

論文の内容の要旨

論文題目 **High- T_c Superconductive Switching Devices**
高温超伝導スイッチングデバイス

氏名 滋 賀 秀 裕

半導体の次世代を担う超高速・超低消費電力デバイスの候補のひとつとして、超伝導体デバイスが挙げられる。超伝導コンピュータは従来の半導体コンピュータと比較して処理能力で 2 桁、低消費電力性で 5 桁優れているとも言われており、早期実現が望まれている。現段階において、超伝導体のエレクトロニクス応用方面では特性の安定したジョセフソン素子の作製技術の確立および論理回路合成理論の構築が急速に進んでいる。特に金属系の低温超伝導体分野においてはかなり大規模な集積回路の試作結果が頻繁に報告されるまでになっており、超伝導体コンピュータの実現はそう遠くないものと思われる。

しかし、ここで問題となるのが既存のコンピュータとの整合性である。半導体回路では、1 と 0 の信号を電圧の違いによって表現しており、その差は 1V 以上を必要とする。一方、超伝導体回路では 1 と 0 の信号を磁束量子の有無によって表現する回路手法が現在の主流となっている。よって、超伝導体回路から半導体回路に信号を伝達するためには、何らかのインターフェイスデバイスを用いて磁束の有無を電位差に変換する必要がある。ジョセフソン素子を 2 つリング状につないでループにした **direct coupling superconducting quantum interference device (dc-SQUID)** というデバイスを用いれば磁束を電圧に変換することは可能であるが、そこで生じる電位差はたかだか 1mV である。これを数 10 段直列に接続して 10mV 以上の電圧を得、次段に CMOS アンプを接続して所望の電圧まで引き上げることでインターフェイスを構成するという研究も行われているが、かなり大規模な

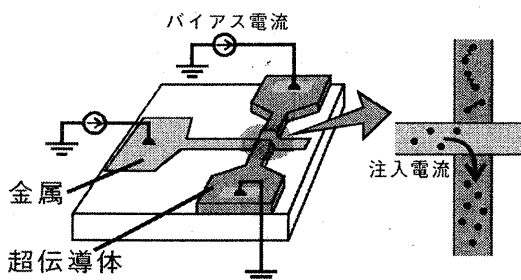


図1 デバイスの模式図

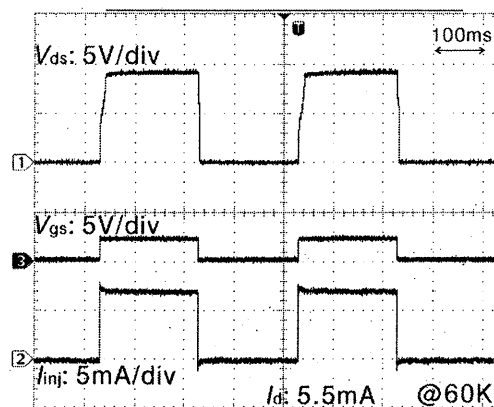


図2 デバイス動作

回路になってしまう。超伝導体コンピュータから半導体コンピュータへ向かう信号線の数だけこの回路が必要であることを考えると、インターフェイスが全体に占める割合はかなり大きくなってしまい、あまり現実的な解とは思えない。

上記の事実を踏まえ、本研究においてはシンプルかつ小型のインターフェイスデバイスを提案する。超伝導体は超伝導状態においては抵抗が0に保たれるが、臨界点以上に温度を上げたり電流を流したりすることにより超伝導状態が破壊され、抵抗を有する常伝導状態に遷移する。この2つの状態間で電気的な特性が大きく異なることを利用し、インターフェイスとしてのスイッチングを行うデバイスの作製を試みた。

作製したデバイスの模式図を図1に示す。構造としては準粒子注入デバイスと呼ばれるものと同様で、超伝導ブリッジの上に電流注入電極を設けた形をとっている。ブリッジの材料には代表的な高温超伝導体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) を用いた。理由としては、より常温に近い温度で使用可能であることに加え、抵抗率が $1.5 \times 10^{-5} \Omega\text{m}$ と比較的高いことが挙げられる。抵抗率が高ければ単位長さあたりに発生する電圧が大きくなるため、デバイスの小型化が可能となるからである。たとえば低温超伝導体の Nb の抵抗率は YBCO よりも2桁も低い $1.5 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ である。また、注入電極には Au を用いた。これは、アニーリングにより YBCO との接触抵抗を非常に小さくすることができるからである。このデバイスは注入電流がある閾値を超えると電圧が発生するので、接触抵抗を小さくすればより微小な入力電圧に対しても応答することが可能となる。

ブリッジ長 $100\mu\text{m}$ 、幅 $5\mu\text{m}$ のデバイスのスイッチング特性を図2に示す。バイアス電流 I_b は低めに設定し、非ラッチ動作 (I_{inj} を0にすると V_{ds} も0に戻る) を行った。2Vの入力電圧に対し、9Vの出力が得られていることが分かる。応答速度についても測定した結果、立ち上がり、立ち下がり共に $10\mu\text{s} \sim 100\mu\text{s}$ と非常に遅いデバイスであることが分かった。

デバイスの動作が熱によって説明できることを確認するため、ならびに優れたデバイス作製の指針を探るため、デバイスシミュレーションを行った。ブリッジの抵抗状態部分での熱の発生と、ブリッジや基板での熱の伝達を計算してデバイス特性を求めたところ、測定結果との一致が見られた。またバイアス電流 I_b を大きめに設定し、ラッチ動作 (I_{mj} を 0 にしても V_{ds} は 0 に戻らない) を行うことで応答速度が ns オーダまで速くなること、また 10mV 程度の微小な入力電圧で駆動できることが判明した。

超伝導体-半導体回路間のインターフェイスデバイスとして動作するためには、入力電圧は 1mV 以下であることが望ましい。また、GHz オーダの信号伝送を想定するならば、応答速度に関しても 1ns を切る必要がある。これらの条件を満たすためにはデバイスの微細化とプロセスの安定が不可欠である。