

## 有限温度における AQFP 回路のエネルギー効率に関する検討

## Study on the Energy Efficiency in AQFP Logic at Finite Temperature

横浜国大, °竹内 尚輝, 山梨 裕希, 吉川 信行

Yokohama Nat. Univ., °Naoki Takeuchi, Yuki Yamanashi, Nobuyuki Yoshikawa

E-mail: takeuchi-naoki-kx@ynu.jp

EFLOPS を超える演算能力を有した将来のスーパーコンピュータ実現のため, 我々は超低電力ロジックである Adiabatic quantum-flux-parametron (AQFP) 回路 [1] の研究を行なっている. AQFP 回路では, ポテンシャルエネルギーを断熱的に変化させることによって消費エネルギーを極限的に小さくすることが可能である. これまでに, 高 Q 値のジョセフソン接合を用いた  $sub-k_B T$  動作の実証 [2], 物理的に可逆な論理ゲートを用いた可逆計算の実証 [3] に成功した. 以上の結果は, AQFP 回路を用いた論理演算に伴う消費エネルギーには下限値が存在しないことを示している. しなしながら, 集積回路プロセスに依存してどの程度のエネルギー効率 (エネルギー遅延積) が得られるかは不明であった. そこで本研究では, プロセスに依存してどの程度のエネルギー効率が有限温度で得られるかを解析的に検討する.

AQFP 回路の消費エネルギーは動作周波数とジョセフソン接合の Q 値に依存するため, エネルギー遅延積  $\Theta$  は下記式で与えられる.

$$\Theta = \frac{4I_c \Phi_0^2}{\alpha(I_c R_n)} \quad (1)$$

ここで,  $R_n$  は常伝導抵抗,  $\alpha$  はサブギャップ抵抗と常伝導抵抗の比である. また接合はアンシャントであることを仮定した. 式 (1) より, プロセス固有の  $\alpha$  に依存して  $\Theta$  が決定されることが分かる. Figure 1 に式 (1) を用いて算出したエネルギーと遅延時間の関係を示す. ここで, AQFP 回路の臨界電流値は  $I_c = 50 \mu\text{A}$  とした. 同図より, アンシャント接合を用いた AQFP 回路では, 最先端の

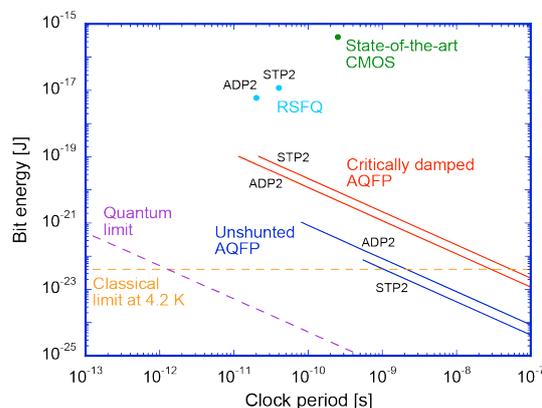


Fig. 1 Bit energy vs. typical clock period. The EDP of unshunted AQFP fabricated using STP2 is only three orders of magnitude larger than the quantum limit.

CMOS 回路に比べて 6 桁程度小さな消費エネルギーで動作が可能であることが分かる.

さらに, 古典的及び量子的極限での  $\Theta$  を考察するため, 式 (1) を下記のように変形する.

$$\Theta = \frac{32\pi \ln 2}{1.76\alpha} \cdot \frac{E_j}{k_B T_c \ln 2} \cdot \frac{\hbar}{2} \quad (2)$$

ここで,  $E_j$  はジョセフソンエネルギー,  $T_c$  は臨界温度である. 発表当日は, 式 (2) を用いて, AQFP 回路のエネルギー遅延積がプロセスに依存して有限温度でどの程度まで量子力学的極限 ( $\hbar/2$ ) に近づくかを議論する. 本研究の成果は SUST に報告された [4].

- [1] N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, *Supercond. Sci. Technol.* **26**, 035010 (2013).
- [2] N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 062602 (2013).
- [3] N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, *Sci. Rep.* **4**, 6354 (2014).
- [4] N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, *Supercond. Sci. Technol.* **28**, 015003 (2015).