

高感度・高安定の高温超電導SQUID磁気センサーを開発

— イットリウム系酸化物超電導長尺線材の連続評価
および非破壊検査への適用性を実証 —

平成20年3月26日

財団法人国際超電導産業技術研究センター

財団法人国際超電導産業技術研究センター[理事長:荒木浩]超電導工学研究所[所長:田中昭二](ISTEC-SRL)は、このたび、世界最高レベルの磁場感度と磁場耐性をもつ集積型高温超電導SQUID磁気センサーの開発に成功するとともに、イットリウム系酸化物超電導長尺線材の作製プロセスの連続評価と非破壊検査への適用性を実証しました。

この成果は、「超電導応用基盤技術開発」事業(プロジェクトリーダー:塩原 融 超電導工学研究所副所長)として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施したものです。

超電導量子干渉素子(Superconducting Quantum Interference Device: SQUID)¹⁾を利用した磁気センサーは、あらゆる磁気センサーの中で最も感度が高いものです。生体磁気計測などの医療分野から非破壊検査などの産業分野、基礎科学分野など幅広い応用が期待されています。とくに、酸化物系高温超電導材料を用いたSQUID磁気センサーは、液体窒素や小型冷凍機によって簡単に冷却できるため、いろいろな検査装置への適用が検討されています。心磁計、免疫検査装置、鉱物探査装置、LSI欠陥検査装置、製品・構造物非破壊検査装置、金属異物検査装置などです。しかしながら、液体ヘリウム冷却を必要とする低温超電導SQUIDに比べて感度が1桁以上悪いことが解決すべき課題でした。また、0.1 μ T程度の弱い交流磁場にさらすだけで動作が不安定になることも改良すべき点でした。

このたび、液体窒素温度で安定動作する高感度の高温超電導SQUID磁気センサーを世界で初めて開発しました。開発した技術は二つあります。一つは薄膜積層構造を用いて磁界検出コイルをSQUID本体と一体化して集積回路構造にしたことです。この結果、従来より5-10倍高感度にすることができ、市販の低温超電導SQUIDに匹敵する約20 fT/Hz^{1/2}の感度を得ました。また、検出コイルやジョセフソン接合に粒界弱結合が含まれないような作製方法を開発しました。その結果、流せる電流を大きくすることができ、従来より4桁大きい約3 mTの交流磁場を加えた後も動作は安定しており、正常に測定できることが確認されました。

このような高感度SQUIDを用いて、1 mm幅に細線加工されたイットリウム系酸化物超電導長尺線材中の欠陥箇所の評価を行いました。5チャンネルのアレイ型センサーを搭載したリール・トゥール検査装置²⁾を開発し、30 m/hの高速連続評価が可能など、その実用性も確認しました。

今回開発した集積型の高温超電導SQUID磁気センサーは、各種非破壊検査や医療・パイオ用途などにも威力を発揮します。特長は3つあります。

- (1) 市販の低温SQUID並みの高感度を液体窒素温度で実現できる。
- (2) 地磁気の10倍以上高い交流磁場の中でも所望の微弱磁場の変化を検出できる。

(3) 集積化技術を用いているため多チャンネル化が容易である。

また、開発したイットリウム系長尺線材用の非破壊検査装置では、1mm間隔でSQUIDセンサーを並べましたので、フィラメント化した超電導線材の性能や欠陥の位置を高速で評価することができます。ちなみに、テープ線材を1mm幅程度にフィラメント化するのは、電力機器応用のように交流電流を流す場合に損失を小さくするために必須だからです。

■ 注釈

- * 1) 超電導量子干渉素子(SQUID) : 超電導の特徴である磁束の量子化現象を利用した超電導素子。ジョセフソン接合を1,2個含む超電導ループで構成され、ループに流れる超電導電流が、ループを貫く磁束の大きさにより周期的に変化することを利用し、磁場を電圧に変換する高感度磁気センサーができる。
- * 2) リール・トゥ・リール検査装置: 現在、線材の作製プロセスや加工プロセスに採用されているのと同様に、リールに巻かれた線材を送り出し、もう一方のリールに巻き取りながら2つのリール間で連続した検査ができる装置。

■ お問い合わせ先

(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所[担当: 田辺圭一]

東京都江東区東雲1-10-13

TEL:03-3536-0617

■ 本成果の発表先

平成20年度春季応用物理学関係連合講演会(3月27日、日本大学船橋キャンパス)

[補足説明資料]

従来の低温超電導SQUID磁気センサーが高感度である理由は次の二つです。一つは、大きな出力電圧が得られるトンネル型ジョセフソン接合を用いていること、もう一つは検出コイルをSQUIDの上に積層することで、磁界の取り込みを効率よくできることです。

また、薄膜交差構造を含む複雑な検出コイルを集積化することで、磁場耐性の高い(=環境磁場が大きくても安定に動作する)センサーが作られています。しかし、結晶構造が複雑で結晶成長温度も高い酸化物系高温超電導材料の場合、電気的なリークが全くない酸化物絶縁体との薄膜多層構造を作るのが困難なため、このような集積型SQUID磁気センサーは再現性よく製造することができませんでした。これまでは、高温超電導薄膜1層と粒界型ジョセフソン接合を用いたセンサーが市販品あるいは研究開発用に製造されている状態でした。

ISTEC-SRLでは、これまでの情報通信用の超高速デジタルデバイス開発の過程で構築した高温超電導集積回路製造技術、ランプエッジ型ジョセフソン接合³⁾作製技術をもとに、集積型高温超電導SQUID磁気センサーの開発を進めています。今回、検出コイルを集積化した基本性能評価用のセンサー(図1参照)を試作し、世界最高レベルの感度を実証しました。また、検出コイルに粒界弱結合を含まない磁場差分計測型のセンサーアレイ(図2参照)を試作し、3 mTの交流磁場印加後でも磁束トラップがなく安定動作することを実証しました。

開発した高温超電導SQUID磁気センサー及び検査装置の特長は以下の通りです。

(1) 高温で高い出力電圧が得られるランプエッジ型ジョセフソン接合

超高速デジタル集積回路向けに開発したランプエッジ型ジョセフソン接合を採用しました。超電導電極薄膜として、超電導臨界温度 T_c の高いサマリウム系材料($\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$)やエルビウム系材料($\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$)を用い、超電導材料と反応しない SrSnO_3 絶縁層と界面が平坦で電氣的リークのない積層構造を開発しました(図3参照)。また、Cuの欠損した酸化物を堆積する新たなバリア層形成技術を導入することにより、液体窒素温度(77.3 K)で十分大きな20-50 mVの電圧出力が得られるSQUIDを実現しました。

ランプエッジ接合は酸化マグネシウム(MgO)単結晶基板の任意の位置に形成できます。従来は、 SrTiO_3 バイクリスタル基板⁴⁾等を用いた粒界接合でSQUIDを作っていたためアレイ化が困難でした。ランプエッジ接合ではアレイ化も容易で、機能の向上と共に低コスト化が可能です。さらに、バイクリスタル基板を用いた場合には検出コイルの一部に粒界弱結合部分ができ磁束トラップが生じやすくなります。今回開発した集積回路構造では、このような弱結合部分を完全に排除することができ、磁場耐性を飛躍的に向上させました。

(2) 接合特性を劣化させない薄膜積層プロセス

従来の積層型高温超電導SQUIDを作る試みでは、ジョセフソン接合を形成した後に磁束トランスやコイルを作製していたため、プロセス途中の熱の影響で接合特性が劣化することが問題でした。ジョセフソン接合を磁束トランスやコイルと同時に作製できる新たな薄膜積層プロセスを採用することにより、接合特性の変化がない高性能の集積化SQUIDを実現しました。

(3) 1 mm幅以下の空間分解能をもつ高速・高感度欠陥検査装置

開発したイットリウム系酸化物超電導長尺線材用の検査装置(図4参照)では、冷凍機により超電導臨界温度以下に冷却した5 mm幅線材の評価を行いました。5mm幅の線材を5本のフィラメント(1mm幅×5本)に加工した線材を評価しました。フィラメント線に0.1 mT程度の交流磁場を印加し、線材中に励起した渦電流が欠陥を迂回することによって発生する微弱な垂直磁場成分変化を検出します。1 mm幅の検出コイルをもつ5チャンネルの磁場差分計測型SQUIDセンサーを用いていますので、5本のフィラメント線の特性を同時に評価できます。SQUIDの高感度性能により、各フィラメントの超電導層および上部の常伝導金属安定化層中のマクロ欠陥(臨界電流が著しく低下している部分や部分断線)の位置を高速で検出することが初めて可能になりました(図5参照)。現在の検査速度はリール・トゥーリールで送り出す線材の冷却能力で制限されており、原理的には将来の線材製造速度以上の100 m/hの速度での作製・加工プロセスの観察やスクリーニング検査も可能です。また、SQUIDの検出コイルのサイズを縮小することで、交流損失低減のためにより細線化された線材の評価も可能になります。細線加工された長尺線材の欠陥位置を高速検査し、補修することにより、機器開発用の加工線材の歩留まりを大幅に向上することが期待されます。

■ 注釈

- * 3) ランプエッジ型ジョセフソン接合: 高温超電導薄膜を加工し30°程度の傾斜角をもつ斜面をまっず形成し、その上に薄い絶縁体バリア層と上部超電導薄膜を堆積し作られるジョセフソン接合。
- * 4) バイクリスタル基板: 2つの単結晶をその結晶方位を傾けて高温で貼り合わせて作製した結晶(バイクリスタル: 双晶)から切り出して作られる基板。加工コストによりその価格は、 MgO 単結晶基板の約10倍程度となる。

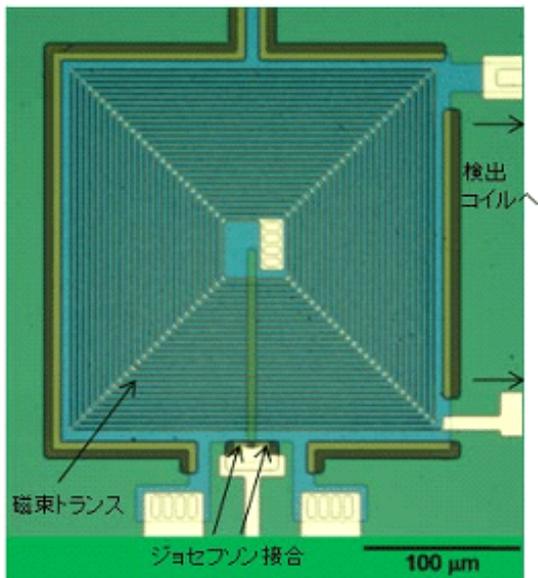


図1 磁束トランスを集積化したセンサー (マグネトメータ)

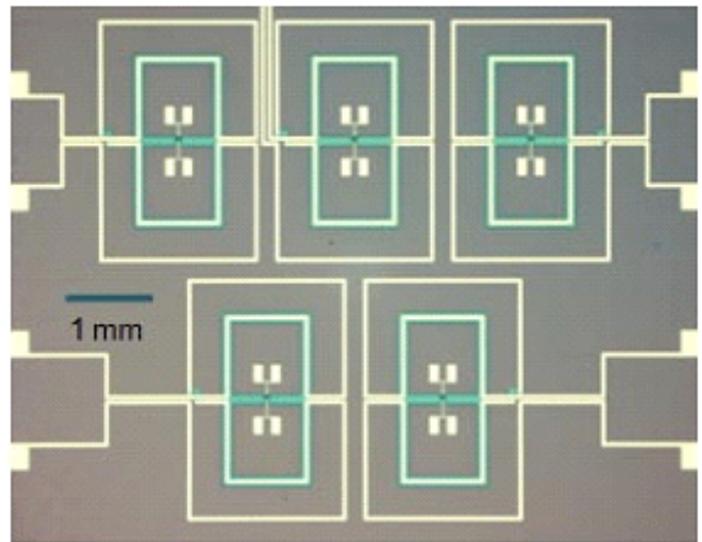


図2 磁場差分計測型の5チャンネルセンサーアレイ

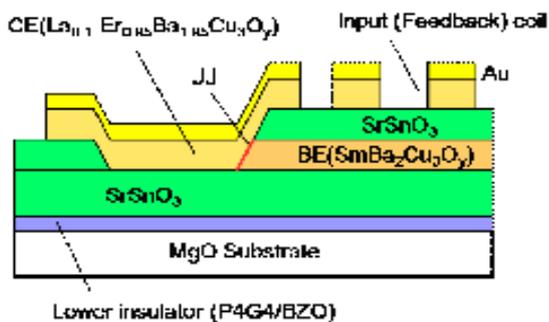


図3 開発したランプエッジ型ジョセフソン接合 (JJ と表記) を含む酸化物薄膜積層構造

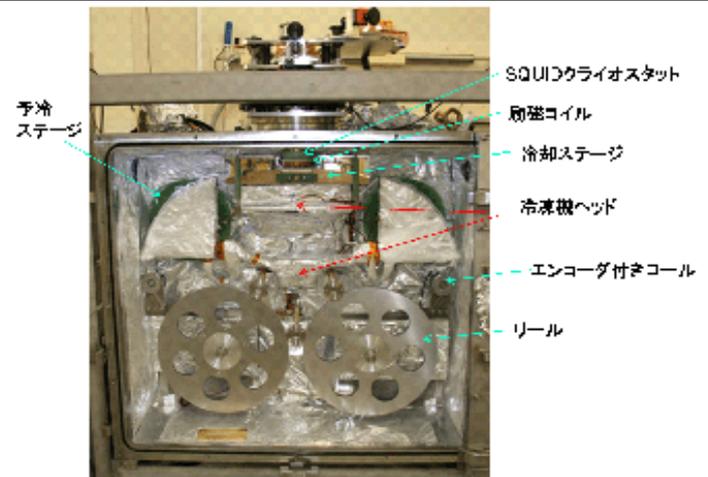


図4 5チャンネルアレイセンサーを用いた酸化物超電導長尺線材用のリール・トゥ・リール評価装置

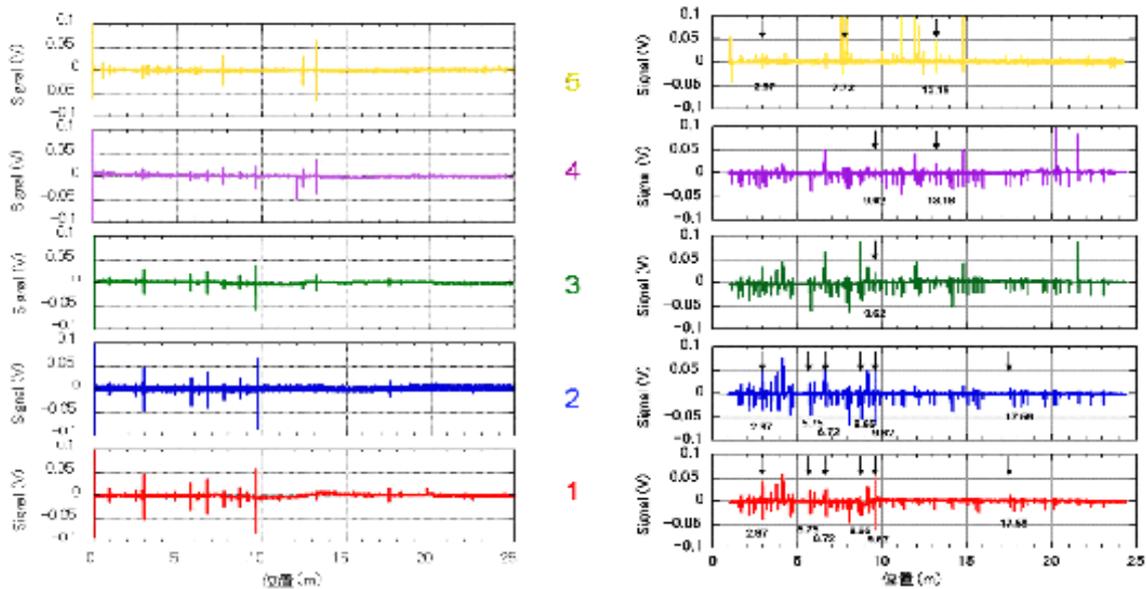


図5 フィラメント化加工前（左）後（右）のテスト用 25 m 長線材の各 SQUID チャンネルにおける評価結果。プラス・マイナス対称の大きな信号が出ている部分が臨界電流の小さな箇所。検査速度は 30 m/h。