

磁束量子素子を用いた超高速デジタル回路

Ultrafast Digital Circuit Utilizing Flux Quantum as Information Carrier

勝野 弘 長野 利彦 吉田 二郎

KATSUNO Hiroshi

NAGANO Toshihiko

YOSHIDA Jiro

超電導体が示すユニークな特性を利用すると、物理量の最小単位の一つである単一磁束量子を情報担体としたまったく新しいデジタル回路が実現できる。ジョセフソン接合と超電導配線で構成されるこのデジタル回路では、サブテラ Hz ($10^{10} \sim 10^{11}$ Hz) に達する超高速の論理動作が極めて少ない消費電力で実行できると期待されている。

東芝は、高温超電導体を用いた新しいデジタル回路の実現を目指して、新規な素子構造と集積化技術の開発を進め、リングオシレータ回路において 1.8 ピコ秒 (ps) のゲート遅延を達成した。

The unique properties of superconductors enable novel digital circuits to be created utilizing flux quantum as the information carrier. Such a circuit is composed of Josephson junctions and superconducting wiring, and is expected to work in the sub-THz range with extremely low power consumption.

We have developed a novel junction structure and its integration technology based on high-temperature superconductors and confirmed the correct operation of a ring oscillator. The signal delay per gate was as low as 1.8 ps, indicating the ultrafast performance of this new digital circuit technology.

1 まえがき

二つの超電導体の間に、電子がトンネル効果によって通過できる程度の絶縁体(トンネルバリア)を挟んだ構造はジョセフソン接合と呼ばれ、超電導電流を高速でスイッチングする機能を持つ。このような高速のスイッチを、電気抵抗を持たない超電導配線で接続すれば、スイッチング時間と消費電力が共に本質的に小さい、ユニークなデジタル回路が実現できるはずである。高温超電導体の発見は、このような新しいデジタル回路への期待を大きく膨らませた。

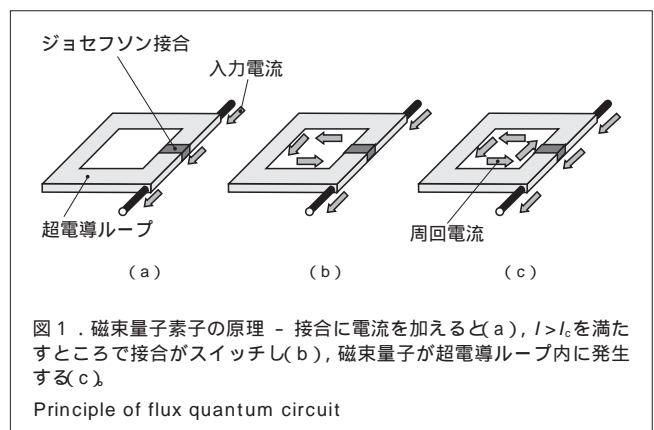
しかし、実際に Y 系などの高温超電導体(代表的な物質は $YBa_2Cu_3O_x$ (注1)(通称 YBCO))を用いてデジタル回路を作製するには、二つの大きな課題を解決する必要があった。一つ目は、回路の歩留まりを確保するため、素子特性のばらつきが小さいジョセフソン接合を作製する技術の開発。二つ目は、エピタキシャル成長をさせた酸化物を多層構造にするための成膜技術の開発である。

東芝は、トンネルバリアの均一性に優れたジョセフソン接合を採用し、この素子を集積化する際の材料構成を最適化することで、デジタル回路に適した素子構造を実現した。また、その素子構造を用いてリングオシレータ回路を試作し、その高速動作を実証した。ここでは、それらについて述べる。

2 磁束量子を利用した論理回路

超電導体は、通常の金属とは異なるいくつかのユニークな性質を持っている。“磁束の量子化”もその一つである。超電導体で作ったループの中では、磁束は $\phi_0 = h/2e = 2 \times 10^{-15}$ Wb、ここで、 h はプランク定数、 e は電子の電荷)を単位とした、とびとびの値しか取ることができない。この磁束の最小単位を磁束量子と呼ぶ。もし、磁束量子を最大でも 1 個しか保持できない超電導ループと、その磁束量子を出し入れするための手段とを作ることができれば、ループ内に磁束量子があるかないかで“1”、“0”のビット情報を表す、まったく新しいデジタルシステムのイメージができて上がる。

このことを図1を用いて、もう少し詳しく説明する。図1は、



(注1) Y : イットリウム, Ba : バリウム, Cu : 銅, O : 酸素

超電導体で作ったループ状の配線にジョセフソン接合を一つだけ組み込んだ、もっとも簡単な回路要素を示したものである。ジョセフソン接合は、そこに流すことができる超電導電流の最大値(I_c)以上の信号を加えると、常伝導状態にスイッチして抵抗が発生する。ループ内にある接合に対して電流 I を加えていくと(図1(a)), $I > I_c$ を満たすところで接合がスイッチし、抵抗が発生する。その瞬間、入力電流は超電導ループに周りこみ(図1(b)), 接合を流れる電流は減少して $I < I_c$ の状態になるため、接合は超電導状態に復帰する(図1(c))。このとき、ループ側に流れ込んでいた電流の一部は、超電導ループ内を周回する永久電流として取り残され、超電導ループに量子化された磁束を作る。この周回電流は、接合へ加えられる入力電流を打ち消す方向に働くため、接合が再度常伝導状態にスイッチすることはない。ループに入る磁束量子の数は、ループのインダクタンス L と、ジョセフソン接合の I_c の大きさで決まり、 L と I_c の積が Φ_0 の2倍より小さければ、最大でも1個に限られる。

図1に示した一連の動作は、超電導ループに“1”を書き込む、あるいは連続的な電流として外部から与えられた入力を磁束量子としてビット情報に変換することに相当する。図1に示した書き込み動作時に、ジョセフソン接合には一瞬だけ電圧が発生することに注目されたい。電圧が発生している時間は常伝導状態にあるジョセフソン接合の抵抗(R_n)を使って、 $(ps) = 2.07 / I_c R_n$ (mV) と表すことができ、 I_c と R_n の積が1 mV であれば2 ps 程度となる。

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は、超電導配線を使って伝送することができる。これにより、ビット情報の伝達が行われる。また、図1に示したような単純な形態ではなく、複数のジョセフソン接合やループを組み合わせることで、磁束量子の生成・保持・伝播(でんぱ)・分岐・合流・消滅などの動作を行うことができる。これによって、論理演算に必要な機能がすべて得られることがわかっている。

3 磁束量子素子の開発

上述したとおり、磁束量子を利用したデジタル回路はジョセフソン接合とループ状の超電導配線で構成される。この基本構造を磁束量子素子と呼ぶ。図2は、当社が開発した磁束量子素子の断面構造を示したものである。3層の超電導層(グランドプレーン、下部電極層、上部電極層)が、2層の層間絶縁層で仕切られている構造をしている。超電導グランドプレーンには、その上にある超電導層周辺における磁界の集中を緩和させ、その結果として下部電極層と上部電極層のインダクタンスを低減させる効果を持っている。

グランドプレーン上には、絶縁層を挟んでジョセフソン接

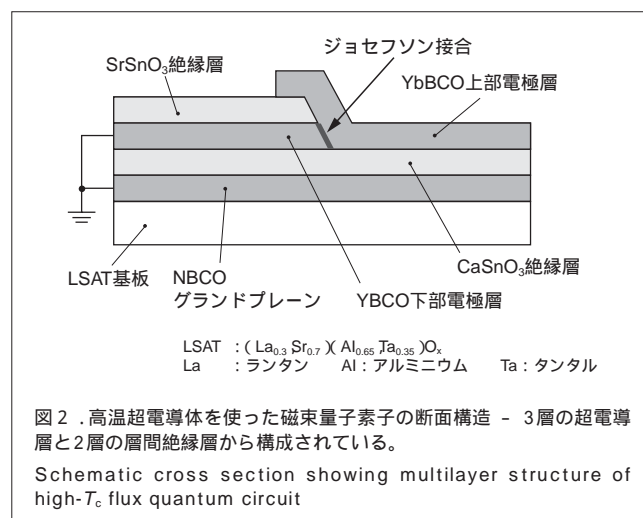


図2. 高温超電導体を使った磁束量子素子の断面構造 - 3層の超電導層と2層の層間絶縁層から構成されている。

Schematic cross section showing multilayer structure of high- T_c flux quantum circuit

合が作製されている。ジョセフソン接合⁽¹⁾は、下部電極層の一部を所定の角度で斜めにエッチングした端部に形成される。その工程は、次のとおりである。① イオンビームエッチングにより下部電極層を所定の形状に加工すると同時に、端部表面に数 nm の厚さのアモルファス層を形成する。② 酸素雰囲気中で700 程度のアニールをすることによって、アモルファス層をトンネルバリアとして再結晶化させる。③ 上部電極層を積層し、接合構造を完成させる。この方法は、下部電極層と上部電極層の間に、別途バリア層を積層する必要がなく、下部電極層を加工するときのエッチング条件や上部電極層を積層する際の成膜温度などによって、素子特性を制御することができる。

当社は、高温超電導薄膜の成膜方法として一般的に使われているパルスレーザー蒸着法ではなく、将来予測される大面積化が容易なスパッタ法を採用した。また、前記②のアニールを電子サイクロトロン共鳴(ECR)で励起された活性酸素中で行うことによって、成膜温度の揺らぎによる素子特性のばらつきを抑制することに成功した⁽²⁾。

高温超電導体は複雑な結晶構造を持つ酸化物であり、その特性は結晶構造のわずかな乱れにも敏感である。このため、図2のような複雑な多層構造を作るには、結晶構造の乱れを最小限にいとめる工夫が必要となる。当社は積層材料の選定に関して、以下に示すような独自の工夫を施した。

まず、最下層に位置するグランドプレーンには、YBCOと比較して格段に平坦な表面が得られる $NdBa_2Cu_3O_x$ ^(注2)(通称NBCO)を採用した。YBCOとNBCOを比較した模式図と原子間力顕微鏡写真を図3に示す。従来使われていたYBCOは、図3に示したように組成ずれから生じた析出物によって表面が荒れていた(表面粗さ $R_a=5\text{ nm}$)。しかし、固溶系物質であるNBCOはNdサイトとBaサイトが置換されるため、図3に示したように多少組成がずれてもきれいな表面を(注2) Nd:ネオジム

4 リングオシレータ回路の動作実証

高温超電導体を用いた磁束量子回路の超高速性を実証するため、リングオシレータ回路を試作した。図4は、今回試作した回路の電子顕微鏡写真とその等価回路を示している。この回路は、大きく“磁束量子発生部”と“磁束量子発振部”の二つに分けることができる。発生部は、入力信号を磁束量子信号へ変換する変換器、磁束量子を伝達させるための伝送ゲート、磁束量子を発振部に注入するための合流器から成る。発振部は、注入された磁束量子を周回させるためにリング状に配置された10段の伝送ゲートと、周回を停止するためのリセット回路から構成されている。

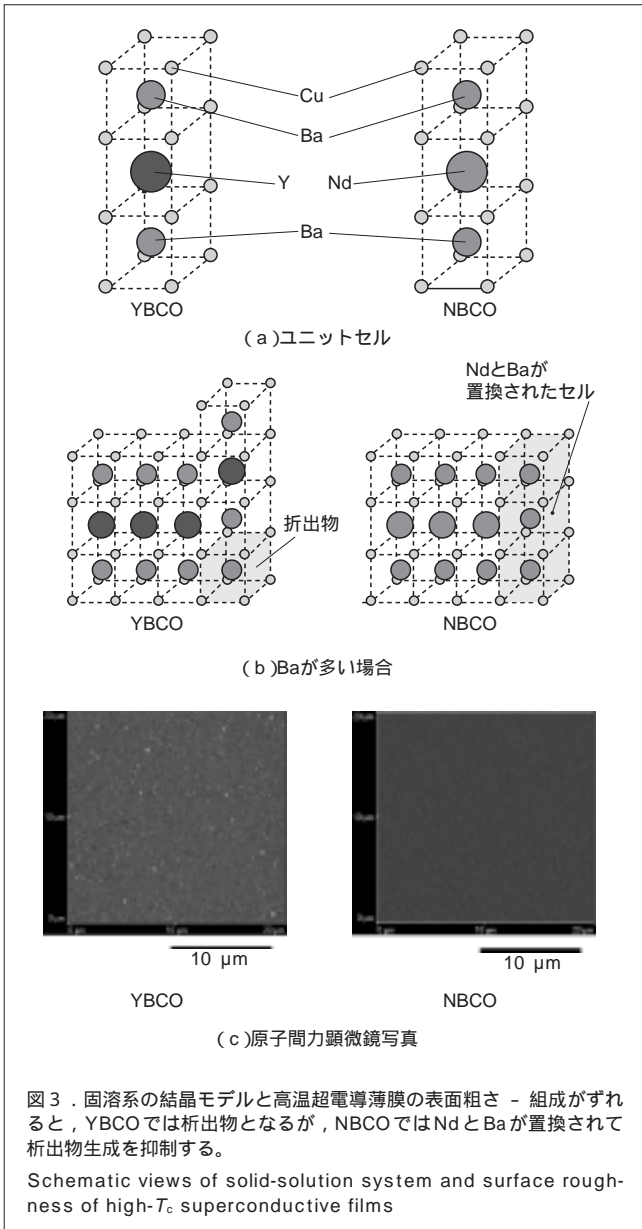


図3．固溶系の結晶モデルと高温超電導薄膜の表面粗さ - 組成がずれると、YBCOでは析出物となるが、NBCOではNdとBaが置換されて析出物生成を抑制する。

Schematic views of solid-solution system and surface roughness of high- T_c superconductive films

保つことができる ($R_a=0.5$ nm 以下)。

上部電極層は、インダクタンスを小さくするためにc軸配向させる必要がある。しかし、回路動作に適した素子特性を得るためには、これを700 程度の比較的低い成膜温度で達成しなくてはならない。このため、Y系高温超電導体としてはもっとも融点の低い材料である $YbBa_2Cu_3O_x$ (通称YbBCO)^(注3)を採用した⁽²⁾。更に、層間絶縁層には、高温超電導体と格子整合する絶縁性酸化物の中から、高速の回路動作のために要求される低い誘電率を持つ材料を探索し、最終的にSn系酸化物($SrSnO_3$, $CaSnO_3$)^(注4)を採用した。このような材料構成の最適化により、複雑な構造を持つ磁束量子回路を作製することが可能になった。

(注3) Yb : イッテルビウム

(注4) Sn : スズ, Sr : ストロンチウム, Ca : カルシウム

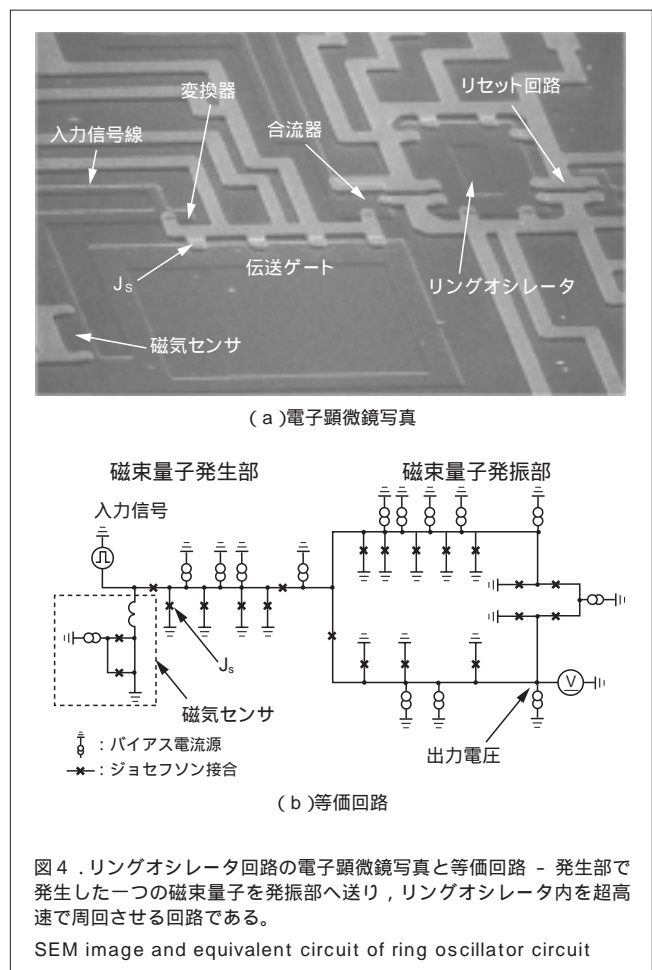


図4．リングオシレータ回路の電子顕微鏡写真と等価回路 - 発生部で発生した一つの磁束量子を発振部へ送り、リングオシレータ内を超高速で周回させる回路である。

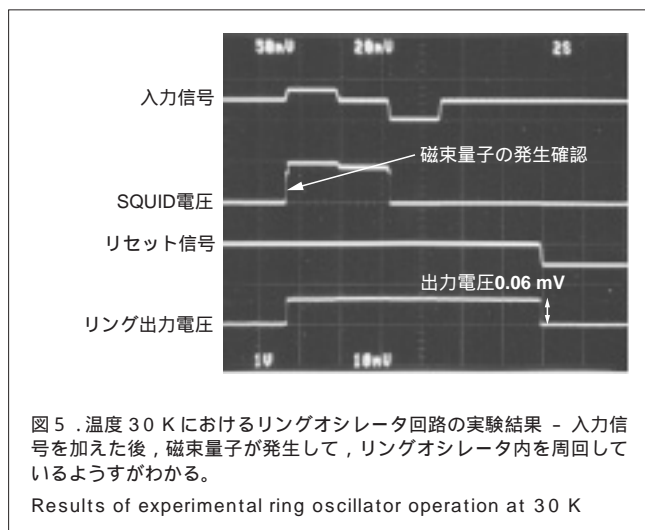
SEM image and equivalent circuit of ring oscillator circuit

入力信号を与えると J_s で示した接合がスイッチし、 J_s の右側に発生した一本の磁束量子は伝送ゲートと合流器を通過して発振部に伝わる。 J_s がスイッチする際、その左側にある超電導ループ内にも極性が逆転した磁束量子が一つ発生するが、これはループ内に捕捉(ほそく)される。この捕捉された磁束量子は、その超電導ループに組み込まれている磁気センサ(SQUID : Superconductive QUantum Interference

Device)で検出することができるため、SQUIDの電圧変化を観測することによって、変換器が正常に動作しているかどうかを知ることができる。

発振部に伝わった磁束量子は、リング状の伝送ゲートを時計回りに周回する。この時、発振部にあるジョセフソン接合には、磁束量子が通過するたびに電圧パルスが発生する。個々のパルスはpsオーダーであるため、これを直接検出することはできない。一方、電磁誘導の法則から、一つの電圧パルスの時間積分は磁束量子の大きさに厳密に一致することが証明できる。このことを利用すれば、単位時間当たり接合を通過する磁束量子の数は、接合で観測される平均電圧を $2.07 \text{ mV} \cdot \text{ps}$ で割ることで容易に計算できる。すなわち、磁束量子の周回による発振周波数 f は、発生した電圧 V を使って、 $f(\text{テラ(T)Hz}) = V(\text{mV})/2.07$ と表され、1伝送ゲート当りのスイッチング時間は、 $(\text{ps}) = 1/(f(\text{THz}) \times 10)$ となる。

図5は、試作したリングオシレータ回路を温度30Kで測定した結果である。入力信号を入れると、検出用SQUIDに電圧が生じていることから、変換器から磁束量子が発生したことがわかる。また、同時にリングオシレータに出力電圧が生じていることから、磁束量子がリングオシレータ内を超高速で回転していることもわかる。リセット回路に信号を入れると、磁束量子がリングオシレータ内から消滅して、出力電圧が0に戻っている。これらの結果から、試作したリングオシレータ回路が正常動作していることが確認された。



リングオシレータの最大出力電圧は、30 Kでは0.06 mV、20 Kでは0.117 mVであった。これらの値から、30 Kでは29 GHz、20 Kでは57 GHzの周波数で磁束量子が周回して

いることがわかる。また、1伝送ゲート当たりのスイッチング時間は、30 Kでは3.4 ps、20 Kでは1.8 psであった。これは、リングオシレータを構成する接合の20 Kにおける $I_c R_n$ 積の中央値(1.2 mV)から見積もった値とほぼ同じであることから、設計値どおりの性能を示していることがわかる。

今後、加算器など、より複雑な処理を行う100接合規模の回路動作を実証し、最終的には高精度アナログデジタル変換器などへの適用を進めていく予定である。

5 あとがき

高温超電導体を用いたデジタル回路実現に向け、新規な磁束量子素子を開発し、リングオシレータ回路において超高速なスイッチング特性を確認した。今回開発した技術は、半導体デバイスが遭遇しつつある動作速度と消費電力の限界を根本的に解決する可能性を秘めている。実用的な回路の実現に向けては、製造技術と回路設計技術の両面で今後解決していかななくてはならない課題も多いが、ハイエンドの通信応用などを目指し開発を加速していく。

この研究は、(財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)を通じて、(財)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託された。

文献

- (1) Moeckly, B. H., et al. Properties of interface-engineered high Tc Josephson junctions. Appl. Phys. Lett. 71. 1997, p. 2526-2528.
- (2) Katsuno, H., et al. Characteristics of interface-engineered Josephson junctions using a YbBa₂Cu₃O_y counterelectrode layer. Appl. Phys. Lett. 79. 2001, p. 4189-4191.



勝野 弘 KATSUNO Hiroshi

研究開発センター 新機能材料・デバイスラボラトリー。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、応用物理学会会員。Advanced Materials and Devices Lab.



長野 利彦 NAGANO Toshihiko

研究開発センター 新機能材料・デバイスラボラトリー主務。高温超電導体を用いたデバイス・回路の研究開発に従事。応用物理学会会員。Advanced Materials and Devices Lab.



吉田 二郎 YOSHIDA Jiro, D.Sc.

研究開発センター 新機能材料・デバイスラボラトリー技監、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、電子情報通信学会会員。Advanced Materials and Devices Lab.