

情報担体を活用した集積デバイス・システム
2020年度採択研究代表者

2022年度
年次報告書

田中 雅光

名古屋大学 大学院工学研究科
准教授

人工スピンで作る柔らかさ可変の担体による高エネルギー効率情報処理

主たる共同研究者:

小野 貴継 (九州大学 システムLSI研究センター 准教授)

牧瀬 圭正 (産業技術総合研究所 デバイス技術研究部門 特定フェロー)

研究成果の概要

超伝導を利用した単一磁束量子回路は、半導体集積回路では到達できない 100 GHz 級の動作が可能であり、ポストムーア時代を支える集積回路技術として期待される。本研究では、単一磁束量子に新たに「柔らかさ」と呼ぶパラメータを持たせ、エネルギー効率に特に優れたコンピューティングの基盤を創出することを目指す。情報担体が「柔らかい」とは、外部の擾乱や相互作用の影響を受けやすい状態を指し、安定して情報を保持し、確実な操作ができる「堅い」状態から、熱雑音近傍のような物理極限に迫る「柔らかい」状態までを自在に制御し、その代わりスイッチングに伴う消費エネルギーを広い範囲で調整する。このような柔らかさ可変の情報担体を実現する人工スピン回路の集積化と、非厳密高エネルギー効率演算に適した近似計算アルゴリズム、アーキテクチャ探索に取り組む。

今年度は、磁性ジョセフソン接合を含む人工スピン回路の集積化に向け、これまでに開発した回路パラメータ最適化ツールを用いて、より安定に動作させるための設計指針を明らかにした。特に、人工スピン回路に自発的に生じる超伝導位相差が望まないループ電流を誘起し、回路動作に影響することが明らかとなり、位相差を補償することで安定動作が得られることを見出した。これらの知見に基づき基本論理ゲートの設計を進めるのと平行し、論理ゲート単位でエラー率を設定できるシミュレータ開発を行った。インパルス状の電圧パルスを用いる単一磁束量子回路に適した回路構成を探索し、機械学習での利用が想定される浮動小数点演算器の要素回路の解析を行った。集積プロセス確立に向けては、デバイス構造を決定し、詳細なレイアウト設計を進めた。人工スピン回路のループインダクタンスを小さく設計できることから、熱雑音の 50 倍程度のエネルギーまでスイッチングエネルギーを小さく制御できると見込んでいる。

【代表的な原著論文情報】

- 1) S. Tanemura, Y. Takeshita, F. Li, T. Nakayama, M. Tanaka, and A. Fujimaki, “Optimization of half-flux-quantum circuits composed of π -shift and conventional Josephson junctions,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, art. no. 1701305, 2023.
- 2) M. Higashi, Y. Takeshita, K. Kato, H. Fujisawa, F. Li, M. Tanaka, T. Yamashita, and A. Fujimaki, “Analysis of the effect of $0-\pi$ SQUIDs for enhancing mutual coupling,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 5, art. no. 1600805, 2023.
- 3) I. Nagaoka, R. Kashima, M. Tanaka, S. Kawakami, T. Tanimoto, T. Yamashita, K. Inoue, and A. Fujimaki, “50-GFLOPS floating-point adder and multiplier using gate-level-pipelined single-flux-quantum logic with frequency-increased clock distribution,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 33, no. 4, art. no. 1302711, 2023.