



丸文学術賞 受賞者

竹内 尚輝
神戸大学 大学院システム情報学研究所 准教授

断熱超伝導素子(AQFP)の提案と
超低電力集積回路への展開
究極の省エネ回路を目指して

研究の背景

ICTに伴う消費電力は増加の一途をたどっており、AIやIoTを中核とする超スマート社会の実現には、従来の集積回路技術に比べて飛躍的にエネルギー効率の優れたエレクトロニクスが必要となる。では、どうすれば極限的に小さな消費エネルギーで動作する集積回路を実現できるか? これには、次の2つの方向性が考えられる:①論理状態(0/1)を表現するために用いる物理量・材料・デバイスを変更する。②論理状態のスイッチ方法を変更する。現在の集積回路では、電荷によって論理状態を

表すため、配線の充放電やリーク電流によって余分なエネルギー散逸が伴う。また、論理状態を急速に切り替えるため(非断熱スイッチ)、電源が回路に行った仕事は全て散逸してしまう。よって、上記2つの観点から集積回路の動作原理を変えることで、エネルギー効率を抜本的に改善できる可能性がある。

そこで我々の研究グループは、1980年代に発明された磁束量子パラメトロン(QFP)を発展させた低電力論理素子として、断熱磁束量子パラメトロン(AQFP)を提案した[1]。AQFPは、エネルギー効率の優れた超伝導素子と、低エネルギースイッチ

原理である断熱スイッチとの相乗効果により、極めて小さな消費エネルギーで動作可能である。我々は、AQFPを基本素子とした回路設計手法を確立し、様々な低電力デジタル回路を開発した。さらに、AQFPの物理的特徴を活用し、可逆計算機、確率的エレクトロニクス、単一光子イメージャ、量子ビット制御回路等の新奇集積システムに応用展開した。以上を通じて、AQFPの優れたエネルギー効率ならびに次世代集積回路技術としての高いポテンシャルを明らかにした。

研究の成果

図1aに、AQFPロジックの基本ゲート(バッファ)を示す。この回路は、2つのジョセフソン接合(J_1, J_2)および超伝導配線によって構成される。励起電流を印加すると、入力電流に応じてどちらかの接合がスイッチし、出力電流(符号が論理値0/1を表現)が生成される。なお、AQFPの状態をリセットするため、励起電流は交流信号であり、電源とクロックの両方の役割を果たす。このような特徴を持ったAQFPを基本素子として、複雑なデジタル回路を開発するための設計手法を構築し、様々な集積回路の動作実証を行った。図1bのチップはその一例であり、AQFPによって構成された8 bit加算器である[2]。

表1に、一般的な論理素子とAQFPの比較を示す。AQFPは、超伝導電流を用いて論理状態を表現するため、原理的には散逸を伴わずに情報の伝搬・保持が可能である。また、ポテンシャルエネルギーの形状を滑らかに変化させ、論理状態を可逆的に切り替えるため(断熱スイッチ)、電源が行った仕事はほとんど散逸されない。その

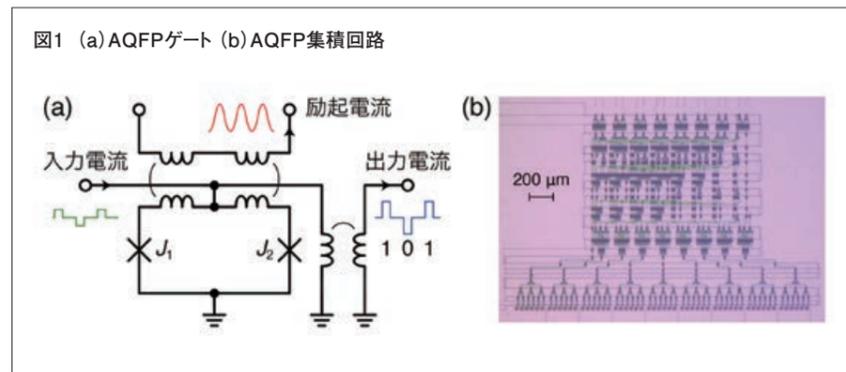
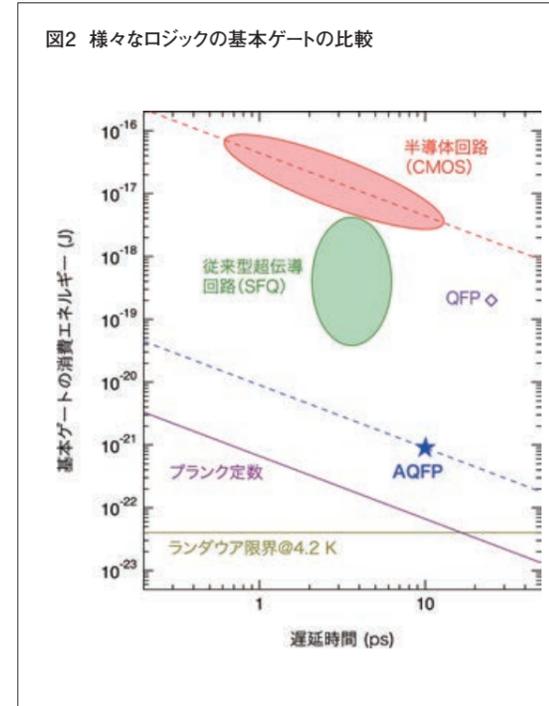


表1 一般的な論理素子とAQFPの比較

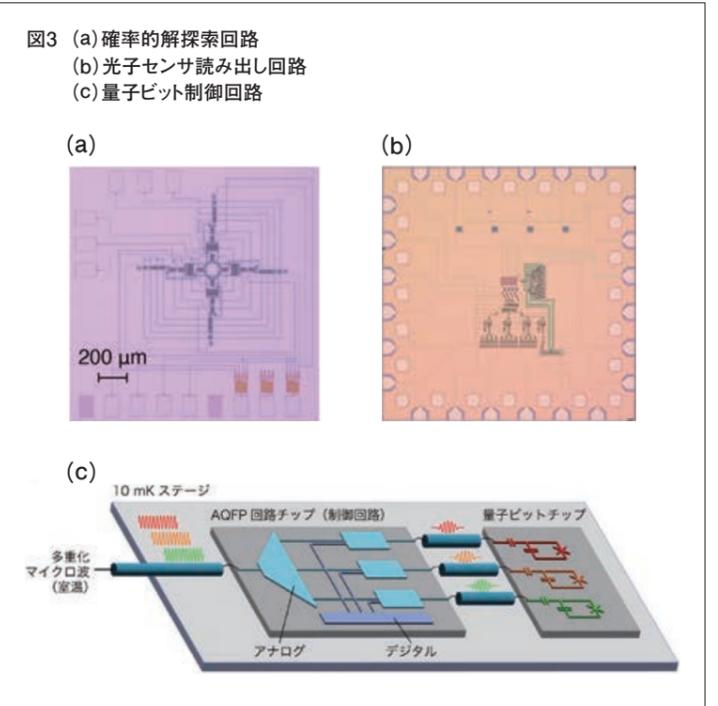
	一般的な論理素子	AQFP
論理状態の表現方法	電荷 配線の充放電 リーク電流 情報の伝搬・保持に散逸が伴う	超伝導電流 ゼロ抵抗 磁束の量子化 ジョセフソン効果 原理的には無散逸
論理状態のスイッチ方法	非断熱スイッチ 不可逆過程 電源の仕事はすべて散逸	断熱スイッチ 可逆過程 電源の仕事はほとんど保存



結果、AQFPは情報の伝搬・保持・スイッチのいずれも小さな散逸で実行できる。

なお、断熱スイッチに伴う散逸の大きさは、どれだけゆっくり回路を動かしたかによって決まる。そしてこの「どれだけゆっくり」は、ジョセフソン接合の特性時間とクロック周期の比に依存する。そこで我々は、プロセスおよび回路設計の両観点からパラメータを最適化し、サブpsの極めて小さな特性時間を実現した。これによって、GHzオーダーの高速クロック周波数においても、AQFPの動作は十分にゆっくり(断熱的)とみなすことができ、断熱スイッチの恩恵を最大限に享受できる。図2に、様々なロジックの基本ゲートの消費エネルギーと遅延時間を示す。AQFPの消費エネルギー($\sim 10^{-21}$ J)は、他の回路方式に比べて桁違いに小さく、ランダウア限界(一般的な論理素子の最小散逸)のわずか20倍程度である。また、上記は5 GHz動作時の値であり、集積回路応用として重要な超低消費エネルギーと高速動作の両立が可能であることを表す。

AQFPは、優れたエネルギー効率に加えて、多様な物理的特徴を有する。これを利用し、様々な新奇集積システムに応用展開した:①AQFPの物理的可逆性を応用し、究極的な低エネルギー演算である可逆



計算の実現可能性を示した[3]。②AQFPが容易に確率的挙動を実現できることに着目し、熱ゆらぎを利用した確率的解探索回路(図3a)[4]や確率的ニューロン回路等の新奇エレクトロニクスを開発した。③AQFPの優れた0/1判別能力を利用した高感度コンパレータを実現し、大規模単一光子イメージングに向けて、超伝導単一光子センサ・アレイの極低温読み出し回路(図3b)を開発した[5]。④AQFPは交流電流によって駆動されるため、本質的にマイクロ波技術と相性が良い。そこで、極低温下で多数の量子ビットにマイクロ波を照射し、ゲート操作を行うスケーラブル量子制御回路(図3c)を提案した[6]。

将来の展望

AQFPを基盤とした超低電力集積回路技術は、将来的に様々な産業応用に結び

つくと考えられる。特に、極低温下で動作する超伝導量子ビットとは親和性が高く、大規模量子コンピュータ開発において重要な要素技術になると期待できる。なお、AQFPは決して万能な素子ではなく、産業応用に向けていくつかの課題(冷却コスト、集積密度等)を有する。よって今後は、半導体回路や従来型超伝導回路(SFQ)等の様々なロジック・メモリとの有機的融合が、AQFPの産業応用を開拓する上で肝要になると考えられる。

謝辞

本研究は多くの方々のご支援・ご協力のもとに行われました。学生時代からご指導いただいている横浜国立大学・吉川信行教授をはじめ、国内外の共同研究者の先生方、ならびに研究に貢献してくれた学生の皆様に心より感謝申し上げます。

References(参考文献)

- [1] N. Takeuchi et al., IEICE Trans. Electron. E105.C, 251 (2022).
- [2] N. Takeuchi et al., Appl. Phys. Lett., 114, 042602 (2019).
- [3] N. Takeuchi et al., Sci. Rep., 7, 75 (2017).
- [4] N. Takeuchi et al., Phys. Rev. Appl., 11, 044069 (2019).
- [5] N. Takeuchi et al., Opt. Express, 28, 15824 (2020).
- [6] N. Takeuchi et al., npj Quantum Inf., 10, 53 (2024).