

超伝導デジタルエレクトロニクスの歴史的展望

早川 尚夫[†]

Superconducting Digital Electronics —Historical Overview

Hisao HAYAKAWA[†]

あらまし 超伝導デジタルエレクトロニクスの材料技術、回路技術、応用の歴史的な経過を述べるとともに、その将来を展望する。

キーワード ジョセフソン素子、デジタル応用、リフラクトリ接合、SFQ 論理

1. ま え が き

この特集号のテーマは、「この 40 年の各専門分野の変遷と将来展望について」ということで引き受けたが、筆者が研究を始めたのは 1979 年であるので今年まで続けたとしても筆者の研究期間はいささか短いことに気がついた。40 年という年月はやっぱり長いと思うが、象徴的意味と考えて引き受けることにした。

超伝導エレクトロニクスの研究はこのころ（1975 年ごろ）から活発になってきたように思う。それは IBM が始めた、ジョセフソン素子を使ってコンピュータを作ろうというプロジェクトが始まったからである [1]。日本もこのころに、研究を開始している。そのころの我が国は、IBM の動向には極めて敏感で、次世代のコンピュータの素子は半導体ではなく超伝導であるという IBM の考えは、我が国の中でも耳目を集めた。電子技術総合研究所、電電公社、富士通、日本電気、三菱電機の研究所で基礎的研究が始められた。その後、ジョセフソン素子を使ってコンピュータを作るという研究は続けられ、多くの紆余曲折はあったが、超伝導エレクトロニクスの中心的課題となった。超伝導エレクトロニクスの中で、一般にこういう分野をデジタル応用分野と呼ぶが、本論文ではこのデジタル応用分野の歴史的変遷を述べ、将来展望を試みることにする。

2. 材料技術の変革

超伝導デジタル技術は材料技術、回路技術、それ

にシステム技術を開発しなければならない、総合技術である。その中で最も基盤となる材料技術はぜひとももたなければならない。ジョセフソンコンピュータを最初に提案した IBM は、ジョセフソン・トンネル接合の材料として、Pb 合金を用いた。また、Pb 合金接合の集積技術も開発した [1]。当時トンネル接合の材料として、Pb を使うのが一般的であった。Pb は約 7K の転移温度をもち、液体ヘリウム温度で使用できる。しかし、純粋な Pb で接合を作ると、一度低温で測定することはできるが、室温に戻しもう一度測定しようとするとき接合は壊れてしまうという欠点があった。つまり低温・室温間での温度サイクルにもちこたえられないのである。この欠点を解決するために、IBM は、Pb を合金化することによって解決しようとした。Pb に In や Au を混ぜて接合を作ろうとするもので、これによって、耐温度サイクル性をもたせるものである。また、トンネル接合を作るときは、O₂ 雰囲気中で放電酸化を行う。こうすると障壁膜は In₂O₃ になる。Pb 合金の接合の特性はかなり良好で、使うには十分な特性である。

日本の各研究所は、早速この Pb 合金接合を習得しようとした。当時の IBM はなかなか秘密主義で、Pb 合金技術が分からず、技術の詳細は神秘的であったが、そのうち各研究所は作れるようになった。回路技術の研究も行われるようになった。

ところで、Pb 合金接合には致命的な欠陥があることが分かった。それは、集積回路を作ったとき、ある程度大規模になると、最初から接合が 2~3 個壊れている、または、1 回の低温・室温温度サイクルで数個

[†] 名古屋大学、名古屋市
Nagoya University, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

壊れているらしいということである。当時は皆そういうことに気がついてはいたが、あまり問題にできなかった。まだ実用化というようなことは考えられない時代であった。しかし、1000 個の接合を含む集積回路を作ったとしたら、その集積回路は決して完全動作しないということである。

Pb 合金接合は純粋の Pb 接合に比べて耐温度サイクル性などについて著しく信頼性は向上させたが、完璧ではなかったということである。やはり Pb 合金に使う Pb や In は機械的に軟らかい材料であるということである。

この問題に対して、機械的に硬い材料、Nb や NbN を用いたリフラクトリ接合を使えばよいことになる。このことは当時もよく分かっていた。しかし、IBM がジョセフソンコンピュータのプロジェクトを始めたときは良好なリフラクトリ接合がなかったのが実情であった。

リフラクトリ接合の研究は集積技術を含めて日本でいち早く始まった。最初は NbN を用いた接合であった。どうもよく考えてみると、Nb 系接合をうまく作るにはいかに Nb 表面の不活性化を図るかということにつきると思う。NbN は Nb に比べて不活性である。したがって、NbN/Oxide/NbN 接合が比較的良好な特性を示すことになる [2]。また、集積プロセス技術も、反応性エッチング技術を使って開発された。NbN/MgO/NbN も開発され、更に特性が向上した [3]。

1983 年、IBM がジョセフソンコンピュータプロジェクトを突然中止した [4]。その理由は、ジョセフソン素子が半導体素子と比べてそれほど優位性がなくなった、最も重要なメモリがうまく動かないなどであった。多くの世界の研究所では、皆 IBM に刺激されて研究を始めたので、大変困ったことになった。日本も、研究をやめるところもあったが、ちょうどそのころ、リフラクトリ接合の研究が進んでいたため、材料を Pb 合金からリフラクトリに換えて研究を進めることにした経緯がある。

このころ (1980 年代初め) になると、Nb/a-Si/Nb [5]、Nb/Al oxide/Nb [6] などの接合が開発され、その特性の良好性は感動的であった。これらは、Nb 表面に人工的に別の物質を張り不活性化にするということである。また、どのような物質でもよいわけではなく、Nb の表面との濡れ性が良いことが重要である。特に、Nb と Al の関係は絶妙で、非常に良好な特性を

もたらす。現在のデファクトスタンダードは、Nb/Al oxide/Nb 接合で、集積技術もできていて、多くの回路研究に使われている。

このように、超伝導エレクトロニクスの研究は、最初は材料研究の上でもあやふやであったものが、Nb 系の超伝導体を使うことによって、しっかりしたものになった。

3. 高温超伝導体の発見

1986 年、ある種の銅酸化物が、その臨界温度が 77 K を超える超伝導体になるという発見があった [7]。それまでの超伝導体は、Nb₃Ge の 23 K が最高であったので、液体窒素温度を超える臨界温度をもつ超伝導体の発見は多くの人の関心を引き、フィーバーとまで呼ばれた。

超伝導エレクトロニクスへの応用も関心を引き、研究が行われた。薄膜化の研究も行われた。YBa₂Cu₃O_{7-x}、Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{8+x} などの薄膜がよく作られ、良好な特性を示した。ただ、接合がうまくできなかった。特性をコントロールして作ることが難しかった。まず、材料構造が複雑で、構成物質も複雑であった。そのために、回路を作ることが難しく、その方向の研究は進まなかった。できたとしても小規模なもので、接合数にして 10 ~ 50 個程度の回路であった。

したがって、高温超伝導体が超伝導エレクトロニクスに与えた影響は、最初の思惑に比べると現在のところあまり大きなものとなっていない。高温超伝導体の応用としては、超電導量子干渉素子 (Superconducting Quantum Interference Device-SQUID) (これは接合が 2 個使われるもの) や携帯無線の基地局のフロントエンドに使われるフィルタ (接合は使われていない) などである。

4. 回路技術の進化

IBM が提案した、コンピュータ素子をトランジスタからジョセフソン素子に換えるという発想は、消費電力の小さいジョセフソン素子を高密度にパッケージングしてコンピュータの性能を向上させようとしたことである。この考えは今も正しい。どんどん微細化して集積度が向上する半導体素子はその発熱から性能は頭打ちになる。ジョセフソン素子はこの問題を根本から解決する。

初期の考えは、電流-電圧特性にヒステリシスのあ

るトンネル・ジョセフソン接合の「超伝導状態」を論理“0”に、「電圧状態」を論理“1”に対応させて論理を実行する。論理ゲートの構造は基本的に SQUID でゲートとゲートは抵抗によってつないでいる。この方式は、抵抗状態にスイッチしたとき、抵抗状態に「ラッチ」してしまうために、いったん電源を切らないと超伝導状態には戻らない。したがって、交流電源を用いなければならない。こういう論理をラッチング論理と呼ぶ。

このラッチング論理を用いて、様々な回路のデモンストレーションがなされたが [8], [9], 結局次にくる単一磁束量子 (Single Flux Quantum-SFQ) 論理に席を譲らなければならなかった。ラッチング論理の速度、消費電力はゲートとゲートをつなぐ抵抗で決められ、速度は CR 時定数、消費電力はこの抵抗で消費される電力ということになる。大雑把に計算をしてみると、速度は数 ps/ゲート、消費電力は $\sim 10 \mu\text{W}/\text{ゲート}$ ということになる。

1985 年ころになるとロシアの研究者から、SFQ 論理という新しい方式が提案された [10]。このような考えは、既にいくつか提案されていたが、体系として方式が整理されたのはこの論理方式であった。彼らは、RSFQ (Rapid Single Flux Quantum) 論理と呼んだ。

SFQ (RSFQ) 論理方式は、二つのジョセフソン接合を用いた SQUID を基本とする回路で、その中を動く磁束量子の基本単位、単一磁束量子の“ある”、“なし”をデジタルの“1”と“0”に対応させるものである。ジョセフソン接合もトンネル接合である必要はなく、ヒステリシスがない接合でよいということになる。しかし、実際は、接合の特性をそろえる必要があるので、ヒステリシスを消すためにトンネル接合を抵抗で短絡して使っている。したがって、ラッチング論理の場合のように交流電源を使う必要がなく、直流電源でよいことになる。

この論理方式は 1 個の粒子 (磁束) を回路中で動かす、いわゆる粒子性の論理であるので、ゲートとゲートを結ぶ方式はジョセフソン接合を組み合わせたジョセフソントランスミッションラインを使う必要がある。そのために回路量は多くなる。しかし、研究が進んでくると、必ずしもジョセフソントランスミッションラインを使う必要がなく、よく整合のとれた、ストリップラインでよいことが分かった。これをパッシブトランスミッションライン (PTL) と呼んでいるが、これ

によって、大幅に回路量が削減された。

もう一つ、ラッチング論理と大きく違うところがある。ラッチング論理は、ジョセフソン接合がいったんスイッチすれば、電源が切れるまで接合は電圧を出し続ける。したがって、論理方式は CMOS など半導体素子と変わらないことになる。しかし、SFQ 方式は磁束量子が接合を通過するときにパルスを出す。論理の結果を検出するにはこのパルスを検出することになる。ラッチング論理をレベル論理とするならば SFQ 論理はパルス論理ということができる。

SFQ 方式の最も大きな利点は、その消費電力にある。先ほど述べたように、SFQ 論理の場合、単一磁束が接合を通過するときだけに電圧パルスを出す。このとき、電力の消費が起こるわけで、これは非常に小さい。ラッチング論理方式の場合、 $\sim 10 \mu\text{W}$ のレベルだとすると、この千分の一ということになる。すなわちナノワット (nW) のレベルである。

このように、SFQ 方式はラッチング方式に比べて圧倒的に優れていることが分かり、その後 SFQ 方式の研究が日本とアメリカを中心として盛んになった。特に日本は、グループ同士ユニークな連携をとりながら研究を進め、大きな成果を上げた。

回路設計技術では、回路を論理機能単位ごとにセル化し、トップダウン設計が行えるようにした [11]。また、自動配置配線も行える。このようなセルライブラリをグループ間で共有化し、標準化した。また、NEC で開発されたジョセフソン臨界電流 $J_c = 2.5 \text{ kA}/\text{cm}^2$ 、最小線幅 = $1.5 \mu\text{m}$ の集積プロセスを用いて各グループが回路を作製した [12]。こうすることによって、日本は研究が大いに進み、成果が上げられた。

5. 応 用

1985 年以降、ラッチング方式に換えて、SFQ 方式が研究された。また、ジョセフソンコンピュータの開発ばかりではなく、もっと幅広い応用が模索されるようになった。しかし、半導体技術が進歩し続けている現状において、あえて超伝導技術を使うためには、超伝導技術がもっている特長を十二分に発揮できるものでなくてはならない。それは、100 GHz 以上の高スループット性を持ち、半導体デバイスに比べて 3 けたも低い電力で動作するという SFQ 論理の特長を生かすことである。

米国では、90 年代後半、SFQ 論理回路をプロセスの中心部に用いる、いわゆる「ベタフロップスコン

「ピュータ」プロジェクトがあった。これは、100 GHz のクロック周波数で動作する SFQ プロセッサを 4000 個で構成し、プロセッサの全消費電力は 250 W である。このプロジェクトそのものは、調査研究の段階で終了したが、SFQ 技術の研究は続けられた。ある程度の複雑さをもつ SFQ マイクロプロセッサの開発が行われた。Nb 接合の電流密度 5 kA/cm^2 、接合数 65,000、クロック周波数 24 GHz のマイクロプロセッサ (Flux-1) を試作したが、一部分だけが動作したという結果であった [13]。

日本では、CORE プロセッサがあった。このプロジェクトは、大学が連携して、プロセッサを作るというもので、SFQ 論理回路の基礎研究として取り上げられた。8 ビットのビットシリアルプロセッサで接合数は 5,000、接合の電流密度は 2.5 kA/cm^2 で作製された。結果は、完全に動作し、クロック周波数 15.2 GHz、消費電力は 1.6 mW であった [14]。その後、この研究は更に進められているが、この結果は SFQ 技術が、将来スーパーコンピュータに応用されるという可能性を示唆している。

さて、このようなスーパーコンピュータに応用するマイクロプロセッサの研究はまだ基礎研究の要素が強い。もう少し実用に近い SFQ の応用として、日本はハイエンドルータ用スイッチの研究を選んだ [15]。これは、近年インターネットの進化が目覚ましいが、これは光ファイバなどで送られてくるデータを行き先別に振り分ける一種のスイッチ回路である。最近の調査でも、データ量は年々指数関数的に増加し、各ノードでのルータの性能として、毎秒 20 テラビット (Tbit/s) のスループットが必要であるとされている。

SFQ 回路技術を使えば、その高スループット性のために、 32×32 のスイッチチップを 40 GHz 動作させれば、1.2 Tbit/s のスループットのスイッチを構成できる。SFQ スwitchモジュール (4×4) を開発したばかりでなく、MCM (Multi-Chip Module)、低温-室温間の信号コミュニケーション技術を開発し、これらをシステムとして 12.5 GHz の動作実験を行った [16]。このシステム実験は重要で、SFQ 回路は単独というよりは室温動作装置とのハイブリッドで動作させることが多いので、ハイブリッド動作が可能であるということを実証した。

米国では、SFQ 技術の応用として、広帯域 A-D 変換器を取り上げた。ますます高度化する通信分野において、増大する通信量、種々の通信方式、これらに

対応する移動体通信方式にソフトウェア無線方式がある。これは受信機のフロントエンドでアナログ信号をデジタル信号に変換して DSP (Digital Signal Processor) で変復調などをデジタル処理で行うもので、非常に柔軟性に優れたシステムになっている。この場合、受信機の構成とすれば、アンテナから入って来た RF 信号を、中間周波やベースバンドに変換することなく直接デジタル信号に変換できれば、更に柔軟性が増す。これは帯域 100 MHz 以上、SN 比 75 ~ 100 dB の A-D 変換器ができるかどうかにかかっている。

SFQ 回路を使えば、比較的簡単な回路構成で、数 10 GHz に及ぶオーバーサンプリング技術によって、広帯域 A-D 変換器が実現できる。米国では、Hypres 社が自らの集積プロセスを用いて A-D 変換器を開発し、既に軍関係に納入し実用している [17]。

6. む す び

超伝導デジタル・エレクトロニクスの過去を調べてきた。その結果は様々な進歩があった。しかし実用という観点に立つと、まだ多くの課題がある。とりわけ、極低温を使うということが大きな問題を提起している。極低温環境を使用するという事は、室温とそれだけ遠くなるから実装にコストが掛かる。低温を使っても、なおかつメリットが生じるような応用、または低温でしか起きない現象を用いユニークな機能をもつ応用でなければならぬ。これまで述べてきた、SFQ を用いたスーパーコンピュータ、ルータ用スイッチは、従来の半導体で作られたものに比べて省電力であるところに特徴があり、環境問題での進展があればその出番がやってくるであろう。A-D 変換器は今でも使おうと思えば使うことができるレベルにある。既に、米国では軍用として実用化されているが、更に応用分野の開拓を行わなければならない。超伝導検出器アレーなどの精密計測技術への応用はこれから考えていくべきであろう。

文 献

- [1] IBM で開発されたジョセフソンコンピュータ技術については、the IBM J. Res. and Dev., vol.24, no.2, March 1980 の特別号に載せてある。
- [2] A. Shoji, F. Shinoki, S. Kosaka, M. Aoyagi, and H. Hayakawa, "New fabrication process for Josephson tunnel junctions with (Niobium Nitride, Niobium) double-layered electrodes," Appl. Phys. Lett., vol.41, pp.1097-1099, 1982.

- [3] S. Kosaka, A. Shoji, M. Aoyagi, F. Shinoki, S. Tahara, S. Takada, and H. Hayakawa, "All refractory Josephson tunnel junctions fabricated by reactive ion etching," *IEEE Trans. Magn.*, vol.MAG-21, pp.102-105, 1985.
- [4] A.L. Robinson, "IBM drops superconducting computer project," *Science*, vol.222, pp.492-494, 1983.
- [5] H. Kroger, L.N. Smith, and D.W. Jillie, "Selective niobium anodization process for fabricating Josephson tunnel junction," *Appl. Phys. Lett.*, vol.39, pp.280-282, 1981.
- [6] M. Gurvitch, M.A. Washington, and H.A. Huggins, "High quality refractory Josephson tunnel junctions utilizing aluminum layers," *Appl. Phys. Lett.*, vol.42, pp.472-474, 1983.
- [7] J.G. Bednorz and K.A. Muller, "Possible high-Tc superconductivity in Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys.*, vol.B64, pp.189-193, 1986.
- [8] S. Kotani, A. Inoue, T. Imamura, and S. Hasuo, "A 1-GOPS 8-bit Josephson digital signal processor," *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., Tech. Dig. Papers*, pp.148-149, Feb. 1990.
- [9] H. Nakagawa, I. Kurosawa, M. Aoyagi, S. Kosaka, Y. Hamazaki, Y. Okada, and S. Takada, "A 4-bit Josephson computer ETL-JC1," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.1, pp.37-47, March 1991.
- [10] O. Mukhabov, V. Semenov, and K. Likharev, "Ultimate performance of the RSFQ logic circuits," *IEEE Trans. Magn.*, vol.MAG-23, no.2, pp.759-762, 1987.
- [11] S. Yorozu, Y. Kameda, H. Terai, A. Fujimaki, T. Yamada, and S. Tahara, "A single flux quantum standard logic cell library," *Physica C: Superconductivity and Its Application*, vol.378-381, pt. 2, pp.1471-1474, Oct. 2002.
- [12] K. Tanabe and M. Hidaka, "Recent progress in SFQ device technologies in Japan," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.17, no.2, pp.494-499, June 2007.
- [13] P. Bunyk, M. Leung, J. Spargo, and M. Dorojevets, "A FLUX-1 RSFQ micro-processor: Physical design and test results, A FLUX-1 microprocessor and beyond," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.13, pp.433-436, June 2003.
- [14] M. Tanaka, F. Matsuzaki, T. Kondo, N. Nakajima, Y. Yamanashi, A. Fujimaki, H. Hayakawa, N. Yoshikawa, H. Terai, and S. Yorozu, "Demonstration of a prototype of the microprocessor based on the single-flux-quantum logic," *Technical Digest, 2004 International Solid-State Circuit Conference (ISSCC 2004)*, San Francisco, Feb. 2004.
- [15] S. Yorozu, Y. Kameda, and S. Tahara, "A hybrid switch system architecture for large-scale digital communication network using SFQ technology," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E84-C, no.1, pp.15-19, Jan. 2001.
- [16] Y. Hashimoto, S. Yorozu, T. Miyazaki, Y. Kameda, H. Suzuki, and N. Yoshikawa, "Implementation and experimental evaluation of a cryocooled system for high-throughput SFQ digital application," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.17, no.2, pp.546-551, June 2007.
- [17] I.V. Vernik, D.E. Kirichenko, T.V. Filippov, A. Talalaevskii, A. Sahu, A. Inamdar, A.F. Kirichenko, D. Gupta, and O.A. Mukhanov, "Superconducting high-resolution low-pass analog-to-digital converters," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.17, no.2, pp.442-445, June 2007.

(平成 20 年 12 月 8 日受付, 21 年 4 月 10 日再受付)



早川 尚夫 (正員:フェロー)

昭 40 名古屋大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程了。同年 4 月工業技術院電気試験所〔現、産業技術総合研究所〕入所。昭 48 年 10 月スタンフォード大学マイクロ波研究所客員研究員, 昭 51 年 10 月電子技術総合研究所基礎部クライオエレクトロニクス研究室長。昭 61 年 4 月名古屋大学工学部教授, 平 15 年 4 月名古屋大学名誉教授。