおける万能な量子メディア変換技術の確立を目的とする。超伝導量子ビットとの整合性が高く、無磁場下で動作する 1M ビット規模の量子ストレージの開発により、量子インターネットで接続された量子コンピュータネットワークによる分散型量子計算や秘匿量子計算などに道を拓き、高度情報化社会に飛躍的進化をもたらす。

3. 研究の方法

本研究では、NV 遠方の深層炭素集団を量子ストレージとし、幾何学的デカップリングによる深層炭素の個別量子もつれ生成、単一光子から単一深層炭素への選択的な量子メディア変換、任意の深層炭素間の量子もつれ測定、量子符号化によるフォールトトレラント化、NV アンサンブルへの拡張による大規模量子ストレージ化を実現する。NV 中心には欠陥に捕獲された電子とこれに隣接した窒素があり、さらにその周辺に炭素同位体（ $^{13}\text{C}$ ）が電子からの距離に応じて2種類が層状に分布する。これらを量子プロセッサ、量子バッファ、量子メモリー、量子ストレージとして利用し、さらにアンサンブルの利用で大規模化するのが本研究の特徴である。



4. これまでの成果

**幾何学的デカップリングによる深層炭素の選択的量子もつれ生成**

量子メモリーに適する表層炭素は NV 一つにつき（天然存在比のダイヤモンドでは）2～5 個程度ある。一方、量子ストレージに適する深層炭素は通常 20 個程度であるが、同位体濃縮したダイヤモンドでは 100 個程度が期待される。深層炭素の核スピンは表層炭素のようにマイクロ波では量子操作できないが、核スピン毎に異なる超微細相互作用に共鳴する周波数のラジオ波で個別に量子操作できる。しかしながら、これでは電子と狙った炭素間の量子もつれは生成できない。そこで、ラジオ波による炭素核スピンの回転に合わせ、マイクロ波により電子スピンを周期的に反転させることで電子と狙った炭素間の量子もつれを選択的に生成することに、完全ゼロ磁場において成功した。電子スピン反転には独自のホロノミック量子操作と幾何学的スピンエコーを応用した独自の幾何学的デカップリングを用いた。実験で得られた量子もつれ状態の忠実度は平均で 75.8%であった。もつれ生成自体の平均忠実度は 85%以上と想定される。

## 単一光子から単一深層炭素への選択的な量子メディア変換

前述の手法で電子と狙った深層炭素との量子もつれを生成し、独自の量子もつれ吸収手法（電子の軌道とスピンの量子もつれ状態にある励起状態への光子吸収による光子と電子の量子もつれ測定）を用いることで、量子テレポーテーションの原理による光子から狙った炭素への選択的な量子状態転写（光子炭素間量子メディア変換）を完全ゼロ磁場において行った。実験で得られた平均忠実度は90%であった。光子から炭素への転写の際、仲介する電子のスピンの状態を窒素に転写してシングルショット測定（量子非破壊測定）することで、転写後の炭素の量子状態を破壊することなく転写成功を検知した。また、一方の光子の量子状態を破壊されにくい深層炭素に転写して保管し、深層炭素の量子状態を維持しながら他方の光子の量子状態を表層炭素へ転写できることも確認した。

## 任意の深層炭素間の量子もつれ測定

量子インターフェースの最重要機能は炭素間の完全ベル測定（4種類ある量子もつれ状態の完全な識別）である。完全ゼロ磁場において、表層炭素と深層炭素の2つの炭素間の量子もつれを量子非破壊測定することで、完全ベル測定することに世界で初めて成功した。実験で得られた平均忠実度は83%であった。今回は片方の炭素に表層炭素を用いたが、同手法は任意の深層炭素に適応できる。

## 5. 今後の計画

### 深層炭素の量子符号化によるフォールトトレラント化

深層炭素に保存した量子状態も、炭素間結合や外部磁場の変動などのノイズにより破壊が進む。そのため、ビット誤り（0と1の入れ替え）や位相誤り（0と1を軸とする位相回転）を自動補正する量子符号化の手法を確立する必要がある。既に、表層炭素を用いてビット誤りか位相誤りの片方の量子誤り訂正に71%（エラー100%の場合）の忠実度で成功している。本研究では、深層炭素7個で一つの論理量子ビットを構成する量子符号化を行うことで、ビット誤りと位相誤りの両方に耐性をもつスタビライザーコードを実装し、強固な誤り耐性をもつフォールトトレラントな量子ビットを実現する。

### NV アンサンブルへの拡張による大規模量子ストレージ化

一つのNVに含まれる深層炭素は高々100個程度であるが、窒素イオン注入などにより集積化されたNVアンサンブルを用いることで、大規模な量子ストレージが構築できる。無磁場下で動作するため磁場不均一性の問題がない。100×100個のNVに光アクセスできれば、深層炭素と合わせて1Mビット規模の量子ストレージが実現できる。NV間隔が1 $\mu$ m程度以上離れていれば、独自開発の共鳴光によるホロミック量子操作で個別操作できるが、光学励起状態の緩和時間は12nsと早く、操作忠実度は95%程度に留まる。一方、マイクロ波を用いたホロミック量子操作では99.9%以上の操作忠実度を既に得ているがNVの個別操作はできない。そこで、非共鳴光による周波数シフト（光シフト）に同調したマイクロ波によるホロミック量子操作で高い忠実度の個別操作を可能とする。各NVの位置情報と深層炭素のハミルトニアンを機械学習することにより、NVアンサンブルと深層炭素集団の階層構造で大規模化された量子ストレージへの万能量子メディア変換を可能とする。

## 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- [1] Takaya Nakazato, Raustin Reyes, Nobuaki Imaike, Kazuyasu Matsuda, Kazuya Tsurumoto, Yuhei Sekiguchi, \*Hideo Kosaka, “Quantum error correction of spin quantum memories in diamond under a zero magnetic field”, Communications Physics (Nature publishing), in printing (2022), 査読有
- [2] T. Kageura, Y. Sasama, C. Shinei, T. Teraji, K. Yamada, S. Onoda, T. Yamaguchi, “Charge Stability of Shallow Single Nitrogen-Vacancy Centers in Lightly Boron-Doped Diamond”, Carbon. 16953 1-32 (2022).10.1016/j.carbon.2022.01.027, 査読有
- [3] Yuhei Sekiguchi, Yuki Yasui, Kazuya Tsurumoto, Yuta Koga, Raustin Reyes, \*Hideo Kosaka, “Geometric entanglement of a photon and spin qubits in diamond”, Communications Physics (Nature publishing), Volume 4, Article number 264 (2021), 10.1038/s42005-021-00767-1, 査読有,
- [4] C. Shinei, M. Miyakawa, S. Ishii, S. Saiki, S. Onoda, T. Taniguchi, T. Ohshima and T. Teraji, “Equilibrium charge state of NV centers in diamond”, Applied Physics Letters 119, 254001 1-5 (2021), 10.1063/5.0079687, 査読有
- [5] A. J. Healey, L. T. Hall, G. A. L. White, T. Teraji, M. A. Sani, F. Separovic, J. P. Tetienne and L. C. L. Hollenberg, “Polarization Transfer to External Nuclear Spins Using Ensembles of Nitrogen-Vacancy Centers”, Physical Review Applied 15, 054052 1-16 (2021),10.1103/PhysRevApplied.15.054052, 査読有
- [6] K. Ichikawa, T. Shimaoka, Y. Kato, S. Koizumi, T. Teraji, “Dislocations in chemical vapor deposition diamond layer detected by confocal Raman imaging”, Journal of Applied Physics 128 (15), 155302 1-10 (2020),10.1063/5.0021076, 査読有
- [7] S. Ishizu, K. Sasaki, D. Misonou, T. Teraji, K.M. Itoh, E. Abe, “Spin coherence and depths of single nitrogen-vacancy centers created by ion implantation into diamond via screening masks”, Journal of Applied Physics 127 (24), 244502 1-12 (2020),10.1063/5.0012187, 査読有

## 7. ホームページ等

<http://kosaka-lab.ynu.ac.jp/>