

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. 研究成果の概要

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 重量子ドット中の電子スピン制御から得られた知見を踏まえて、改良型デザインの量子ドット素子を作製し、その電気的特性の評価を行った。複数の制御電圧を同時操作することにより実験パラメータの独立操作を実装し、5 以上の多量子ビット化における技術的課題の解決に向けた指針を与えた。また、量子シミュレーションへの応用を目的とした 4 電子スピン状態の数値シミュレーションを実施し、これが実験的に再現できることを実証した。

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測定を用いた環境雑音の推定時間を 0.7 ミリ秒まで短縮した。これによって抑制された雑音を解析することで、量子コヒーレンス時間を最適化するための理論解析および実験手法の確立を進めた。また、電気的雑音によって生じるスピン緩和機構の理論的解明を進め、これらを通じて電子スピン量子ビットの性能を最大化するための雑音抑制方法に関する指針を得た。

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、その実現の基本要素となる 2 ビットゲート制御を実装し性能評価を行った。一電子からなるスピン 1/2 量子ビットと二電子からなるスピン一重項-三重項量子ビットを組み合わせることで、量子ビットの制御性と読み出し速度を両立する最適化を実現した。これら異種スピン量子ビット間で高速な制御位相ゲートを実装し(図左)、その性能を評価した結果を論文として公表することで、量子非破壊測定をはじめとする誤り訂正回路の基本技術要素の実装に向けた道筋を示した。

Si 量子ドットへの技術移植では、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(図右)。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、単一量子ビット制御の高忠実度化に関しては、マイクロ波操作パルス波形の最適化によって、忠実度を

向上することができることを示した。2 量子ビット制御については、Si/SiGe 2 重量子ドット試料を用いて、基本的な 2 ビットゲートである制御 NOT ゲートの実証実験を進めた。量子ビット状態に応じたコヒーレント振動が観測され、高忠実度な 2 ビットゲートの実現に期待の持てる結果が得られた。

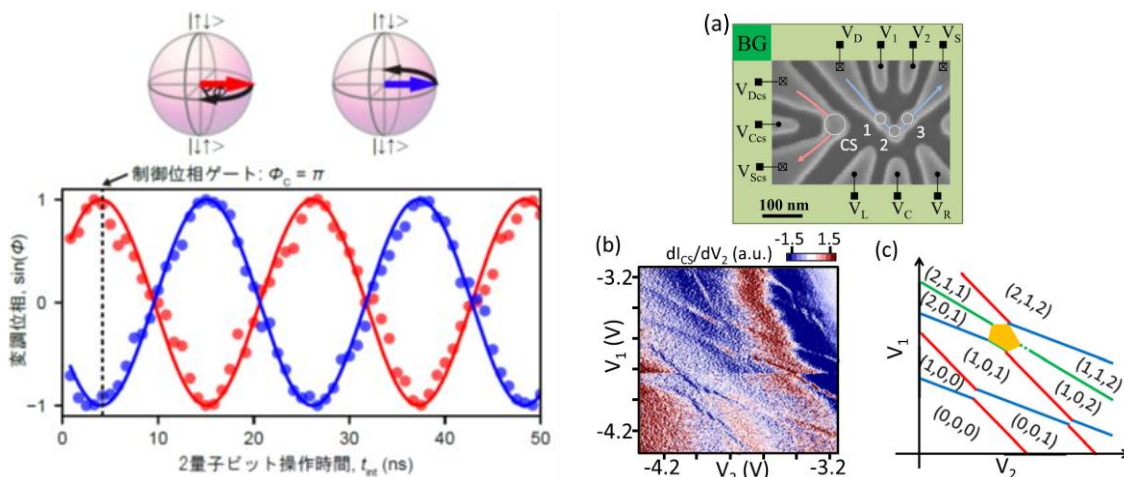


図 左: 異種スピン量子ビット間で実装された高速な制御位相ゲート[論文 1 より]. 右: MOS 構造 Si 量子ドットを3つ集積した素子の電子顕微鏡写真(a)、測定された電子輸送特性(b)、対応する3重量子ドットの電荷状態安定図(c)[論文 3 より].

#### 【代表的な原著論文】

1. A. Noiri, T. Nakajima, J. Yoneda, M.R. Delbecq, P. Stano, T. Otsuka, K. Takeda, S. Amaha, G. Allison K. Kawasaki, Y. Kojima, A. Ludwig, A.D. Wieck, D. Loss and S. Tarucha, “A fast quantum interface between different spin qubit encodings”, *Nature Communications*, vol. 9, pp.5066, 2018
2. L. C. Camenzind, L. Yu, P. Stano, J. Zimmerman, A. C. Gossard, D. Loss, D. M. Zumbühl, “Hyperfine-phonon spin relaxation in a single-electron GaAs quantum dot”, *Nature Communications*, vol. 9, pp.3454, 2018
3. R. Mizokuchi, S. Oda, T. Koder, “Physically defined triple quantum dot systems in silicon on insulator”, *Applied Physics Letters*, vol. 114, 073104-1-4, 2019

## § 2. 研究実施体制

### (1) 樽茶グループ(国立研究開発法人理化学研究所)

- 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(国立研究開発法人理化学研究所)

- 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(東京工業大学)

- 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