

平成 26 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<幹事>
 国立大学法人 大阪大学
 日本電信電話株式会社
 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 200 百万円 (平成 26 年度 38 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: 遠隔ノード間での量子もつれ純粋化技術

1. ハイブリッド量子中継基幹技術の開発 (横浜国立大学)
2. ハイブリッド量子中継純粋化技術の開発 (大阪大学)
3. ハイブリッドゲート操作設計 (日本電信電話株式会社 (NTT))
4. 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	23	9
	その他研究発表	125	34
	プレスリリース・報道	18	18
	展示会	0	0
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

- (1) 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の要素技術となる光子と

電子スピンの量子もつれ検出を実証した。その機構には、光子検出を用いたポストセクションにより、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ている。量子もつれ検出の忠実度は98%であり、ポストセ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に換算して80%以上という数値目標を達成した。また、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へ向け、スケーラブルなハイブリッド量子もつれ中継に不可欠な完全ベル状態測定と量子非破壊検出の原理機構を開発した。

(2) 量子中継器の動作のためには高速・高忠実度の量子ゲート操作技術と量子もつれ検出、及び長時間量子メモリが不可欠である。今年度は5万回に相当するゲート操作を行うため、 T_2 が500マイクロ秒程度以上のNV中心においてゲート操作を10nsで実証することを目指し、これを実証した。量子もつれ検出に関しては、ベル測定をシングルショットで行うための量子非破壊測定の忠実度を上げるために、電荷状態の安定化に取り組んだ。リンドープしたn型ダイヤモンドを用い、ほぼ100%近いNV⁻状態への安定化に成功した。また、複数の量子ビットにおける量子もつれを制御良く操作する技術は、もつれ検出の際にも必要となる技術であるが、今回、核スピンの3つ存在する系において、3つの核スピン間の量子もつれ、及び電子スピンを加えた4つの量子ビット間のもつれ生成に成功した。

(3) 量子中継システムは、光子の入出力と、量子情報を光子から電子へと変換し更に核スピンへと移すことで長時間保存し再生することを機能とする、光モジュールから構成される。有限のリソースのもとで、多数のモジュールを組み合わせ、スケーラブルで高い性能の量子中継ネットワークの構成法を検討した。二つのモジュール間で量子もつれ光子対を共有した上で、リソースを最小化した場合の能力を評価し、リソースに余裕をもたせたときの増加分を分析した。構成方式の最適化により、大規模な量子中継ネットワークが構成可能であることが示された。

量子通信の距離を拡大するには量子中継方式を利用する。しかし、距離に対してリソースが多項式程度でしか増加しない(従来型の)量子中継方式は、量子誤り訂正、あるいは(誤り耐性が施された)量子メモリが必要であり、従来の量子通信技術とギャップが存在する。本年度は、このようなギャップを埋める量子暗号方式を考案した。この方式は、単一光子源、線型光学素子、光子検出器とアクティブフィードフォワード技術に基づく測定装置を利用し、安全性は測定装置無依存量子鍵配送に委ねる。本方式では、800km程度の距離までであれば、原子集団による量子中継方式よりも、高効率な量子鍵配送ができる。

(4) 課題イのNV中心を用いた量子中継素子の実現化方法に基づき、電子スピンと光の射影測定に基づくエンタングルメント・スワッピング過程を中心に検討した。光子がノード・デバイスへ到達した時に3つの電子スピンと光子からなる全系の状態から、中央ノードの電子スピンと光の射影測定の構成方法が重要となる。全系の状態は若干複雑だが、測定方法を工夫することにより、スケーラブルな素子を構成する方法を提案した。この方法は、共振器と光ループからなり、ループに状態フリップ操作を挟むことによって、他の項からの寄与も積算することが可能となる。これにより積算後のゲートは非確率的なゲートとして実行できるように改良した。

システム性能評価：量子中継システム上でこのデバイスを評価するため、それぞれの吸収確率の場合のゲートの性能を数値的に調べた。異なる吸収確率それぞれについて、共振器とループにおける光損失やデコヒーレンスを考慮してゲートの成功確率と精度を示した。

(26-3)

数値的にゲートの振る舞いを調べることで、共振器を用いて全体としての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可能性を示した。また、核スピン ^{13}C の制御方法についても検討し、これら核スピンを用いることによりスケーラビリティの向上が示唆されるが、系の制御が複雑になるため、現時点では実現化方法としては核スピンは加えないことにした。