

2024 年度年次報告書

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

田中 雅光

名古屋大学 大学院工学研究科
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 量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター 総括研究主幹)

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、より複雑な回路構造となる論理ゲートの詳細設計、試作、評価を進めた。論理ゲートにおいては、素子ばらつきなどで、磁性ジョセフソン接合を含む超伝導量子干渉素子(人工スピン素子)に非対称性があると、スイッチング動作や周囲の素子との干渉による影響がより顕在化しやすいという課題を明らかにし、回路設計に反映させた。また、熱雑音近傍に迫るには、人工スピン回路のループインダクタンスをさらに小さく設計する必要がある、そのための集積プロセス確立に向けて行った初回の試作結果のフィードバックを行った。人工スピン回路を用いた情報処理に関しては、人工スピン回路の構造を積極的に利用してトグルフリップフロップが効率的に構成できることを利用し、低消費電力バイナリカウンタを含む極低温量子コンピュータシステムを対象にケーススタディを実施した。また、インパルス状の情報担体を利用する本回路は Stochastic Computing (SC) との親和性も高く、本年度は SC において効率的で高精度な加算処理の実装を提案した。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Ikki Nagaoka, Tomoki Nakano, Ryota Kashima, Masamitsu Tanaka¹, Taro Yamashita, and Akira Fujimaki, “Investigation of timing margin in single-flux-quantum 4 bit adders for increasing clock frequency of gate-level-pipelined circuits,” Applied Physics Express, vol. 17, no. 5, p. 054501 (4 pages), 2024.
- 2) Feng Li, Masayuki Higashi, Taichi Sato, Masamitsu Tanaka, and Akira Fujimaki, “Intrinsic superconducting phase battery,” Applied Physics Letters, vol. 124, no. 22, p. 222601 (5 pages), 2024.
- 3) Yuki Matsumoto, Teruo Tanimoto, Masamitsu Tanaka, and Takatsugu Ono, “Low-power half-flux-quantum based counter circuits for cryogenic quantum computers,” IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, Montreal, Canada September 2024.