

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成31年度（2019年度）研究進捗評価用〕

平成28年度採択分  
平成31年3月28日現在

ダイヤモンドナノ量子システムにおける量子メディア変換技術の研究  
Research for quantum media conversion in diamond nano quantum system

課題番号：16H06326

小坂 英男 (KOSAKA, HIDEO)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授



研究の概要（4行以内）

固体中のナノ量子システムにおいて、スピン縮退した量子系の幾何学的量子操作により、長距離伝送光子の量子状態を多数の核子で構成された集積量子メモリーに選択的に書き込み、長時間保持し、誤り訂正し、メモリー間の量子もつれを読み出す技術を確認する。これにより決定論的な量子中継の要素技術を確認し、スケーラブルな第三世代量子光通信の実現可能性を示す。

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：量子情報技術・光量子技術・スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

モノのインターネット（IoT）によるビッグデータ社会の到来に向け、情報通信は飛躍的な量的進化を要求される一方で、マイナンバー制度による個人情報や医療情報、スマートグリッドなどのエネルギー情報を安全に配信するための質的変革も緊急の課題である。これを可能とする量子光通信ネットワークの実現が不可欠である。スケーラブルな量子中継の実現より、量子光通信の距離制限が解消されるとともに、古典的な通信容量限界を超えた量子光通信などの新たな活用法が期待され、破壊的イノベーションにつながる。

2. 研究の目的

ダイヤモンド窒素空孔（NV）中心に備わる量子システム（図1）を中核とし、それを量子情報処理システムとして実用化するために不可欠な、誤り耐性のある量子メディア変換集積固体量子メモリーの開発を目的とする。

する。

3. 研究の方法

ダイヤモンドNV中心の周囲にある窒素核子および多数の同位体炭素の核子を量子メモリーとし、伝送光子との媒介としてNV中心の電子のスピン縮退部分系を論理キュービットとして量子制御に用いる（図2）。まずは量子テレポーテーション原理による光子から窒素核子への伝令付き量子メディア変換を達成し、次に光子から集積メモリーとなる同位体炭素核子への選択的転写を独自の幾何学的スピンエコーを応用して実現する。さらに光だけでなくマイクロ波・ラジオ波の偏光も用いてメモリー間の完全ベル測定を行うことで、入射した光子間の量子もつれ検出を行う。スケーラブルな量子中継を可能とするため、多数の核子を論理キュービットとする量子誤り訂正や光通信波長の光子とダイヤモンド吸収波長の光子の量子波長変換を合わせて行う。

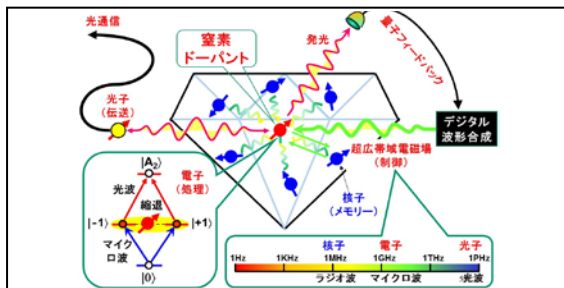


図1 ダイヤモンドNV中心による量子メディア変換集積固体量子メモリー。

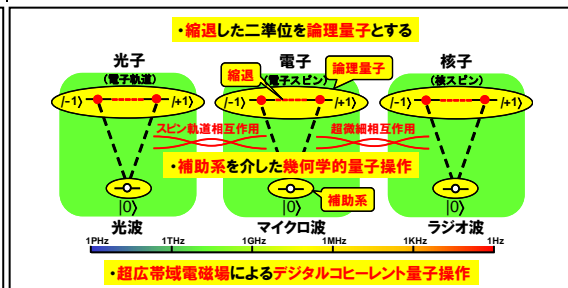


図2 ダイヤモンドに備わる量子ナノシステム。

#### 4. これまでの成果

##### ①量子テレポーテーション原理による光子から核子への量子メディア変換

伝送媒体である光子から記憶媒体である核子に量子状態を転写して保存する量子メディア変換に成功した。電子のスピン軌道相互作用、電子・核子間の超微細相互作用という物質に内在する量子もつれの力を利用し、独自の伝令付き量子テレポーテーション転写を原理とした(図3)。光子から窒素核子への任意偏光状態の転写で忠実度85%以上の量子メディア変換と10秒以上の量子メモリ時間を達成した[1]。

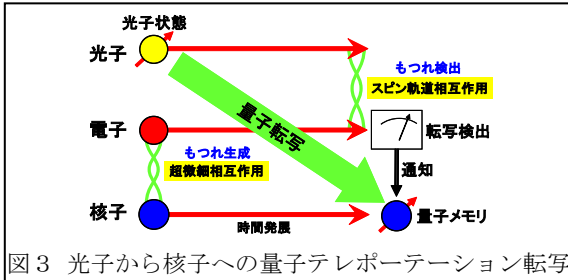


図3 光子から核子への量子テレポーテーション転写

##### ②集積メモリ核子への選択的転写

光子の偏光量子から複数の同位体炭素  $^{13}\text{C}$  の核子への選択的な転写に成功した。 $^{13}\text{C}$  核子には  $^{14}\text{N}$  核子のようなゼロ磁場分裂がないので、窒素をナノマグネットとして用いて電子-炭素間の量子もつれを生成し、ゼロ磁場下での転写を忠実度78%で実証した。さらに、炭素二つと結合したNV中心を用い、片方の炭素のみへの選択的な転写にも忠実度は約80%で成功した。独自のGRAPE手法で波形最適化されたマイクロ波を用い、複数の $^{13}\text{C}$ の中からターゲットとする $^{13}\text{C}$ だけを電子ともつれさせることで、これを可能とした。以上により、集積量子メモリ核子への選択的量子状態転写(図1)の目途を得た。

##### ③集積メモリ核子間の決定論的量子もつれ測定

スケーラブルな量子中継には、光子から核子への量子メディア変換に加え、NVと結合した二核子間の決定論的な量子もつれ測定が必要である。まずは、マイクロ波あるいは光波を用いた電子スピンのホロミック(幾何学的)量子操作に成功した[3,4]。また、マイクロ波偏波による電子-核子の万能なホロミック量子操作に忠実度99%で成功し[5]、二核子間のもつれ操作が電子を介して可能であることを示した。次に窒素核子の決定論的な測定(シングルショット測定)に忠実度87%で成功し、同位体炭素核子でも同様の測定を行っている。これらの組み合わせで決定論的量子もつれ測定が可能である。

##### ④複数核子による量子誤り訂正

複数の同位体炭素と結合したNVでは、電子スピンのコヒーレンスが $1\mu\text{s}$ のオーダーで

消失する。独自の幾何学的デカップリング(バンバンエコー)により、量子誤り訂正することなく、量子メモリ時間を3000倍伸長することに成功した[2]。

##### ⑤光通信からダイヤモンド波長の量子波長変換

非線形光学結晶で作られたPPLN導波路に $1.064\mu\text{m}$ の高強度ポンプ光を導入することにより、光通信波長とダイヤモンド波長 $637\text{nm}$ の光子間の相互変換に成功した。これまでに量子効率30%を達成した。この方式では、ポンプ光の波長制御で波長多重や波長トリミングが行えるという利点がある。

##### ⑥ダイヤモンド光電量子変換素子へ向けた取り組み

NV中心からの発光・受光効率の向上に向けた取り組みとして、ダイヤモンド上に直接半径 $800\text{nm}$ のソリッドイマージョンレンズ(SIL)を形成し、中心に配置したNV中心の受光・発光量の増強最大6倍を達成した。

#### 5. 今後の計画

忠実度のさらなる向上を目指し、機械学習を量子系へ適用したハミルトニアン学習の技術を構築する。既に複数のパラメタの同時推定に成功している。ハミルトニアン学習とGRAPEによる最適量子操作を組み合わせ、6つ程度のメモリアクセスを可能とする。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. Sen Yang, Hideo Kosaka and Joerg Wrachtrup, et. al., "High-fidelity transfer and storage of photon states in a single nuclear spin", *Nature Photonics*, 10, 507-511, (2016).

2. Yuhei Sekiguchi and Hideo Kosaka\*, et. al., "Geometric spin echo under zero field", *Nature Communications*, 7, 11668, (2016).

3. Yuhei Sekiguchi and Hideo Kosaka\*, et. al., "Optical holonomic single quantum gates with a geometric spin under a zero field", *Nature Photonics*, 11, 309-314 (2017).

4. Naoki Ishida and Hideo Kosaka\*, et. al., "Universal holonomic single quantum gates over a geometric spin with phase-modulated polarized light", *Optics Letters*, 43, 2380-2383 (2018).

5. Kodai Nagata, Kouyou Kuramitani, Yuhei Sekiguchi and Hideo Kosaka\*, "Universal holonomic quantum gates over geometric spin qubits with polarised microwaves", *Nature Communications*, 9, 3227 (2018).

#### 7. ホームページ等

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