

1. 研究課題名：コヒーレント状態と固体量子ビットに基づく量子情報処理の研究

2. 研究期間：平成18年度～平成22年度

3. 研究代表者：山本 喜久（情報・システム研究機構・国立情報学研究所・情報学基礎研究系・教授）

4. 研究代表者からの報告

(1) 研究課題の目的及び意義

大規模な量子コンピュータを実現するための基盤技術として有力視されている固体量子ビットを含む共振器量子電磁気学（以下 cavity quantum electrodynamics (QED) と略す）システムをコヒーレント状態にある電磁波（以下 photon bus と略す）で相互に結合することにより2（量子）ビットゲートを実現する方法（以下 Qubus 量子コンピュータと略す）を、半導体素子と超伝導素子によって実現するための基礎技術を確立することを目的とする。現在の古典コンピュータでは処理できない複雑な問題を解くことのできる大規模な量子情報処理システムを構築するためには、1) 長いコヒーレンス時間を持つ量子ビット、2) 離れた量子ビット間での高速な演算を実現する量子プロセッサ、3) 分散した量子プロセッサ間を量子テレポーテーションネットワークでつなぐことを可能とするエンタングル状態の配信とこれを長時間保持する量子メモリ、の開発が不可欠である。特に遠隔量子ビット間での高速演算の困難さは最大の課題となっている。本研究では、これらの条件を満たすことのできる Qubus 量子コンピュータを取り上げ、その中でも将来の集積化・大規模化に有利な固体素子に的を絞って研究を行う。特徴の異なる3つの系について同時に検討を進める。第1は、GaAs 中の 29Si や ZnSe 中の 19F のような直接遷移形半導体中の中性ドナー不純物に束縛された電子スピンを量子ビットとする系である。photon bus にコヒーレントなレーザー光を、量子メモリにドナー不純物 29Si や 19F の核スピンを用いる。第2の系は、Si 中の 31P のような間接遷移形半導体中の中性ドナーに束縛された電子スピンを量子ビットとし、電子スピン共鳴のマイクロ波帯の共振器をコヒーレント状態のマイクロ波でつなぐシステムである。量子メモリにはドナー不純物 (31P) の核スピンが用いられる。19F、31P は自然界に 100% の確率で存在し、コヒーレンス時間の長い核スピン-1/2 を持つアイソトープである点に特色がある。第3の系として、超伝導磁束量子を量子ビットとし、コヒーレント状態にあるマイクロ波でつなぐ cavity QED システムを取り上げる。

(2) 研究の進展状況及び成果の概要

システム・アーキテクチャーを担当する N I I グループ（山本、根本）は、Qubus 量子コンピュータの構成法をより実用的なものにすべく、以下の2方向で検討を進めた。(1) 非共鳴単一光パルスによる誘導ラマン散乱過程を利用して、電子スピンの振動周期（ゼーマン周波数の逆数）程度の時間で1（量子）ビット演算を行うことを提案した。さらに、光導波路と光カー効果スイッチを用いて、電子スピンの振動周期の数倍程度の時間で2（量子）ビット演算を行うことを提案した。この2つのゲートを組み合わせることにより、クロック周波数 100GHz で動作する超高速 Qubus 量子コンピュータを構成することができる。(2) Qubus 量子ゲートでクラスター状態と呼ばれる一種のエンタングル状態を生成しておき、1（量子）ビットの射影測定により、順次量子演算を行っていくいわゆる“1方向量子計算”を構成することができる。この方式のスケーリング性能を調べ、線形光学量子コンピュータに比べて良い特性を持つことを明らかにした。直接遷移形半導体素子を担当するスタンフォード大学グループ（山本）は、上記(1)の Qubus 量子コンピュータを実現するための基本要素である以下の3つのテーマで研究を展開した。(3) GaAs 中のドナー不純物に束縛された電子スピンを 100fsec～1psec の単一の非共鳴極短光パルスで制御する実験技術を開発した。(4) 単一の励起子と高Q値のマイクロ共振器の間で強結合状態を実現した。(5) 単一のドナー不純物を安定して分離する技術を開発した。間接遷移形半導体素子を担当する慶応大学グループ（伊藤）は、以下の2つのテーマで研究を展開した。(6) Si 中の 31P ドナー不純物の原子核スピンの状態を読み出すために、束縛電子スピンへのハイパーファイン結合からくる励起子吸収波長の違いを、PLE 法と光電流検知法を使って測定する方法を実現した。(7) Si からの単一光子発光を効率よく実現する方法として、Be ペア発光の機構を解明した。超伝導素子を担当する NTT グループ（仙場）は、以下の方向で研究を展開するため、今年度は主に実験装置の立ち上げとデバイス作製に集中した。(8) 超伝導磁束量子ビットをマイクロ波光子でつなぐための cavity QED システムの基礎技術の確立を目指す。

5. 審査部会における所見

A（現行のまま推進すればよい）

Qubus 量子コンピュータの実現という挑戦的な課題に対して、研究開始以来、クロック周波数 100GHz の最高速量子コンピュータ構成法の開発、GaAs 系における単一量子ビットとマイクロ共振器の強結合状態の実現、Si 中の 31P 束縛励起子の発光と光伝導における核スピン磁場分裂の観測など、優れた研究成果を収めている。論文発表も活発であり、本研究の成果は国際的な学術誌を通して世界に発信されている。実験と理論のグループ間協力も円滑である。現在は、Qubit 専用の実験設備の立ち上げになおも精力を注いでいる段階と理解するが、今後も一層の研究の進展が期待される。