

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：低温デジタルデバイス

「超伝導デジタル回路への磁性薄膜導入とその効果」

名古屋大学 大学院工学研究科
准教授 赤池宏之

単一磁束量子(SFQ)回路をはじめとする超伝導デジタル回路の特徴の一つは低消費電力性である。近年、この特徴が重要視され、さらに低消費電力化を目指す研究開発が盛んである。これは、超伝導デジタル回路の目指すべき方向性の一つがエネルギー効率の高い演算処理の実現であり、スーパーコンピュータやデータセンターにおける電力消費量の将来的な課題に対して、超伝導デジタル回路が一つの解を与える可能性があるからである。実際、米国では **Cryogenic Computing Complexity (C3)** プログラム¹⁾ の下、日本でも **JST-ALCA** プロジェクト²⁾ や科研費支援の下、精力的に超低消費電力回路やシステム化の開発が進められている。そのような中、近年、磁性体材料を回路内に組み込み、回路の高性能化及び高機能化を実現しようとする試みがなされるようになった。本稿では、磁性薄膜導入の効果について、我々の取り組みも含めて、簡単に紹介する。

磁性材料の特徴の一つは磁化を持つことである。そこで、磁気抵抗メモリ(MRAM)のごとく磁化反転を利用すれば、従来の磁束量子を保持する超伝導ループの使用から開放され、超伝導デバイス初の大容量メモリの実現につながる。上記 **C3** プログラムでは、大容量クライオメモリの開発が重要課題として位置付けられ、磁性ジョセフソン接合や超伝導 MRAM の研究開発が活発化している。我々も、磁性体に **PdNi** 合金を用いて磁性ジョセフソン接合の検討を開始しており、素子特性のばらつき(標準偏差 1σ) が **0.7%** と、集積化に耐えうる特性を実現している。磁性体導入の他の利点は、磁化から発生する磁束を回路にバイアスすることができることである。つまり、微小磁性パターンを回路内に組み込み、局所的に磁束を印加することが可能となるのである。

後者の磁束バイアス効果は、ジョセフソン接合を含む超伝導ループ、すなわち **SQUID** の並列回路となる超伝導回路において、高性能化に向けての一つの手段となる。今、回路内の一つの超伝導ループに着目する。このループに沿って一周したときの超伝導巨視的波動関数の位相変化分は、量子化条件から 2π の整数倍となる。外部からこのループに磁束が印加されると、その大きさに応じた等価位相差としてループの位相変化に加算され、ループの位相変化分をシフトさせることになる。このような機能を実現する素子は超伝導位相シフタと呼ばれ、いくつかの素子が提案されている(表 1)。

表 1. 各種超伝導位相シフタの比較

位相シフト素子	シフト量	特徴	課題・短所	文献等
磁束トラップループ	π	作製容易	素子サイズ大、磁束トラップ操作必要	3)
YBCO コーナー SQUID	π	超伝導ギャップ d波対称性	HTS プロセス、レイアウト	4)
強磁性 π 接合	π	プロセス適合性、素子サイズ小	素子特性制御	5)
磁性パターン	任意	作製容易、素子サイズ極小	磁化制御、磁束漏れ	名大

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

位相シフト導入の意義は、回路の低消費電力化⁴⁾、及び動作の安定化⁶⁾が可能なことである。位相シフトを上記超伝導ループに挿入すると、自然に周回電流が発生する。これは、超伝導ループに外部磁束を印加すると、それを打ち消すように周回電流が流れることと等価である。従来の回路では、SFQを保持するループに非対称にバイアス電流を供給することや相互インダクタンスを介した磁束の印加により、上記の効果を得ていた。従って、回路内のループにうまく位相シフトを配置すると、バイアス線の数及びバイアス電流量を削減でき、低消費電力化が可能となる。また、回路の動作余裕やビットエラーレートが改善され、動作の安定化に繋がる。

我々が取り組む磁性体を用いた位相シフトは、表1に示したように、素子の作製・微細化が容易かつ任意の位相シフト量が可能な点が特長であるが、導入に向けては磁化の制御が不可欠である。これまでに単独ジョセフソン接合及びSQUID上に磁性パターンを配置し、その効果を検討してきた。その一例を図1に示す。試料の冷却時に外部磁場を印加した時(有磁場冷却時)、磁性パターンによる磁束バイアス効果が確認できる。この磁束バイアス量は、有磁場冷却時の印加磁場の強さにより制御できることを見出している。現在、この位相シフトを回路に導入し(図2)、その効果の検証を進めているところである。

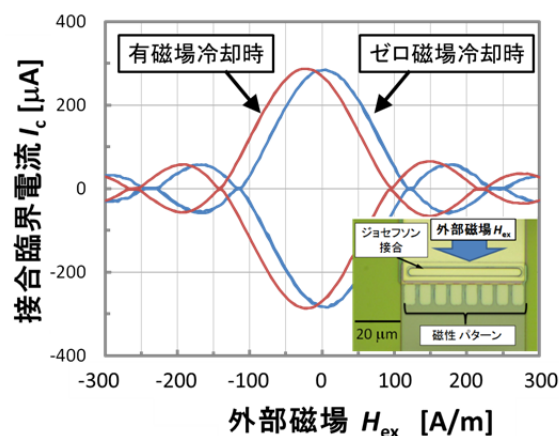


図1. 磁性パターン付ジョセフソン接合臨界電流の外部磁場依存性。有磁場冷却により、特性がシフトしていることがわかる。



図2. 磁性パターン付回路

以上のように、磁性材料を接合レベルから回路レベルまで導入することにより、超伝導デジタル回路はその性能向上とともに、実用化へ向けて大きく進展するものと予想される。このような研究の遂行には、超伝導デジタル分野の研究者のみではなく磁性分野の研究者を交えた領域融合型研究グループによるものが望ましい。このような形をとるプロジェクトはC3プログラムに代表されるように海外が先行している。国内においても、本格的な研究プロジェクトの開始が待たれる。

参考文献：

- 1) IRPA C3 program, <http://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/c3>
- 2) JST-ALCA program, <http://www.jst.go.jp/alca/kadai.html#K02>
- 3) J.B. Majer *et al.*, Appl. Phys. Lett. 80, 3638 (2002).
- 4) Ortlepp *et al.*, IEEE Tans. Appl. Supercond., 17, 659 (2007).
- 5) M. I. Khapipov, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 045032.
- 6) O. Wetzstein *et al.*, IEEE Tans. Appl. Supercond., 21, 814 (2011).