

樽茶 清悟

理化学研究所
グループディレクター

スピン量子計算の基盤技術開発

§ 1. 研究成果の概要

量子技術の高度化を目指してスピン量子操作の忠実度の研究と Si 技術への移行を重点化した。

1. 多数の量子ビットを操作するには多重の量子ドットに配した多数のゲートを複雑に操作する必要がある。複数のゲートの組み合わせを仮想ゲートとして使えばこの操作を単純化できることから、今回 GaAs 多重量子ドットに対して各ドットとゲート電極との静電結合を見積もり、各パラメータを独立に制御できるような仮想ゲートを自動的に生成するプログラムを構築した。
2. デコヒーレンス機構の解明に基づいて量子ゲート操作の高忠実度化を進めた。環境の雑音を高速で測定し電子スピン量子ビットにフィードバックする方法を開発することにより、ゲートの制御性を大幅に上げることに成功した。その結果 GaAs 量子ドットを用いた実験では量子コヒーレンスを 26 倍に増大できた(論文1)。また、フィードバック制御に用いられる雑音推定の理論的解析を行い、データ取得後のオフライン処理に関してベイズ推定に基づく最適なプロトコルを提案した。
3. 量子誤り訂正回路実装の前段階として、基本量子回路(量子非破壊測定(QND)、量子テレポーテーション(QT)、Toffoli ゲート)の実証実験を行った。QND は操作性の良い三重 GaAs 量子ドットの量子もつれ状態を利用して、初めて原理実証に成功し、誤り訂正回路の実現に有用であることを示した。QT は、同三重量子ドットを用いて、ベル測定を原理とする確率的なテレポーテーションを実行し、入力量子ビットのスピン角運動量が精度よく出力量子ビットにレポートされることを実証した。Toffoli ゲートは、デコヒーレンスの小さい Si/SiGe 三重量子ドットの3量子ビットで実行すべく、素子作成を進めている。現在3量子ビットができることを確認した段階にある。
4. 量子コンピュータへの技術展開に向けて、Si 技術を重点化した。集積化に適した素子の基本単位となりうる MOS 構造 p 型 Si 量子ドットを3つ集積した素子を作製し、その電気特性評価を実施した。各量子ドット中の電荷状態が適切に制御できることが測定され、集積化に向けて有望であることを確認した。また、Si/SiGe 二重量子ドットを用いて2量子ビットゲートの実装と評価を継続した。制御 NOT ゲートを用いて4つのベル状態を生成し、その忠実度(90%)が従来値を上回ることを

量子状態トモグラフィによって確認した。また、電気的および磁氣的雑音の影響が小さくなるように動作条件および操作方法を改善することにより、世界最高値の忠実度をもつ 2 スピン交換操作を達成した(論文2)。さらに、GaAs の QND 技術を Si/SiGe 二重量子ドットに移植し、読み出しと初期化の精度を大幅に増大できることを確認した(論文3)。

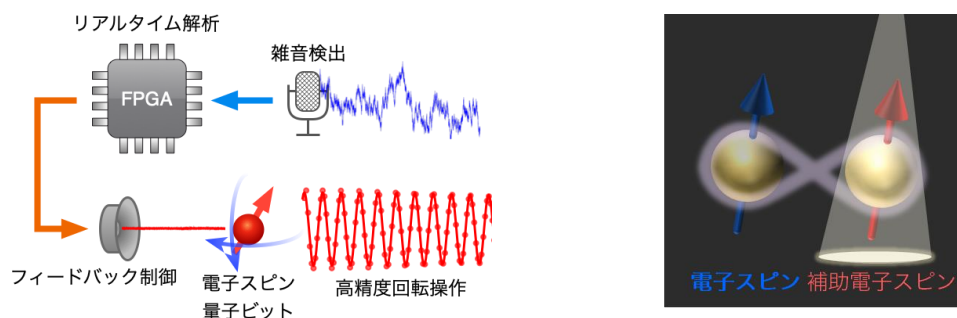


図 左: 電子スピン量子ビットのフィードバック制御スキーム. 右: 量子非破壊測定実験のイメージ. イジング型の相互作用を利用して電子スピン(青)の情報を別の電子スピン(赤)へもつれ転写してから読み出すことで、測定の影響が及びにくくなる。

【代表的な原著論文】

1. T. Nakajima, A. Noiri, K. Kawasaki, J. Yoneda, P. Stano, S. Amaha, T. Otsuka, K. Takeda, M.R. Delbecq, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, D. Loss, and S. Tarucha, “Coherence of a driven electron spin qubit actively decoupled from quasi-static noise”, Phys. Rev. X 10, 011060-1-11 (2020).
2. K. Takeda, A. Noiri, J. Yoneda, T. Nakajima, and S. Tarucha, “Resonantly driven singlet-triplet spin qubit in silicon”, Phys. Rev. Lett. 124, 117701-1-5 (2020).
3. J. Yoneda, K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, S. Li, J. Kamioka, T. Kodera, and S. Tarucha, “Quantum non-demolition readout of an electron spin in silicon”, Nature Communications, 11, 1144 (2020).

§ 2. 研究実施体制

(1) 樽茶グループ(理化学研究所)

① 研究代表者:樽茶 清悟

(理化学研究所創発物性科学研究センター グループディレクター)

② 研究項目

- ・スピン量子計算の多ビット化
- ・量子ゲートの高忠実度化と量子回路の最適化実験
- ・シリコン量子ドットへの技術移植

(2) Loss グループ(理化学研究所)

① 主たる共同研究者:Loss Daniel

(理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー)

② 研究項目

- ・量子ビット操作の理論的最適化
- ・拡張可能な量子ビット基本単位と小規模量子計算機で実装可能な量子計算回路の提案

(3) 小寺グループ(東京工業大学)

① 主たる共同研究者:小寺 哲夫 (東京工業大学工学院電気電子系 准教授)

② 研究項目

- ・シリコン量子ドット素子の不純物ドーピングおよび結晶欠陥の評価・制御
- ・シリコン量子ビット集積化の提案