

CT-1-5

ジョセフソン効果のデジタル応用 Digital Application of Josephson Effect

藤巻 朗
Akira Fujimaki

名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

1. はじめに

超伝導のデジタル応用は、ジョセフソン効果の発見の数年後には始まり、現在にいたっている。ここでは、ジョセフソン効果以外にもゼロ抵抗現象や磁束の量子化といった物理が積極的に用いられており、まさに超伝導の総合技術とすることが出来る。逆に言うと、進展著しい半導体技術に対抗するには、いかに超伝導特有の現象を利用していかかが鍵を握っていると良い。ここでは、ジョセフソン効果のデジタル回路開発について振り返るとともに、現在の研究開発動向について報告する。

2. ラッチング回路

デジタル回路におけるジョセフソン接合の魅力は、臨界電流 I_c の存在と高速スイッチング特性である。前者は、2値論理による論理ゲートの構成には不可欠な特性である、また、後述するように 10 ps 程度のスイッチング時間は、当時のトランジスタのスイッチング時間より 3 桁以上短く、非常に魅力的であった。

ジョセフソン接合を利用した論理ゲートやその集積回路の開発は、IBM を中心に行われた[1,2]。これは、のちにラッチング回路と呼ばれる回路方式であり、2 値の信号の“0”“1”は、零電圧状態と有限電圧状態 V_g で定義付けされた。有限電圧は、超伝導ギャップ電圧に対応した電圧であり、当時使われていた鉛合金では、典型的には 2.5 mV であった。3 端子素子化を図るため、発案当時は、大きな単独ジョセフソン接合における I_c の外部磁場依存性が利用された。しかし、面積を小さくする必要性から、すぐに SQUID の I_c の外部磁場依存性が用いられるようになった。前段の論理ゲートからの出力電流によって磁場を発生させ、当該論理ゲートを零電圧状態から有限電圧状態へとスイッチさせるというのが、基本的なアイデアである。論理機能は、磁気結合の向きや発生する磁場の大きさによって調節された。

1970 年代後半になって、様々な論理ゲートファミリが提案された。ここでは、入力感度の向上のための直接電流注入やそれに伴う入出力分離技術と言った幾つかの技術的な改良がなされ、最終的にはマイクロプロセッサが試作されるに至っている[3]。

1983 年、世界を牽引していた IBM がジョセフソンコンピュータの開発を中止すると宣言した。その理由は、材料的な問題、回路上の課題、そして Si 集積回路技術の急成長であった。材料的な課題は、鉛合金ジョセフソン接合の不安定性であったが、これはほぼ同時期に Nb/Al-AIO_x/Nb ジョセフソン接合が開発され、問題は解決された。回路上の課題は、10 GHz 以上でジョセフソン接合を交流駆動する

場合に発生するパンチスルーと呼ばれる現象である。ラッチング回路の場合、1 演算が終わると次の演算を行うためにリセットが必要となる。このリセット動作と同期信号を兼ねて、数 GHz の高周波駆動が行われた。しかしながら、10 GHz を超えるとリセットできない現象が、確率的に発生することが分かってきた。この制約により、ラッチング回路の動作周波数は 10 GHz 程度が上限とされ、鉛接合の不安定性と絡み、急速に動作周波数と集積度を伸ばしてきた半導体技術に対して競争力を失っていった。

3. 単一磁束量子回路 (SFQ 回路)

ラッチング回路で問題となった高周波電流駆動、動作周波数限界を打破する回路方式が単一磁束量子 (single flux quantum, SFQ) 回路である。この回路では、超伝導ループ内の磁束量子の有無を 2 値信号の“1”, “0”に対応させている。クロック信号となる磁束量子やデータ信号を担う磁束量子に伴う周回電流の大きさを制御し、接合の I_c を超えるかどうかで論理動作を実現する。もととなる発想は、Fulton らによって 1973 年に提唱された Flux shuttle である[4]。ジョセフソン線路 (多数のジョセフソン接合の並列回路) に印加する直流バイアス電流を適切に調整することで磁束量子を任意のループに止めたり、また動かしたりするシフトレジスタの動作が確認されている。ラッチング回路では、接合のスイッチング時間は容量の充電時間、すなわち CR 時定数で決まっていたが、Flux Shuttle では充放電は発生せず、その分スイッチング時間は短縮される。

磁束量子を用いた回路は、その後 Nakajima らによって論理演算可能な形 (位相モード回路) へ拡張され[5]、さらに Likharev らによって Rapid Single Flux Quantum (RSFQ) 回路として体系化された[6,7]。動作周波数は、トグルフリップフロップ回路において 750 GHz に達しており[8]、他のデバイスを含め現在までの論理回路で最高動作周波数となっている。

RSFQ 回路の最大の特徴は、配線におけるゼロ抵抗現象の積極的利用である。すなわち、導波路を超伝導体によって構成することによって、理想受動線路の構成が可能となる。ここでは SFQ に対応するパルスが電磁波として伝搬し、数 mm 以上の長距離であっても、ジッタフリーの信号伝送が可能となる。

最近の半導体大規模集積回路では、長い配線における信号遅延時間、長い配線を駆動するための消費エネルギーが問題となっている。これに対し、超伝導工学研究所で開発されたアドバンスドプロセス 2(ADP2)による SFQ 集積回路では、x 方向、y 方向に独立した配線専用層が設けられた[9]。合わせて CAD 技術も進歩し、現在は、論理ゲート間を自由に配線することが可能となってきている。このよう

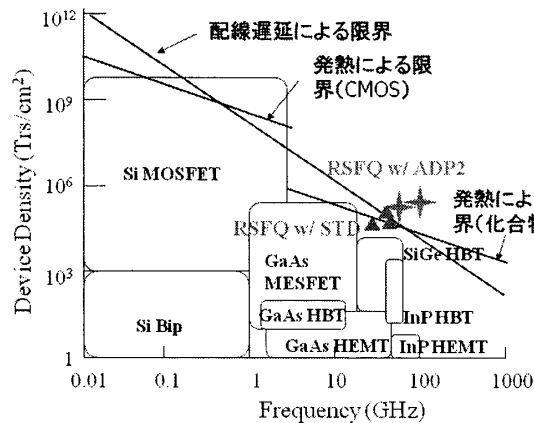


図1 各デバイスによる集積回路の動作周波数と集積密度。

に超伝導受動線路を基軸とした RSFQ 回路は、消費エネルギー、動作周波数の観点から十分半導体集積回路に伍する性能を有している。

4. SFQ 集積回路の現状と将来

図1は、各種デバイスによる集積回路におけるトランジスタの集積密度と動作周波数を示したものである。半導体集積回路では、上述した配線遅延による動作速度限界のほか、発熱密度による集積限界が危惧されている。図中にはそれら2つの限界を示した。

RSFQ 回路では、ADP2の1世代前の作製プロセス（標準プロセス、STD [10]）によって、すでにマイクロプロセッサが実証されている[11,12]。また、ADP2によって約2倍の高速化と4倍の高密度化が図られた。これらを、図1中に示した。なお、1ジョセフソン接合を1トランジスタとして集積密度を計算した。図1から分かるように、RSFQ 集積回路はすでに半導体デバイスの限界線上に達している。すなわち、高速動作可能な集積回路として、RSFQ 回路はもっとも優れた位置を占めている。

図2は、集積回路におけるトランジスタもしくはジョセフソン接合の1演算当たりの消費エネルギーとクロック周期をプロットしたものである。ここでの消費エネルギーは、1つの集積回路で実際に消費された全エネルギーを素子数で割ることで求めた。図から分かるように、現在の CMOS 技術はラッチング論理回路に迫っている。一方、RSFQ 集積回路は、高速性、低消費エネルギー性に優れ、ADP2の採用によって品質パラメータのエネルギー・遅延積（EDP）は CMOS に比べ4桁以上の優位性を得ている。これは、冷凍機の投入電力を考慮しても約1桁優れた性能を維持していることを意味している。

最近になって、RSFQ 回路の消費電力をさらに低減化し、CMOS 集積回路に対し絶対的な優位性を確保しようとする試みがなされている[12-16]。これらの回路の消費エネルギーとクロック周期は図2中では黄色の楕円で示している。すでに、加算器の動作実証がなされており、1接合当たりの消費エネルギーは 10^{-19} J程度とジョセフソン接合の結合エネルギー $I_c \Phi_0$ にほぼ等しくなっている。すなわち、通常動作モードにおける消費エネルギーの下限に近付いている。幾つかの回路方式では、断熱動作[17]や可逆計算[18]を目指すことで、物理的極限に迫る計算を行おうとしてい

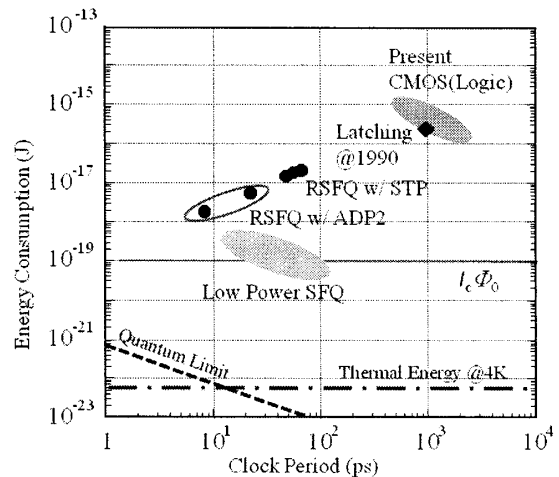


図2 CMOS および SFQ 回路における1素子1演算の消費エネルギーとクロック周期。

る。超伝導の特徴を生かした試みであり、研究の進展が期待される。

参考文献

- [1] J. Matisoo, Appl. Phys. Lett., 9, pp. 167-168 (1966).
- [2] W. Anacker, IEEE Trans. Magn. MAG-5, p. 968 (1969).
- [3] S. Kotani, T. Imamura, S. Hasuo, IEEE J. Solid State Circuits, 25, pp. 117-124 (1990).
- [4] T. A. Fulton, L. N. Dunkleberger, Appl. Phys. Lett. 22, p. 232 (1973).
- [5] K. Nakajima, Y. Onodera, Y. Ogawa, J. Appl. Phys. 47, pp. 1620-1627 (1976).
- [6] K. K. Likharev, O. A. Mukhanov, and V. K. Semenov, in SQUID'85, Berlin, Germany: W. de Gruyter (1985) 1103.
- [7] K. K. Likharev, V. K. Semenov, IEEE Trans. Appl. Supercond. 1. Pp. 3-28 (1991).
- [8] W. Chen, A. V. Rylyakov, V. Patel, J. E. Lukens, K. K. Likharev, Appl. Phys. Lett. 73, pp. 2817-2819 (1998).
- [9] M. Hidaka, S. Nagasawa, K. Hinode, T. Satoh, IEICE Trans. Electron. E91-C, pp. 318-324 (2008).
- [10] S. Nagasawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 5, p. 2447 (1999).
- [11] M. Tanaka et al, ISSCC2004, p.298 (2004).
- [12] M. Tanaka et al, IEEE Trans. Appl. Supercond. 15, p. 400 (2005).
- [13] Q. Herr et al., J. Appl. Phys. 109, p. 103903 (2011).
- [14] O. A. Mukhanov, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 760 (2011).
- [15] Y. Yamanashi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, 150 (2007).
- [16] A. Kitayama et al, Supercon. Centennial Conf. 2EA-P14, (2011).
- [17] N. Yoshikawa et al, Appl. Supercond. Conf. 2EB-05 (2010).
- [18] V. K. Semenov, G. V. Danilov, D. V. Averin, IEEE Trans. Appl. Supercond. 13, p. 938 (2003).