

平成 27 年度研究開発成果概要書

課 題 名 : 量子もつれ中継技術の研究開発  
採 択 番 号 : 158 イ 01  
個別課題名 : 課題イ 遠隔ノード間での量子もつれ純粋化技術  
副 題 : ハイブリッド量子中継器へ向けた研究開発

(1) 研究開発の目的

広域量子通信ネットワークの中核となる量子中継システムの構成に必要な、遠隔ノード間での量子もつれの全量子的な純粋化を行うため、量子メディア変換の技術を核としてハイブリッド構成の量子中継システムを構築するための基盤技術を確立する。

(2) 研究開発期間

平成 23 年度から平成 27 年度 (5 年間)

(3) 実施機関

国立大学法人横浜国立大学 (実施責任者 教授 小坂英男) <代表研究者>  
国立大学法人大阪大学 (実施責任者 招聘教員 水落憲和)  
日本電信電話株式会社 (実施責任者 主幹研究員 Munro William John)  
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立情報学研究所 (実施責任者 教授 根本香絵)

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 198 百万円 (平成 27 年度 35 百万円)  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発課題と担当

課題イ-1: ハイブリッド量子中継基幹技術の開発  
課題イ-1-1: 量子トモグラフィ技術 (横浜国立大学)  
課題イ-1-2: 量子メディア変換技術 (横浜国立大学)  
課題イ-1-3: 複合システム動作技術 (横浜国立大学)

課題イ-2: ハイブリッド量子中継純粋化技術の開発  
課題イ-2-1: 量子ゲート操作技術 (大阪大学)  
課題イ-2-2: 量子もつれ検出技術 (大阪大学)  
課題イ-2-3: 量子メモリ分離技術 (大阪大学)

課題イ-3: ハイブリッド量子中継デバイス設計技術の開発  
課題イ-3-1: ハイブリッドゲート操作設計 (日本電信電話株式会社 (NTT))  
課題イ-3-2: ハイブリッド光モジュール設計 (国立情報学研究所 (NII))

(6) これまで得られた成果 (特許出願や論文発表等)

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	0	0
	外国出願	0	0
外部発表	研究論文	40	16
	その他研究発表	192	53

	プレスリリース・報道	34	6
	展示会	0	0
	標準化提案	0	0

## (7) 具体的な実施内容と成果

- 課題イ-1-1：量子トモグラフィ技術（横浜国立大学）
 

【目標】下記課題イ-1-2 の評価手法として、光子から核スピンへの量子メディア変換の量子過程を量子トモグラフィ評価するための基盤技術を開発する。この評価自体の忠実度はほぼ 100% とすることが必要である。

【実施内容・成果】ダイヤモンドの窒素空孔中心 (NV) による光子から核スピンへの量子メディア変換の量子過程を量子トモグラフィ評価するための基盤技術として、電子および核子の縮退論理キュービットを、光波、マイクロ波あるいはラジオ波により幾何学的に任意初期化、操作、読み出しする技術を開発し、ほぼ 100% の忠実度の量子状態および量子プロセスのトモグラフィ技術を開発した。
- 課題イ-1-2：量子メディア変換技術（横浜国立大学）
 

【目標】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技術を確立する。この際、光子検出を用いたポストセレクションにより、量子メディア変換が成功した事象だけを抽出する仕組みを内蔵する。ポストセレクションによる成功条件下の量子メディア変換の忠実度を 90% 以上とする。

【実施内容・成果】量子テレポーテーションの原理による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技術に成功した。このため、光吸収による電子と光子の量子もつれ検出、デジタルコヒーレント技術による縮退した電子と核子の量子もつれ生成の技術を開発した。光子検出を用いたポストセレクションにより、量子メディア変換が成功した事象だけを抽出する仕組みを内蔵し、量子メディア変換の忠実度を目標とした 90% 以上とすることに成功した。
- 課題イ-1-3：複合システム動作技術（横浜国立大学）
 

【目標】課題イ-2 とも協力して、量子メディア変換、量子ゲート、量子メモリを組み合わせたハイブリッド動作の実証実験を行う。これにより、量子中継の基本機構となる量子テレポーテーション動作を実証し、量子もつれの生成レート 1kHz 以上の可能性を検証する。

【実施内容・成果】量子メディア変換、量子ゲート、量子メモリを組み合わせたハイブリッド動作を行うため、幾何学的スピンエコーと呼ぶ新原理を導入し、量子メモリ状態を維持しながら量子メディア変換に必要な量子ゲート操作を同時に行う技術を開発した。これにより量子テレポーテーションに必要な量子もつれの生成と検出の時間を含めた量子メディア変換時間 100 $\mu$ s 以下と量子メモリ時間 7ms 以上を実現し、量子もつれの生成レート 1kHz 以上の可能性に目途をつけた。
- 課題イ-2-1：量子ゲート操作技術（大阪大学）
 

【目標】電子スピンによる高速・高忠実度の量子ゲート操作技術を確立。量子メモリの寿命時間内に 10 万回程度のゲート操作を可能とする。

【実施内容・成果】今回、CNOT (CROT) ゲート長を最短で 8ns 程度にすることができ、NV 中心の量子メモリの寿命時間内に 10 万回程度のゲート操作を可能とした最終目標を達成することができた。
- 課題イ-2-2：量子もつれ検出技術（大阪大学）
 

【目標】核スピン量子メモリ間の高忠実度の量子もつれ相関検出技術を確立。完全ベル測定をシングルショットで行い、90% 以上の忠実度を実現する。

【実施内容・成果】単一核スピン状態のシングルショット測定装置を立ち上げて測定技術を確立し、更に量子非破壊測定の忠実度を上げるための NV 電荷状態のほぼ 100% の安定化に成功し、完全ベル測定のための量子非破壊測定の高忠実度化に道筋を付けた。シングルショット完全ベル測定が今後の課題である。
- 課題イ-2-3：量子メモリ分離技術（大阪大学）
 

【目標】核スピンによる長寿命の量子メモリ実現。電子スピンのゲート操作によって劣化のない

デカップリング技術を確立し、1ms以上の量子メモリ時間(T2)を実現する。

【実施内容・成果】核スピンの高速位相制御を、幾何学的量子ゲートを用いることにより実現する技術を理論的に示した。この技術では、核スピンの位相シフトは、電界の回転により電子スピンの幾何学的位相を制御することで起こす。ゲート時間は電界の回転速度に比例し、ゲート操作の高速化が期待される。

- 課題イ-3-1：ハイブリッドゲート操作設計（日本電信電話株式会社（NTT））

【目標】

デカップリング：電子を介した光子から核スピンへの量子メディア変換や、電子・核スピン間の量子ゲートの実現の鍵となる各物理系間の相互作用の制御方法を提示する。

ゲート動作最適化：最終年度のデモンストレーションに向け忠実度98%以上、動作時間マイクロ秒以下を達成する高性能なゲート操作のあり方を明らかにし、次世代の設計開発の進むべき方向を明らかにする。

他ドナー系検討：量子鍵配送（QKD）を目途として中継システムに適用できる他のドナー系に関する分析を纏め、NV中心による方法との比較検討結果を纏める。

【実施内容・成果】

デカップリング：光入出力を有する共振器中にNV中心を配置した光モジュールを用い、拡張性のある量子中継ネットワークを構築できることを示した。また光吸収にもとづく中継ノードを採用しても、量子リレーや量子中継が可能になるアーキテクチャを見出した。

ゲート動作最適化：NVの電子と $^{15}\text{N}$ の核スピンのダイナミクスを調べ、高い忠実度を有するゲート操作が可能であることを示した。これを $^{13}\text{C}$ の核スピンを含む系に拡張し、単純な方法ではフォルトトレランスまで保証できないことを示した。

他ドナー系等別方式の検討：量子中継とは異なる、全く新しい量子鍵配送の長距離化法を提唱した。本方式は、量子中継で必要とされる物質量子メモリや量子誤り訂正符号を一切用いず、光デバイスのみに基づく中間ノードひとつで、通信速度を維持したまま量子鍵配送の通信距離を2倍にする。

- 課題イ-3-2：ハイブリッド光モジュール設計（国立情報学研究所（NII））

【目標】

キャビティ比較：キャビティとして有力候補であるフォトニック結晶、リング共振器等について、それぞれの長所・短所を比較・検討し、NV中心と光のハイブリッド光モジュールとして適した候補を絞る。

モジュール設計：スケーラビリティと集積性を保証するよう、制御系等も統合してモジュール化した光デバイスの設計を行う。光と物質の間の相互作用の効率と精度について、キャビティを用いない場合とも比較して、デバイスの性能を分析する。

システム性能評価：課題アと連携し、量子鍵配送を目途とした中継システムに必要な誤りレート等のシステム・パラメータを物理パラメータに変換して目標値を明らかにする。

【実施内容・成果】

キャビティ比較：片面共振器と両面共振器を用いた光モジュールでエンタングルメント配信のプロトコル上の特徴を解析した。発生するエラーをモデル化し、片面共振器の有用性を示し、必要な共振器の性能を数値的に示した。

モジュール設計：量子中継モジュールの設計を3方式で比較検討した。まずは片面共振器を用いた条件付き反射型のモジュールの特性を解析した。次に $^{13}\text{C}$ 核スピンを加えたNVC系についてエラーモデルの詳細検討を行い、ゲートの達成可能な精度を示した。吸収型の光モジュールでは、共振器と光ループを用い、ループにフリップ操作を挟むことによってスケーラブルな素子を提案した。

システム性能評価：ハイブリッド光モジュール特性の解析を行った。ゲートの成功確率と精度から、吸収型のモジュールでは、共振器を用いて吸収確率を上げることでスケーラブルな素子として機能することを示した。条件付き反射型のモジュールでは、課題アと協力してスケーラブルなモジュールとしての物理的パラメータを示した。