

「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」
平成28年度採択研究代表者

H29 年度
実績報告書

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 (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 (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 (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では、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つの電子スピンに対して、電子スピン共鳴を用いて独立の単一スピン回転操作を実現した(図1左)。加えて、各ドットでの共鳴条件から、各ドットでのg因子の違いや形成されたドット位置の推測を行った。異なる電圧条件での推測結果を比較することで、各ドットの独立操作性や共鳴条件の電氣的な操作性について検証した。これらの結果から、5重以上の多重量子ドットでの単一スピン操作、多量子ビット化における技術的課題を抽出し、また解決するための指針を得た。

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、電子スピンの歳差運動データから環境雑音をリアルタイムに推定し、その影響を補償するように量子ビットの回転座標系をフィードバック制御するシステムをFPGAにより構築し、フィードバック時間2ミリ秒を達成した。また、このシステムを実際の電子スピン量子ビット制御に適用したところ、集団位相緩和時間 T_2^* を30倍改善することに成功した。

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、3量子ビットを実装できる3重量子ドットを用いて、1個のドットでスピン1/2量子ビット、残りの2個の隣接ドットでスピン一重項(S)、三重項(T)を基底とするST量子ビットを実装し、それぞれの量子ビットで独立に初期化、単一ビット操作、読み出しを実現した。また、これら異種スピン量子ビット間の交換相互作用を利用することで、スピン1/2量子ビットの状態に応じてST量子ビットの歳差運動振動数を制御可能なことを示した。一定時間交換相互作用をオンにすることで、異種スピン量子ビット間で制御位相ゲートを実現し、デコヒーレンス時間に比べて十分短い操作時間5.5ナノ秒を達成した。

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、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、量子演算忠実度の測定と位相コヒーレンス時間制限要因の評価を行った。1量子ビット操作の評価は標準的な手法であるランダム化ベンチマーキング法を用いて行い、99.93%の忠実度を達成した(図1中)。また、測定した雑音スペクトルから、この量子ビットの量子情報喪失は、通常の磁氣的雑音ではなく、電荷雑音が支配していることを突き止めた。また、集積化に適した素子の基本単位となりうるp型Si量子ドットを、MOS型と高濃度ドープ型で作製し、特性を評価した(図1右)。

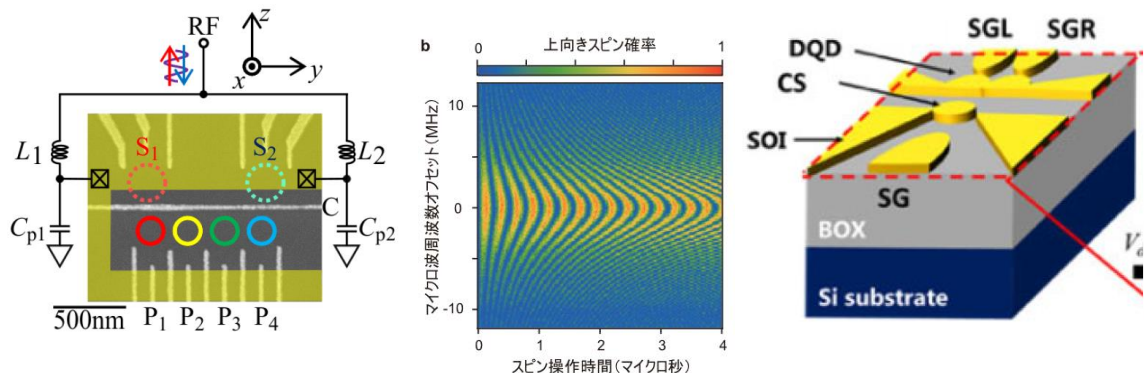


図1: (左)4量子ビット系。(中)高忠実単一スピン回転操作。(右)高濃度ドープp型Si量子ドット。

- [1] J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, T. Kodera, S. Oda, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, S. Tarucha, *Nature Nanotechnology* 13, 102–106 (2018).
- [2] T. Nakajima, M. R. Delbecq, T. Otsuka, P. Stano, S. Amaha, J. Yoneda, A. Noiri, K. Kawasaki, K. Takeda, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, D. Loss, and S. Tarucha, *Physical Review Letters* 119, 017701 (2017).
- [3] S. Mizoguchi, N. Shimatani, M. Kobayashi, T. Makino, Y. Yamaoka and T. Kodera, *Jpn. J. Appl. Phys.* 57, 04FK03-1-4 (2018).