

ジョセフソン接合をベースとした高温超電導デバイス技術は、現行の半導体技術が21世紀には直面すると言われる配線による動作速度の制限や、発熱の問題を本質的に解決できる可能性を秘めている。ジョセフソン接合を用いた論理回路は、超電導ループ内の磁束量子の有無でビットを表現し、論理ゲート間の情報伝達はpS(ピコ秒)オーダの幅をもつ電圧パルスで行われる。当社は、このような、半導体技術とはまったく異なる論理回路の実現に向けて高温超電導体を用いたジョセフソン接合を開発し、基本的な論理回路の動作に成功した。計測、通信、コンピュータなど、超高速動作が要求される分野への応用が期待される。

High-temperature superconductive device technology based on Josephson junctions is expected to overcome the fundamental problems in conventional semiconductor technology including the signal delay in wires and the huge power dissipation in a chip. In superconductive logic circuits, digital bits are stored in the form of single flux quanta, and the information is transferred by an extremely short voltage pulse.

We have succeeded in fabricating Josephson junctions using high-temperature superconductors, and have confirmed the correct operation of primitive logic circuits.

1 まえがき

過去30年間にわたる半導体技術の急激な進歩は、社会生活に大きな変革をもたらし、高度な情報化社会の構築に向けた流れはますます加速している。

半導体技術の進歩は、CMOS(相補型金属酸化膜半導体)素子を中心として、微細化によって達成されてきた。しかし、今後、10ないし15年で、深刻な技術的隘(あい)路に直面することが懸念されている。

図1は、米国半導体工業会の予測した高性能マイクロプロセッサのクロック周波数と消費電力の年次推移である。素子の微細化を極限まで進めていっても、クロック周波数は1GHz程度で飽和し、一方、消費電力は100Wを超えてひたすら増加し続ける。この発熱に耐えて、回路を正常に動作させるのはきわめて難しい。

半導体技術が直面するこれらの問題を解決するには、①回路としての動作速度を規定している配線での信号遅延をなくすこと、②回路を構成している素子の消費電力を大幅に削減することが必要である。

高温超電導デバイスとそれを用いた集積回路は、これら二つの要求を同時に満たす可能性を秘めている。

2 超電導論理回路の構成と動作原理

超電導体を使って論理回路を構成するためには、半導体技術におけるトランジスタに対応する素子が必要である。

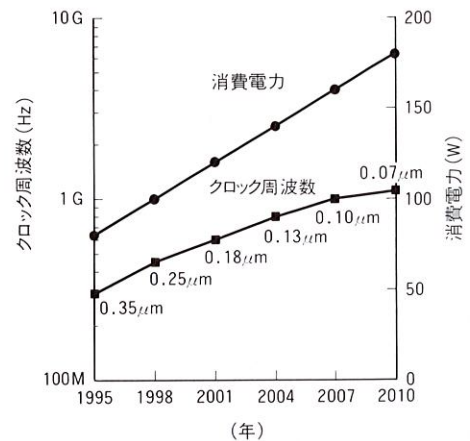


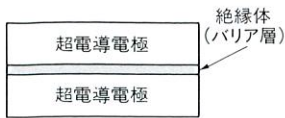
図1. マイクロプロセッサの性能予測 21世紀にはクロック周波数は飽和し、消費電力は増加を続ける。図中の数字はCMOS素子のゲート長を示す。

Performance forecast for microprocessors

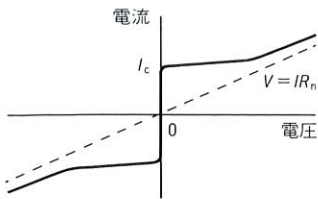
このような素子として、ジョセフソン接合が知られている。

ジョセフソン接合とは、二つの超電導体の間に薄い絶縁体を挿入し、量子力学的なトンネル効果で、お互いの間の超電導電子(クーパー対)がわずかに行き来できるようにしたものである。

ジョセフソン接合に外部から電流を流し込むと、図2に示すように一定の電流値 I_c までは電圧は発生しない。一方、電流値が I_c を超えると、電流-電圧特性は、大きさ R_n の抵抗の特性に漸近する。すなわち、ジョセフソン接合は I_c を境



(a) ジョセフソン接合の構造



(b) 電流-電圧特性

図2. ジョセフソン接合の構造と電流-電圧特性
電流値が I_c 以下では接合は超電導状態, I_c 以上では常伝導状態となる。
Structure and current-voltage characteristic of Josephson junction

として超電導と常伝導の二つの状態をとる。

ジョセフソン接合を使って論理回路を構成する方法は、半導体技術と二つの点で大きく異なる。第一の相違点は、“1”、“0”情報の表しかたにある。半導体回路では、ビット情報を電圧の高、低に対応させる。これに対し、超電導回路ではビット情報を磁束の有無に対応させる。

図3は、超電導体で作ったループの中にジョセフソン接合を一つだけ含ませた、もっとも簡単な回路を示したものである。ループ内のジョセフソン接合の両端に電流 I を加えていくと、 I が I_c を超えた段階で、接合は常伝導状態にスイッチする。この瞬間、接合に加えられていた電流は超電導ループに流れ込み、接合を流れる電流は減少する。すると、接合は再び超電導状態に復帰し、このときループ側に流れ込んでいた電流は、接合を含む閉ループを周回する永久電流として取り残される。この状態になると、接合では外から加えられている電流と周回電流が打ち消し合い、再び常伝導状態にスイッチすることはない。

この永久電流は、接合が常伝導状態にある間に、ループ側を流れた電流によってループ内に作られた磁束が、接合が超電導状態に復帰すると同時に磁束の最小単位(磁束量子) Φ_0 ($=2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$) に量子化されて保存された結果とし

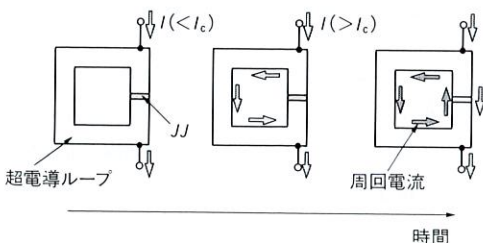


図3. ジョセフソン接合を一つ含む超電導ループの動作
接合の両端に電流 I を加えていくと、 I が I_c を超えたところで接合に電圧が発生し、電流はループに流れ込む。この瞬間に接合は超電導状態に復帰し、ループには周回電流が発生する。

Operation of superconducting loop containing one Josephson junction

て生ずる。超電導閉ループ内に、磁束量子があるか、ないかが“1”、“0”に対応する。

図3の例は、超電導ループに“1”を書き込む、あるいは電流値の形で外から与えられた信号を、磁束の形のビット情報に変換する動作に対応する。この動作は、ジョセフソン接合がいったん常伝導状態にスイッチし、再び超電導状態に復帰するのに要する時間内に完了する。この時間 τ は、接合の I_c と R_n の積 ($I_c R_n$ 積)、および磁束量子 Φ_0 の値で決まり、次の式で与えられる。

$$\tau = \Phi_0 / I_c R_n \quad (1)$$

$I_c R_n$ 積を 1 mV とすると、 τ は 2 ps である。

ループの中に複数のジョセフソン接合を含ませたり、複数のループを結合したりすることで、論理回路に必要な基本的なゲートをすべて作ることができる⁽¹⁾。

超電導論理回路では、ループ間のビット情報の伝達は、ジョセフソン接合がスイッチする際に発生する電圧パルスによって行われる。このパルスの高さは、 $I_c R_n$ 積程度、幅は τ に相当する。このようなパルスの伝達には、超電導体で作った伝送線路配線を用いる。ジョセフソン接合の出力インピーダンスは半導体デバイスに比べるときわめて小さく、伝送線路と容易に整合させることができる。これが、半導体回路と大きく異なる第二の点である。

インピーダンス整合がとれた超電導伝送線路では、パルス信号を無損失、低分散で光速に近い速さで伝達でき、配線による信号遅延を最小化できる。

論理回路の消費電力は、大きく見積もっても、接合の I_c と常伝導状態での発生電圧 $I_c R_n$ の積程度である。一例として、 $I_c = 100 \mu\text{A}$ 、 $I_c R_n = 1 \text{ mV}$ を想定すると、1 論理ゲート当たりの消費電力は $0.1 \mu\text{W}$ のオーダーとなる。この値は、半導体の中でもっとも消費電力の小さい CMOS と比較して、約 2 けた小さい。

3 高温超電導ジョセフソン接合

超電導論理回路の開発は、高温超電導体の発見以前に、鉛やニオブなどの金属超電導体を用いて行われてきた。これらの場合、システム全体を液体ヘリウム温度まで冷却することが必要である。液体ヘリウムの扱いは簡便とは言えず、この点が従来の超電導デバイスの欠点であった。

高温超電導体では、この冷却の問題を大幅に軽減できる。また、接合の $I_c R_n$ 積の上限は超電導体のギャップエネルギーと相関しているため、スイッチング速度の飛躍的な向上も期待できる。

図4に、今回開発した高温超電導ジョセフソン接合の構造を示す⁽²⁾。電極には液体窒素温度以上でも超電導となる $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) を用い、バリアには YBCO と同じ結晶

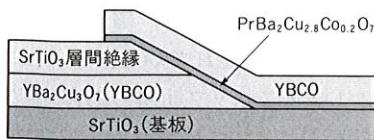


図4. 高温超電導ジョセフソン接合の構造 接合は、斜めにエッチングされたYBCO層の端面上に作製される。

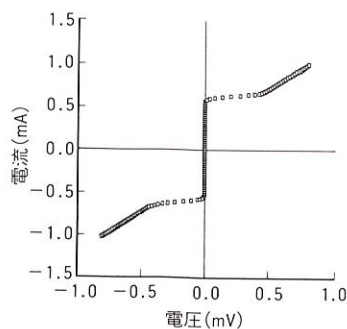
Structure of Josephson junction

構造をもつ絶縁体、 $\text{PrBa}_2\text{Cu}_{2.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_7$ (Co ドープ PBCO) を初めて採用した。

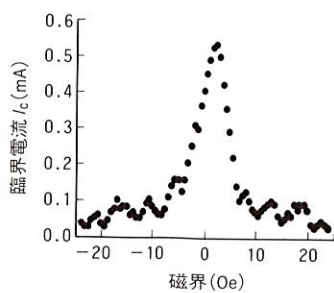
ジョセフソン接合の作製プロセスは次のとおりである。まず、YBCO と絶縁分離のための SrTiO_3 (チタン酸ストロンチウム) の積層膜を、反応性スパッタ法でエピタキシャル成長させる。次に、フォトレジストをマスクとして、アルゴンイオンによるエッチングを行い、所定の傾斜角をもったエッジを形成する。この後、再びスパッタ装置に戻し、バリア層と上部の超電導電極を成長させ、これらの層を所定のパターンにエッチングして、接合構造を完成させる。

この一連の工程によって、最初のエッチングで形成されたエッジ部の上に、ジョセフソン接合が作り込まれる。一見、奇妙な傾斜構造を採用したのは、①接合部の一辺の長さがYBCOの膜厚で決定できるために、微小面積化が可能、②上部のYBCO層が連続的に基板面まで延長でき、接合間の超電導配線の作製が容易、などの理由による。

図4の接合を作製するうえで重要なポイントは、エッチング加工したYBCOエッジと、その上に成長させたバリア層間の界面をいかに良好な状態に保つか、という点にある。



(a) 電流-電圧特性



(b) 臨界電流の磁界による変化

図5. バリア層厚を10nmとした接合の電流-電圧特性と臨界電流の磁界による変化

臨界電流が磁界に対して周期的に振動しながら減衰しており、均一性の高いジョセフソン接合が得られているのがわかる。

(a) Current-voltage characteristic and (b) magnetic field dependence of critical current of Josephson junction

われわれは、バリア層堆(たい)積直前のエッジ表面をマイクロ波で励起した活性酸素原子を照射しながらアニールするという工程を開発し、良好な界面を実現した⁽³⁾。

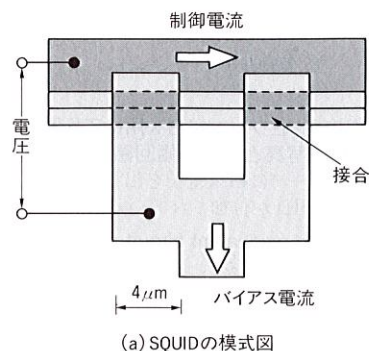
図5は、バリア層を10nmの厚さとした接合の、電流-電圧特性と接合に弱い磁界を印加したときの I_c の変化を示したものである。 I_c は磁界に対して周期的に振動しながら減少している。これは、ジョセフソン接合に固有の現象であり、明確な振動の周期が観測されたことは、面内での均一性の高い接合が実現されていることを示している。

電流-電圧特性から求められる $I_c R_n$ 積は、4.2Kの温度では1.3mVに達した。これは、従来のニオブを用いた同様なジョセフソン接合に比較して5倍程度大きく、 τ を求める式にあてはめれば1.6ps程度のスイッチング時間をもつ素子が得られたこととなる。

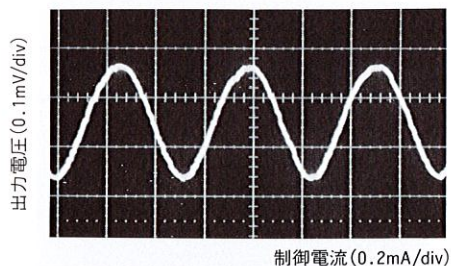
4 回路化技術の開発

複数のジョセフソン接合を超電導配線で接続したときに、正常な動作が得られるかどうかを確認するために、いくつかの簡単な回路を作製した⁽⁴⁾。

図6は、二つの接合を超電導ループで連結したSQUID (超電導量子干渉素子) と呼ばれる回路の模式図と応答特性を示したものである。この回路は、超電導論理回路の構成要素の一つであると同時に、磁界に敏感に応答するため、高感度の磁気センサとしても利用できる。



(a) SQUIDの模式図



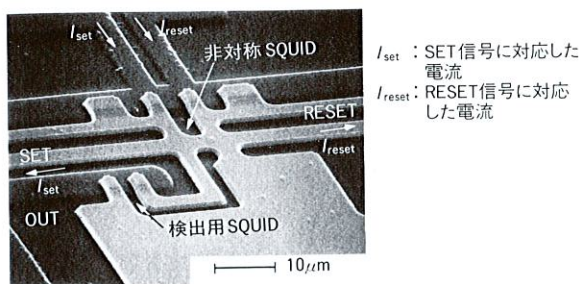
(b) 出力電圧-制御電流特性

図6. 二つのジョセフソン接合をループ状に連結したSQUIDの模式図と出力電圧-制御電流特性 制御電流によってループ部に磁界が印加され、SQUIDの出力電圧が周期的に変化する。

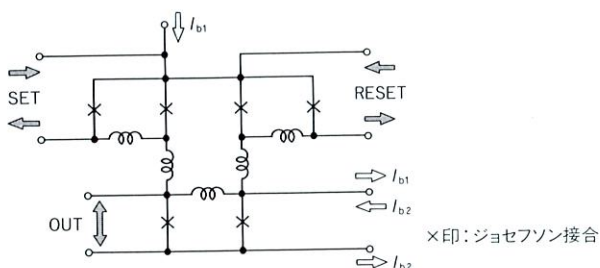
Schematic structure and operation of SQUID

I_c よりやや大きい電流をバイアスとして与え、二つのジョセフソン接合の電極をつなぐ超電導配線に制御電流を流すと、接合部に発生する電圧が周期的に変化することが確認できた。電圧の変化量は0.2 mV以上あり、二つの接合の特性がそろっていることを示している。

図7は、6個のジョセフソン接合を集積したフリップフロップ回路の電子顕微鏡写真とその等価回路である。この回路は、二つのジョセフソン接合に“SET”、“RESET”と呼ばれる信号を加えることで、超電導ループに磁束量子を出



(a)フリップフロップ回路の電子顕微鏡写真



(b)等価回路

図7. 高温超電導ジョセフソン接合を用いて作製したフリップフロップ回路の電子顕微鏡写真とその等価回路 “SET”、“RESET”信号によって超電導ループに磁束量子を出し入れする。この磁束量子を検出するためのSQUIDが付加されている。

SEM photograph and equivalent circuit of superconductive flip-flop circuit

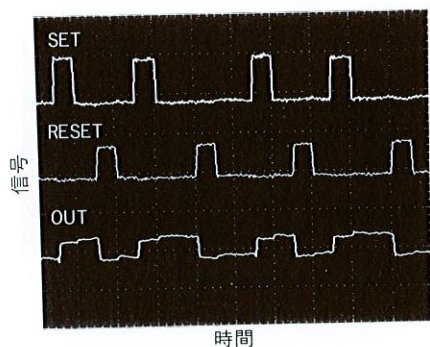


図8. フリップフロップ回路の応答特性 “SET”信号で出力“OUT”が立ち上がり、“RESET”信号で0に復帰する。

Operation of flip-flop circuit

し入れする一種のメモリであり、磁束量子の有無を検出するためのSQUIDが付加されている。

図8に、フリップフロップ回路の応答を測定した結果を示す。“SET”信号によって超電導ループに磁束量子が入り、これが作る磁界を検知してSQUIDの出力電圧“OUT”が立ち上がる。この状態で“RESET”信号を入れると、ループ内の磁束が排出されるために、“OUT”信号が0レベルに復帰している。磁束検出用のSQUIDの出力電圧がmV以下であるために、psオーダのスイッチング現象を直接測定することはできないが、正しい論理動作が行われていることが確認できた。

5 あとがき

高温超電導デバイスは、半導体技術が遭遇しつつある動作速度と消費電力の問題を根本的に解決する可能性をもつ。しかし、その開発は緒についたばかりであり、製造技術および回路設計技術の両面で解決すべき課題も多い。

これらの課題を解決し、実用的な集積規模を実現できれば、サンプリング回路やA/Dコンバータなどの計測応用、光通信用フロントエンドICや交換機などの通信応用をはじめ、究極的には超高速スーパーコンピュータのような大規模システムへの適用も期待できる。21世紀には超電導技術が大きく花開くことを夢見て、開発を加速していく。

謝辞

この研究は、通商産業省 産業科学技術研究開発制度の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から新機能素子研究開発協会(FED)を通じて委託された“高温超電導素子の研究開発”の成果である。

文献

- (1) K. K. Likharev and V. K. Semenov: RSFQ Logic/Memory Family: A New Josephson-Junction Technology for Sub-Terahertz-Clock-Frequency Digital Systems, IEEE Trans. Appl. Supercond., 1, 1, pp.3-28 (1991)
- (2) S. Inoue, et al: Fabrication and Characterization of YBaCuO/Co-doped PrBaCuO/YBaCuO Ramp-Edge Junctions, Extended Abstract of ISEC'97, 2, pp.85-87 (June, 1997)
- (3) T. Nagano, et al: Thin film growth for fabrication of YBa₂Cu₃O_y/PrBa₂(Cu_{1-x}Co_x)O_y/YBa₂Cu₃O_y ramp-edge junctions, Extended Abstract of HTSED'97, pp.233-234 (May, 1997)
- (4) T. Hashimoto, et al: DC SQUIDS Utilizing YBaCuO/Co-Doped PrBaCuO/YBaCuO Ramp-Edge Junctions, Extended Abstract of ISEC'97, 2, pp.94-96 (June, 1997)



吉田 二郎 Jiro Yoshida, D. Sc.

研究開発センター 基礎研究所研究主幹、理博。高温超電導体を用いたデバイス・回路の研究開発に従事。日本物理学会、応用物理学会、電子情報通信学会、IEEE、MRS 会員。

Advanced Research Lab.