

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

## 特集：低温デジタルデバイス

### 「論理演算回路の消費電力限界を打破する超伝導可逆回路」

独立行政法人 情報通信研究機構  
未来 ICT 研究所 ナノ ICT 研究室  
特別研究員 竹内尚輝

ExaFLOPS を超える次世代ハイエンドコンピュータを実現するためには、CMOS 回路に比べて革新的に消費電力の低い論理回路が必要となる。このような究極的に高いエネルギー効率を実現するため、計算機とエネルギーの物理的関係に関する議論が古くより行われてきた。中でも最もよく知られた議論は、「演算に伴う最小の消費エネルギーはエントロピー（情報量）の減少量によって決まる」と予言した Landauer の原理<sup>1)</sup>である。近年、Bérut らによってようやくこの原理の妥当性が実験的に確認された<sup>2)</sup>。これらの状況から、エントロピー変化を伴わずに無限小の消費エネルギーで演算が可能な可逆計算<sup>3)</sup>の実現に期待が寄せられている。しかしながら、可逆計算をデバイスレベルで実現した研究例はこれまでに報告されていない。

そこで我々は、低電力超伝導回路である Adiabatic quantum-flux-parametron (AQFP)<sup>4),5)</sup>を用いて可逆計算を実現する研究に取り組んでいる。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スイッチングに伴う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、実験による 10 zJ ビットエネルギー動作の実証<sup>6)</sup>、数値解析によるサブ  $k_B T$  ビットエネルギー動作の実証<sup>7)</sup>に成功した。さらに、エネルギー遅延積が量子力学的極限 ( $\hbar/2$ ) に迫る程小さくできることも示された<sup>8)</sup>。これらの研究結果から、可逆計算を構成する低電力なビルディングブロックとして AQFP 回路が適していると考えられる。

可逆計算を実現するためには、物理的に可逆なデバイスが必要であると言われている<sup>9)</sup>。そこで我々は、図 1a に示す Reversible quantum-flux-parametron (RQFP) ゲート<sup>10)</sup>を可逆論理ゲートとして提案した。RQFP は 3 つの Splitter (SPL) ゲートと 3 つの Majority (MAJ) ゲートより構成される。AQFP 回路では SPL と MAJ が同じ回路図で表されるため、RQFP ゲートは左右対称、つまり物理的に可逆である。図 1b に RQFP ゲートの消費エネルギーの計算結果を示す。全ての入力パターンにおいて、消費エネルギーが AC バイアス電流の立ち上がり/下がり時間に対して線形的に減少し、下限値が存在しないことが分かる。これは、物理的可逆性から、RQFP ゲートを構成する全ての AQFP 回路のポテンシャルエネルギーが断熱的に変化するためである。以上より、RQFP ゲートを用いることによって、無限小の消費エネルギーで演算が可能な可逆計算の実現に初めて成功した。さらに、産業技術総合研究所が提供する Nb 集積回路プロセスを用いて RQFP ゲートの動作実証にも成功した。

CMOS 等の非断熱回路では、熱力学的な観点から論理演算の際に  $k_B T$  よりはるかに大きな消費エネルギーが必要となる。これに対して本研究で提案した RQFP ゲートを用いた可逆計算では、 $k_B T$  よりも小さな消費エネルギーで論理演算が可能となり、エネルギー効率の観点から 6 桁以上の優位性が見込める。今後は、RQFP ゲートを用いた超低電力可逆計算システムの実現に向けた検討を進める。

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

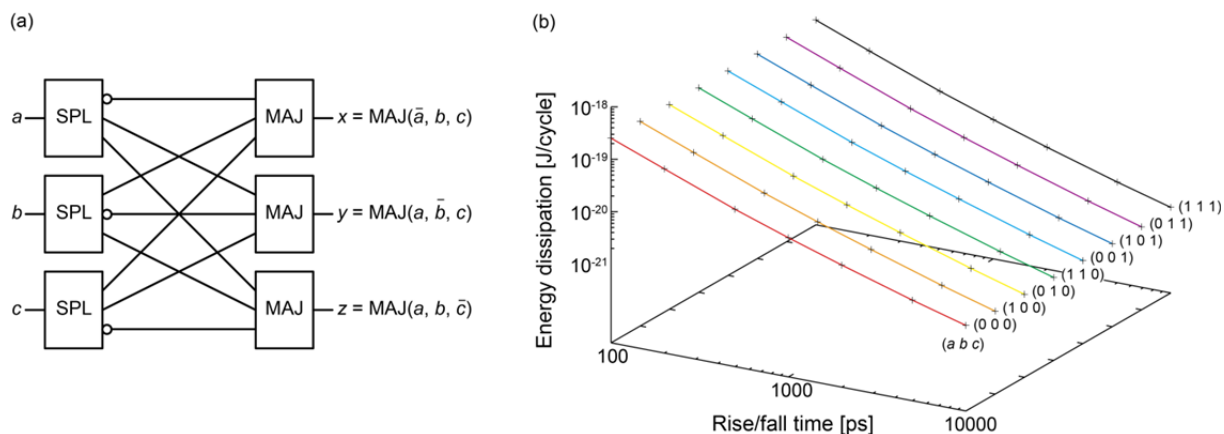


図1 RQFP ゲート。(a) ブロック図。ここで、 $MAJ(a, b, c) = ab + bc + ca$  である。(b) 消費エネルギーの計算結果。横軸はAC バイアス電流の立ち上がり/下がり時間を表す。計算には、入出力バッファゲートの消費エネルギーも含まれている。

## 参考文献：

- 1) R. Landauer, "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process," IBM J. Res. Dev., vol. 5, no. 3, pp. 183–191, Jul. 1961.
- 2) A. Béruit, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider, and E. Lutz, "Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics.," Nature, vol. 483, no. 7388, pp. 187–9, Mar. 2012.
- 3) E. Fredkin and T. Toffoli, "Conservative logic," Int. J. Theor. Phys., vol. 21, no. 3–4, pp. 219–253, Apr. 1982.
- 4) N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device," Supercond. Sci. Technol., vol. 26, no. 3, p. 035010, Mar. 2013.
- 5) N. Takeuchi, K. Ehara, K. Inoue, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Margin and Energy Dissipation of Adiabatic Quantum-Flux-Parametron Logic at Finite Temperature," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, p. 1700304, Jun. 2013.
- 6) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Measurement of 10 zJ energy dissipation of adiabatic quantum-flux-parametron logic using a superconducting resonator," Appl. Phys. Lett., vol. 102, no. 5, p. 052602, 2013.
- 7) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Simulation of sub- $k_B T$  bit-energy operation of adiabatic quantum-flux-parametron logic with low bit-error-rate," Appl. Phys. Lett., vol. 103, no. 6, p. 062602, 2013.
- 8) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Energy efficiency of adiabatic superconductor logic," Supercond. Sci. Technol., in press.
- 9) K. K. Likharev, "Classical and quantum limitations on energy consumption in computation," Int. J. Theor. Phys., vol. 21, no. 3–4, pp. 311–326, Apr. 1982.
- 10) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Reversible logic gate using adiabatic superconducting devices," Sci. Rep., vol. 4, p. 6354, Sep. 2014.