

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
2016年度採択研究代表者

2020年度 年次報告書

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

量子操作の忠実度の向上と大規模化の基盤技術開発に向けて、Si 技術の重点化を継続した。

1. 誤り訂正回路の実装に向けて 3 量子ビット操作の研究(量子テレポーテーション、量子ビットの高忠実度化、Toffoli ゲート操作)を継続した。昨年度原理確認したテレポーテーションの忠実度を定量評価し、誤り要因を明らかにした。Toffoli ゲートの基盤技術として、高忠実度の独立 3 量子ビット操作と隣接ビット間の交換結合制御に成功した。

2. 高忠実度化に関して、論理ゲートの基本である制御 NOT のゲート忠実度を正確に評価し、世界最高値と同等の値(98%)を達成した。また、フィードバック制御技術を電荷センサーに導入し、100kHz 以下の電圧変動を強力に抑制することに成功した。この技術は多量子ビットの読み出しに有用である。

3. 集積化素子の基本単位となりうる MOS 構造 p 型 Si 二重量子ドット素子を作製し、高周波特性を評価した。スピンの高速操作を可能とするスピン軌道相互作用を介したスピン共鳴に成功し、集積化に有望であることを確認した。また、同 p 型の Si 量子ドットを3つ集積した素子を作製し、電気特性を評価した。

4. 主たるデコヒーレンス要因である電荷雑音の解明を本格化した。ベイズ推定に基づく評価の理論を開発することにより、誤り訂正や多ビット化で問題となる、雑音の時空間的相関を精度よく見積もることが可能となった。量子ビット間の雑音相関の測定を開始し、明瞭な相関を検出した。現在解析を急いでいる。また、バンド構造に基づく理論を構築し、正孔スピン量子ビットに対する雑音の影響が急激に減少する電場・磁場条件の存在を予測した。

5. NISQ 2 次元配列デバイスの実現に向けて、Si/SiGe ヘテロ構造基板を利用した量子ドットデバイス作製の技術を応用して作成可能な 3x3 ドット配列を提案し、量子操作のシミュレーションを行った。

§ 2. 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

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

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

【代表的な原著論文情報】

- 1) Y. Kojima, T. Nakajima, A. Noiri, J. Yoneda, T. Otsuka, K. Takeda, S. Li, S. D. Bartlett, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Probabilistic teleportation of a quantum dot spin qubit”, npj Quantum Information, vol. 7, No. 68, pp.1-6, 2021.
- 2) Takashi Nakajima, Yohei Kojima, Yoshihiro Uehara, Akito Noiri, Kenta Takeda, Takashi Kobayashi, and Seigo Tarucha, “Real-time feedback control of charge sensing for quantum dot qubits”, Phys. Rev. Applied vol. 15, pp.L031003, 2021.
- 3) Sinan Bugu, Shimpei Nishiyama, Kimihiko Kato, Yongxun Liu, Takahiro Mori and Tetsuo Kodera, “RF reflectometry for readout of charge transition in a physically defined p-channel MOS silicon quantum dot”, Jpn. J. Appl. Phys. vol. 60, SBB107, 2021.
- 4) S. Hiraoka, K. Horibe, R. Ishihara, S. Oda and T. Kodera, “Physically defined silicon triple quantum dots charged with few electrons in metal-oxide-semiconductor structures” Appl. Phys. Lett. vol. 117, 074001, 2020.
- 5) R. Mizokuchi, M. Tadokoro and T. Kodera, “Detection of tunneling events in physically defined silicon quantum dot using single-shot measurements improved by numerical treatments”, Appl. Phys. Express, vol. 13, pp. 121004-1-4, 2020.