

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

スピン量子計算の基盤技術開発

§ 1. 研究実施体制

(1)「樽茶」グループ

- ① 研究代表者:樽茶 清悟 (国立研究開発法人理化学研究所、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

- ① 主たる共同研究者:Loss Daniel (国立研究開発法人理化学研究所、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

- ① 主たる共同研究者:小寺 哲夫 (国立大学法人東京工業大学、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

§ 2. 研究実施の概要

多重量子ドットによる多量子ビット化については、まずドット4つを直線状に並べた4重量子ドットを作製し、各ドット中の4つの電子スピンのための独立の電子スピン共鳴を実現した。続いて、さらなる拡張性を見据え5重量子ドット的设计と作製を行った。ここでは2つの電荷計と3つの電極を持つ5重量子ドットを作製し(図1左)、1つの電荷計を含む3重量子ドットを単位とする動作でその電荷状態の制御と検出が可能になったことがわかった。また、複雑な5重量子ドットの電荷状態を静電容量モデルによる計算で再現できることを確認した。これらの結果より、多重量子ドットで構造的な制約のために生じる、初期化の精度、読み出しの感度、電極構造・配線の密集などの技術的課題に対する指針を得た。

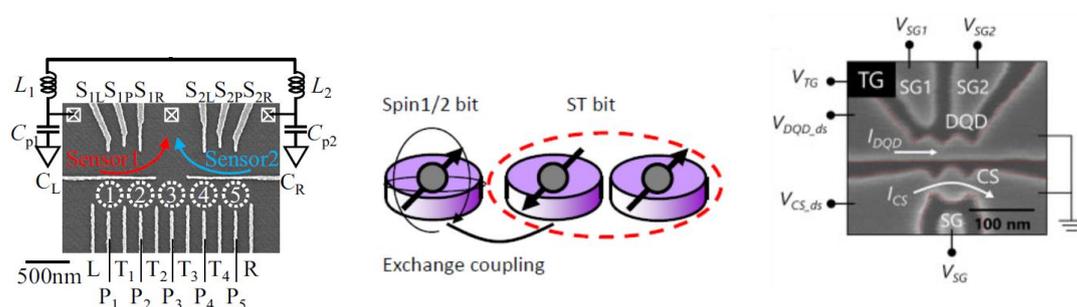


図 1: (左) 作製した 5 重量子ドット試料。(中) 3 重量子ドットにおける異種スピン量子ビット。(右) 試作した p 型 MOS2 重量子ドット。

デコヒーレンス機構の解明による量子ゲート高忠実度化では、核スピン・電荷の揺らぎといった環境雑音の解析と除去のために、雑音を高い時間分解能と感度で検出する手法を開発した。環境雑音は量子ドット中の電子スピンのダイナミクスに反映されることから、電子スピンの検出感度の向上が環境雑音の検出感度の向上において重要である。そこで、3重量子ドットにおける準安定状態の利用や、スピン閉塞現象におけるスピン緩和メカニズムを、理論・実験の両面から解明しスピン検出感度を改善した。続いて、電子スピンに対し、高速に測定した環境雑音に応じたフィードバック適応制御を用いてコヒーレンス時間を従来の 10 倍改善した。

最適な量子回路による現実的な誤り訂正回路の開発では、最も基本的かつ重要な量子アルゴリズムの一つである量子テレポーテーションの実現に向けて、その構成要素である、量子もつれ状態にあるスピン対生成、ベル基底への射影測定、単一スピン読み出しの実現に取り組んだ。これらの各要素は 3 重量子ドットにおける、単一スピン量子ビットと一重項三重項(ST)量子ビットから成る異種スピン量子ビット系において確かめた(図 1 中)。まず、適切なパルス動作によりスピン対生成(ST 量子ビット)と単一スピン読み出し(単一スピン量子ビット)が可能であることを確認した。また、ベル基底への射影測定では、スピン状態に応じて電子のトンネル時間が変わることを利用して、4 つのベル基底のうちの 2 つとそれ以外に判別することに成功した。

Si 量子ドットへの技術移植では、単一スピン操作精度の向上に向けて、コヒーレンス時間の向上に取り組んだ。核スピンを母材中から排除した同位体制御 Si 材料を用いて量子ドット試料を作製し、

コヒーレンス時間の増大を確認した(天然 Si の 10 倍)。また、集積化に適した素子の基本単位となりうる p 型 MOS 2 重量子ドットを試作し、その測定を行った(図 1 右)。この試料では、安定に動作する少数正孔状態を達成し、スピンの初期化と検出を可能にするスピン閉塞現象の観測とその緩和メカニズムを解明した。