【基盤研究（S）】

大区分C

研究課題名　可逆量子磁束回路を用いた熱力学的限界を超える超低エネルギー集積回路技術の創成

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授　吉川（よしかわ）　信行（のぶゆき）

研究課題番号：　19H05614　研究者番号：70202398
キーワード：　電子デバイス・集積回路

【研究の背景・目的】

今日の情報機器の爆発的な消費電力の増大を抑えるためには、デバイスの動作原理の見直しによる根本的な低電力化が必要不可欠である。一方、入力から出力、あるいは出力から入力への双方向の演算が可能な可逆計算機では、無限小のエネルギーで計算が行えることが予想されている。

本研究は、低エネルギー動作を特徴とする断熱的量子磁束回路(AQFP)を用いた可逆演算回路の学理を明らかにし、論理回路の熱力学的極限を超える究極の低消費エネルギー集積回路を実現する。これにより回路の消費エネルギーを半導体回路に対して 6 桁以上低減し、冷却電力を考慮しても十分な優位性を生み出す。本研究は可逆 AQFP を中核技術とし、新規プロセッサアーキテクチャ、磁性体を用いた位相シフト AQFP、3 次元高密度集積回路技術を研究し、超省エネ集積回路の基盤技術を確立する。プロジェクトの最終目標として低電力動作が可能な可逆 AQFP プロセッサの実現を目指す。

【研究の方法】

半導体 CMOS 回路など通常の演算回路は、図 1(a)に示す様に非可逆な演算を行うため、演算の結果、情報のエントロピー（情報の複雑さ）が減少する。Landauer らの検討によればその際に熱力学的エネルギーが消費され、それが演算における消費エネルギーの下限を制限すると考えられている。一方、図 1(b)に示す可逆演算回路では、入力から出力、あるいは出力から入力への双方向の演算が可能であり、情報のエントロピーが保存される。そのため、演算におけるエネルギーを無限小にできる可能性がある。

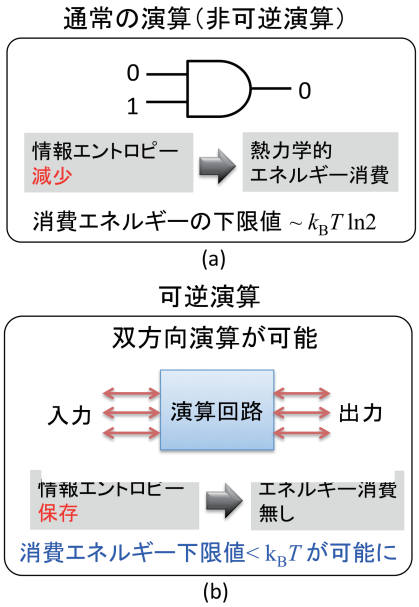

図 1　(a) 非可逆演算回路と(b)可逆演算回路

本研究では、断熱的量子磁束パラメトロン(AQFP)と呼ばれる超伝導論理ゲートを用いて図 2 に示す可逆論理ゲートを構成し、これを用いて超低消費エネルギーの演算回路を実現する。研究では、可逆演算回路における消費エネルギーの下限値を解明すると共に、可逆演算回路を用いた集積回路技術を確立する。

【期待される成果と意義】

本研究により、今の半導体に比べて 6 桁以上の低消費エネルギーで動作する集積回路技術の確立を目指す。これらは、データセンターやスーパーコンピュータなどの高性能情報機器の大幅な低消費電力化をもたらす。また、極低温で動作する量子コンピュータの制御回路への応用も可能である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, “Reversible logic gate using adiabatic superconducting devices,” Scientific Reports, 4, 6354 (2014).
・T. Yamae, N. Takeuchi, N. Yoshikawa, “A reversible full adder using adiabatic superconductor logic,” Supercond. Sci., Technol., 32, 035005 (2019).

【研究期間と研究経費】

令和元年度－令和 5 年度
153,500 千円

【ホームページ等】

http://www.yoshilab.dnj.ynu.ac.jp/jpn/
nyoshi@ynu.ac.jp

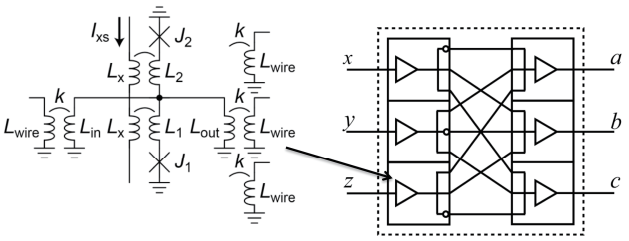

図 2 断熱的量子磁束回路(AQFP)を用いた可逆演算回路