

特集：超電導デジタルデバイス「極限低消費電力断熱型 QFP 回路」

横浜国立大学大学院
工学研究院
教授 吉川信行

現在のスーパーコンピュータの100倍以上の性能を持つエクサスケールコンピュータを実現するためには、エネルギー効率の高い論理デバイスが必要不可欠である。論理デバイスのエネルギー効率を考える際、最も重要な評価指標はビット当たりのスイッチングエネルギーである。

単一磁束量子 (single flux quantum; SFQ) 回路はコンピュータシステムの消費エネルギーを飛躍的に低減する技術として知られている。ジョセフソン接合の臨界電流を I_c 、単一磁束量子を Φ_0 とすれば、SFQ論理ゲートの動的スイッチングエネルギーは $I_c\Phi_0$ で与えられ、極めて小さい。しかしながら現在のところ、この10倍以上の静的エネルギーがバイアス電流供給用のオンチップ抵抗で消費されている。システムの冷却に必要な電力を考えた場合、これは大きなエネルギー効率の低下につながる。近年、LRバイアスSFQ回路¹⁾、reciprocal quantum logic (RQL)²⁾、eSFQ³⁾など、静的消費エネルギーを低減しようとする研究が世界中で行われている。しかしながら、これらの研究の目標は静的消費エネルギーの削減であり、スイッチングにおける本質的なエネルギーである動的消費エネルギー $I_c\Phi_0$ を低減することはできない。一方、超伝導論理ゲートの動的消費エネルギーの低減を目指した研究として、負のインダクタンス結合を利用してn-SQUIDを用いた可逆的超伝導回路が提案されている⁴⁾。

これに対して我々は、論理ゲートをゆっくりと断熱的に動作させることで、超伝導論理回路の動的消費エネルギーを低減できることを提案した。今回、磁束量子パラメトロン (Quantum Flux P@rametron; QFP) を断熱動作させることで動的消費エネルギーを極限的に低減できることを示し、QFPの断熱動作のためのパラメータ条件を明らかにした⁵⁾。また、断熱型QFPゲートを試作し、その正常動作を実験により確認した。図1にはISTEC標準プロセス (STP2) を用いて作製した断熱型NOTゲートを3段接続した回路のチップ写真を示す。本回路の正常動作は低速において確認された。回路シミュレーションにより、標準プロセスを用いた場合、断熱型QFPゲートの消費エネルギーは4 GHzの動作スピードにおいて $140 \text{ k}_B\text{T} = 0.006 \text{ aJ}$ 程度であることが示された。この値は最新のCMOS論理回路に対して5ケタ以上小さい。本研究により断熱モード超伝導論理回路は、コンピュータシステムの消費エネルギーを極限的に低減する技術として有効であることが示された。

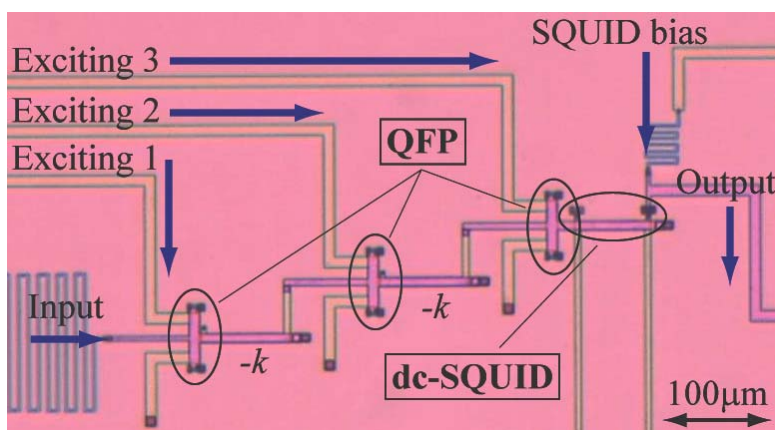


図1 断熱型QFP NOTゲートを3段接続した回路の顕微鏡写真。最終段には出力信号検出用のdc-SQUIDが接続されている。

参考文献：

- 1) N. Yoshikawa, Y. Kato, Supercond. Sci. Technol., 12, 918 (1999).
- 2) Q. Herr, A. Herr, O. Oberg, A. Ioannidis, J. Appl. Phys. 109, 103903 (2011).
- 3) O. A. Mukhanov, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21 760 (2011).
- 4) V. K. Semenov, G. V. Danilov and D. V. Averin, IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, 455 (2007).
- 5) N. Yoshikawa, D. Ozawa, Y. Yamanashi, Superconductivity Centennial conference 2011, September 2011, The Hague, Netherlands.

[超電導 Web21 トップページ](#)