

室温固体素子を用いた量子中継器実現に向けた研究開発（091502003）

Research and development toward realization of quantum repeaters using room-temperature solid devices

研究代表者

小坂 英男 東北大学電気通信研究所

Hideo Kosaka, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

研究分担者

水落 憲和[†] 力武 克彰^{††}

Norikazu Mizuochi[†] Yoshiaki Rikitake^{††}

[†]筑波大学大学院 図書館情報メディア研究科 ^{††}仙台高等専門学校 情報システム工学科

[†]Graduate school of Library, Information and Media Studies, University of Tsukuba

^{††}Department of Information Systems, Sendai National College of Technology

研究期間 平成 21 年度～平成 23 年度

概要

ユビキタスネット社会の安全性を支える量子情報通信は、100km 程度の短距離では既に実用化段階にあるが、これ以上長距離化あるいはネットワーク化するためには、全く新しい原理に基づく量子中継器の実現が必須である。量子中継の実際の運用と集積性を考えると、全固体素子による室温動作が望まれる。本研究では、室温で長時間の量子メモリーが可能なダイヤモンドを用い、光子から電子スピンを介した核スピンへの量子メディア変換、核スピンの量子メモリー、核スピンメモリービット間の量子もつれ検出など、量子中継器の要素機能を実現する手法を考案、実験系を構築し、室温動作可能な全固体量子中継器の実現に向けた指針を示した。

Abstract

Realization of a quantum repeater based on a new principle is essential for extending the distance of quantum inf-communications, which is already in practical use but limited at around 100 km. All solid quantum repeaters which work at room temperature are desired for the practical use and integration. In this project, we developed a new scheme to realize the essential functions such as quantum media conversion from a photon to a nuclear spin through an electron spin, quantum memory with a nuclear spin, quantum entanglement detection between nuclear spins, and constructed experimental systems toward the realization of room-temperature all-solid quantum repeaters.

1. まえがき

ユビキタスネット社会の安全性を支える量子情報通信は、100km 程度の短距離では既に実用化段階にあるが、これ以上長距離化あるいはネットワーク化するためには、全く新しい原理に基づく量子中継器の実現が必須である。量子中継機の実際の運用とスケラビリティ（集積性）を考えると、室温動作、固体素子で秒単位の量子メモリー時間、忠実度 1 の量子演算のなど、厳しい必要条件が要請される。本研究の目的はこれらの課題の根本的解決であり、室温動作全固体量子中継器の実現を目指すものである。

評価を行った。これを用い、目標とした 10ns 以内のスピン反転操作を達成した。さらにコヒーレントな光波パルスおよびマイクロ波パルスを同期して照射し、生成された単一 NV 中心のスピン量子状態を光検出可能な量子メディア変換検出システムを構築した(図 1)。また共同研究者との連携により、タイムビン転写機構ならびに量子テレポーテーション転写機構を理論的に解析するとともに(2・3 参照)、ダイヤモンドを用いた光子から核スピンへの量子メディア変換およびスピン状態検出の具体的なパルスシーケンスを開発し、その基本動作を実験により確認した。

2. 研究内容及び成果

2-1. ダイヤモンドを用いた光子から核スピンへの量子メディア変換

最終目標としたダイヤモンドを用いた核スピンへの量子メディア変換へ向け、まずは GaAs 半導体を用いて光子から電子スピンへの量子メディア変換[1]を可能とするタイムビン量子メディア変換機構を考案し、これを実験で実証した[2]。得られた忠実度は 82%と目標とした 67%以上を達成した。しかしながら、これを直接ダイヤモンド中の核スピンへの転写に適用するには機構の改良が必要であることがわかり、量子テレポーテーションを原理とする新たな転写機構を考案した。これを実証すべく、温度可変なダイヤモンド単一 NV 中心蛍光観察装置を構築し、基礎的な単一 NV 中心の

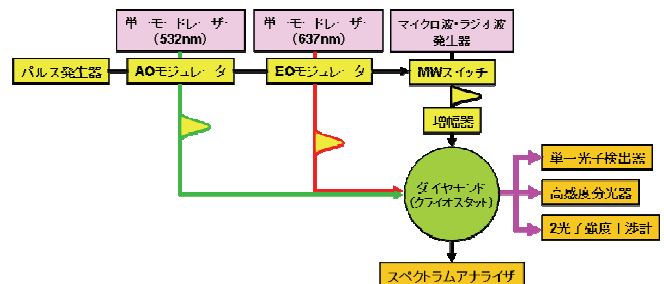


図 1. 量子メディア変換検出システムの構成概略図。

2-2. 核スピンの記録された2量子ビット間の量子もつれ検出

本プロジェクトでは、まずダイヤモンド中の単一 NV 中心の光学検出と単一スピンの操作を実現する装置（共焦点レーザー顕微鏡に磁気共鳴装置を組み合わせたシステム）を立ち上げ、本研究の目標達成に相応しい系（NV 中心における ^{13}C 核スピンの2個結合した系）を見出した。次にこれを用いることにより、目標としていたダイヤモンド中の核スピンの記録された2量子ビット間の4つの量子もつれ（ベル状態）検出の実証実験に成功した（図2）。生成されたベル状態を4つのエネルギー基底状態に完全射影する忠実度も目標レベルを達成した。これまでの報告では光学実験において4つのうち2つの量子もつれ検出のみ検出したという報告がなされていたが、本研究成果は4つのベル状態完全測定に大きく道を開くもので意義深いと考えられる。最終的に得られた忠実度は、最大で0.95%以上、平均で0.8以上と提案時に目標とした0.65以上を大きく上回った。

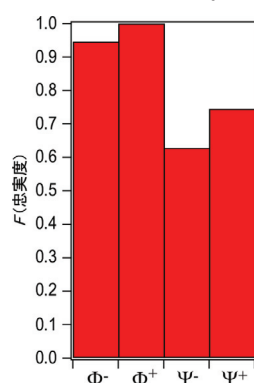


図2. 2つの核スピン量子ビット間のベル状態測定の F (忠実度) の実験結果。縦軸がそれぞれのベル測定の忠実度を表す。実験的にそれぞれのベル状態がそれぞれ4つのエネルギー基底状態に射影された後の評価の結果から求めたもの。

2-3. 量子メディア変換とスピン状態トモグラフィの理論に関する研究

我々は光子の量子状態（偏光状態やタイムビン状態）を電子スピンへと転写する手法を実証してきた[1,2]。さらに電子スピンから核スピンへ量子状態を写すには、固体素子内で働く電子スピン-核スピン間の超微細相互作用を用いることが考えられる。しかしながら、この相互作用は10~100Mz オーダーと非常に小さく、転写時間が電子スピンの励起状態から輻射緩和寿命を超えてしまう。そこで、量子テレポーテーションの原理を用い、光子から核スピンへ直接、転写する手法について検討を行った。図3に、量子テレポーテーションの原理を利用した光子から核スピンへの量子転写の量子回路を示す。この手法では初期状態として、電子スピンと核スピンとが量的にもつれ合ったベル状態にあることが必要である。オプティカルポンピングの手法により電子スピンを十分に分極させたうえで、MWシーケンスにより系を特定のベル状態へと準備する。また、量子テレポーテーションには光子と電子スピンとのC-NOT操作とそれに引き続く光子の偏光状態と電子スピン状態の測定が必要となる。ここでの操作においては、電子系の励起状態における軌道-スピン結合を利用する。励起状態では電子のスピンと軌道とが量的にもつれ合った固有状態を形成するが、入射光子の波長を特定の固有状態、たとえば $|1, \downarrow_e\rangle + |1, \uparrow_e\rangle$ という状態を選択的に励起するようにする。ここで $|1\rangle(|-1\rangle)$ は円偏光 $|\sigma^+\rangle(|\sigma^-\rangle)$ により励起される軌道状態である。その後、この励起状態からの発光をとらえ、検出があった場合のみ核スピンへ転写が行われたものとして、結果を採用する。励起状態からの発光を検出した場合には必ず、光子と電子スピンの状態がベル状態 $|\sigma^+, \downarrow_e\rangle + |\sigma^+, \uparrow_e\rangle$ に射影されており、量子テレポーテーションと同様に、このとき核スピンの状態は入

射光子の偏光状態を忠実に再現した重ね合わせ状態なる。通常の量子テレポーテーションでは、光子の偏光状態と電子のスピン状態の測定結果に応じて、核スピンに対し量子操作を行うが、特定の光子-スピン結合状態が得られた場合にだけ転写された核スピンを用いることにするのであれば、この量子操作は必要とならない。

このように、スピンと軌道が結合した固有状態への選択励起とそこからの発光検出によるポストセクション組み入れることで、量子テレポーテーションの手法による、光子から核スピンへの量子転写が可能であることを示した。成功するまで繰り返し測定するというポストセクションにより、忠実度が1となる転写が可能となる。

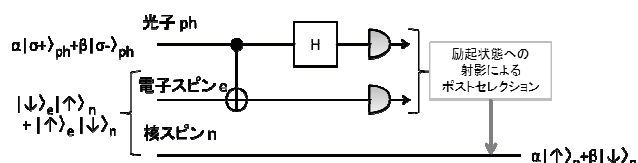


図3. 量子テレポーテーションの原理を利用した光子から電子スピンを介した核スピンへの量子状態転写の機構概略。

3. むすび

室温で長時間の量子メモリーが可能なダイヤモンドを用い、光子から電子スピンを介した核スピンへの量子メディア変換、核スピンでの量子メモリー、核スピンメモリービット間の量子もつれ検出など、量子中継器の要素機能を実現する手法を考案、実験系を構築し、室温動作可能な全固体量子中継器の実現に向けた指針を示した。

【誌上発表リスト】

- [1] Hideo Kosaka, Takahiro Inagaki, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori and Keiichi Edamatsu, "Spin state tomography of optically injected electrons in a semiconductor", Nature, 457, 702 (2009).
- [2] Hideo Kosaka, Takahiro Inagaki, Ryuta Hitomi, Fumishige Izawa, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori and Keiichi Edamatsu, "Coherent transfer of time-bin photons to electron spins in a semiconductor", Phys. Rev. A, 85, 042304 (2012).
- [3] N. Mizuochi, T. Makino, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, H. Okushi, M. Nothaft, P. Neumann, A. Gali, F. Jelezko, J. Wrachtrup, S. Yamasaki, "Electrically driven single photon source at room temperature in diamond" Nature Photonics, 6, 299-303 (2012).

【受賞リスト】

- [1] 小坂英男、石田（實）記念財団研究奨励賞、「ハイブリッド量子通信システムの構築へ向けた光子-電子スピン量子メディア変換の研究」（2011年12月9日受賞）
 - [2] 水落憲和、第25回ダイヤモンドシンポジウム優秀講演賞、「ダイヤモンド半導体を用いた量子情報素子」（2011年12月受賞）
 - [3] 力武克彰、石田記念財団研究奨励賞、「光子・電子スピン量子インタフェース素子の実現に向けた理論的研究」（2010年12月3日受賞）
- 「ハイブリッド量子通信システムの構築へ向けた光子-電子スピン量子メディア変換の研究」

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.quantum.riec.tohoku.ac.jp/>