

セイコーインスツルメン（株） 超伝導エレクトロニクス応用プロジェクト 師岡利光、茅根一夫

セイコーインスツルメン株式会社は、高感度センシング技術開発の一環として、1989年から超伝導エレクトロニクス応用プロジェクトを開始した。

当初、電子技術総合研究所において、超伝導エレクトロニクスの技術指導を受け、その後社内において、高感度磁気センサである超伝導量子干渉素子（Superconducting Quantum Interference Device）および、同システムを開発、実用化してきた。

SQUID は、従来検知できなかった極微弱な磁気信号の検出が可能である、直流から高周波までの広帯域でフラットな検出感度を持つ、非破壊・非接触計測が可能であるという特徴を持つ。そのため、材料開発、プロセス開発においてますます高度化が進み、さらに、安全、環境問題が重要視される産業界において、SQUID は検査・分析装置の高感度センサとして期待されている。しかし、産業用検査・分析装置には、微小な信号の大きさと位置情報を取得できる高い磁場感度と高い空間分解能が要求される。

そこで、本プロジェクトでは、SQUID の実用化に必要な要素技術の開発を行ってきた。本稿では、その要素技術を用いて作製した SQUID デバイス、および、その応用例について紹介する。

1. SQUID 開発における要素技術

(1-1) Nb 系超伝導薄膜プロセス

キーデバイスである SQUID デバイスの安定供給と高性能化のためには、量産性の高い、微細加工技術が必要であった。

そこで、当社が保有してきた半導体プロセス技術を応用し、4 インチ Si ウエハーを用いて、信頼性、再現性、均一性の良好な Nb 超伝導薄膜プロセス技術を構築した[1]。SQUID は、Nb/AlOx/Nb トンネル接合、Al または Au 抵抗、SiO₂ 層間絶縁層で構成される。

(1-2) 高感度・高分解能 SQUID 設計技術

より高度な SQUID システムを構築するためには、応用対象に適した SQUID 設計が必要となる。たとえば、磁場感度と空間分解能の関係は、検出コイルを大きくすることにより、前者は向上し、後者は劣化する。我々は SQUID が検出する磁場感度や空間分解能のシミュレーションを行い、素子パラメータの最適化を行っている。特に、産業応用では、空間分解能や環境ノイズの除去が重要であり、微分型構造やマルチループ構造の検出コイルを採用している[2]。

2. 産業用 SQUID デバイス

産業応用を目的とした SQUID デバイスを紹介する。

(2-1) 非破壊検査用同心円 DC-SQUID グラジオメータ

建物の中のガス管、水道管、鉄筋に亀裂や欠陥が発生する前に、早期にその腐食・劣化状態を検出できることが強く望まれている。

我々は検出コイルに直径1.6mmの同心円2次微分型検出コイルをもつ非破壊計測用同心円 DC-SQUID グラジオメータ（図1）を開発した[3]。同心円型微分コイルを検出コイルに採用し、その検出コイルを直接 SQUID ループとした並列マルチループ構造を持つ。このグラジオメータは、磁場分解能 80 fT 以下、空間分解能 1 mm 以下の性能を持ち、環境ノイズを効果的に除去できる特徴を有する。

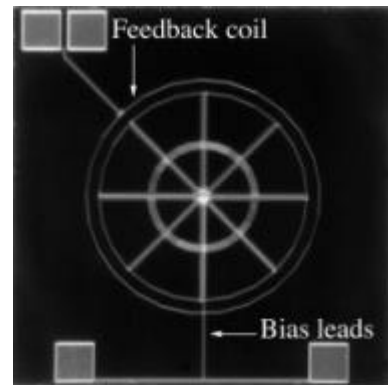


図1 非破壊検査用同心円 DC-SQUID グラジオメータ

(2-2) SQUID 顕微鏡用マイクロ DC-SQUID

直径 10 μm の微細な検出コイルを有するマイクロ DC-SQUID を開発した（図2a）[4]。検出コイル（図2b）は Si チップのエッジに、また、ジョセフソン接合、および、ワッシャーコイルはチップの中央部に配置されている。検出コイル部以外での磁気結合を極力減らすよう設計されている。このマイクロ DC-SQUID は、磁場分解能 150 nT 以下、空間分解能 5 μm 以下の性能を持つ。マイクロ DC-SQUID を用いた SQUID 顕微鏡は、磁性薄膜や超伝導薄膜の磁気特性評価や IC チップの不良解析のため計測ツールへの応用が可能である。

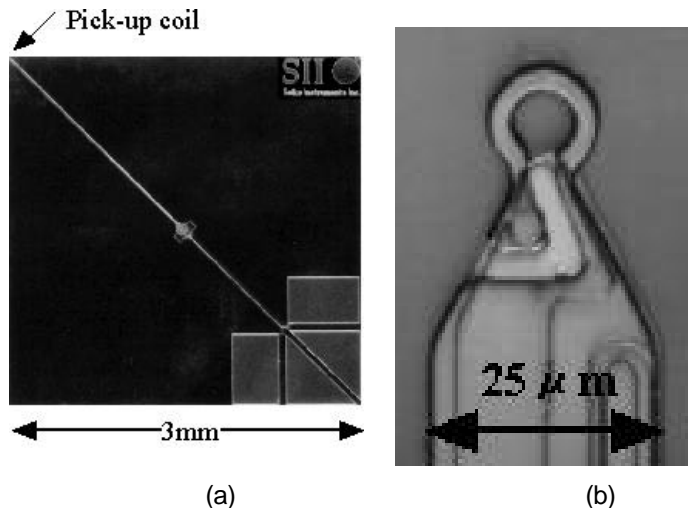


図2a SQUID 顕微鏡用マイクロ DC-SQUID

図2b 検出コイルの拡大写真

3. 応用例 (走査型 SQUID 顕微鏡システム)

実用化の例として、マイクロ DC-SQUID を搭載した走査型 SQUID システムとその測定結果について紹介する。

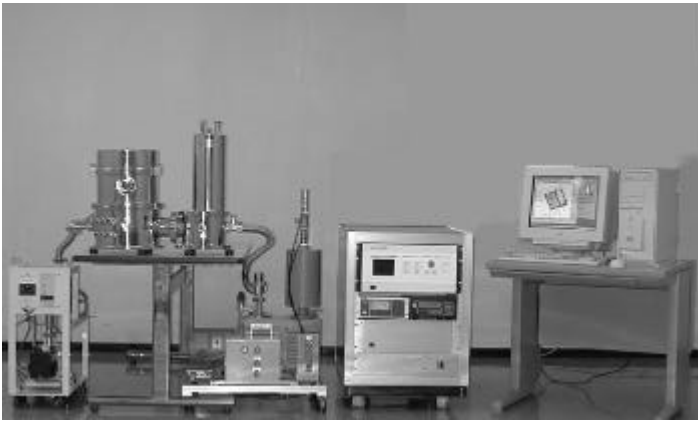


図3 走査型 SQUID 顕微鏡システム

走査型 SQUID 顕微鏡システムを図3に示す[4]。システム構成はマイクロ DC-SQUID、ステンレス製真空チャンパー、走査ステージ、そして、コントロールユニットからなる。マイクロ DC-SQUID とサンプルは真空チャンパー内に納められ、液体ヘリウムにより冷却される。供給されるヘリウムの温度と流量を変化させることにより、3 K から 100 K の温度制御が可能である。

図4は、走査型 SQUID システムを用い観察された Nb 超伝導薄膜の磁気イメージを示す。磁束の総和は $1 \Phi_0$ に対応しており、Nb 薄膜中に単一磁束量子がトラップされていることが確認することができた。

また、図5に、地磁気の約10%の磁場が印加された状態で冷却された SQUID アレイの磁気イメージを示す。図5には、薄膜中にトラップされた多数の磁束量子が確認できる。磁束量子は超伝導デバイスの特性を劣化させる原因となる。

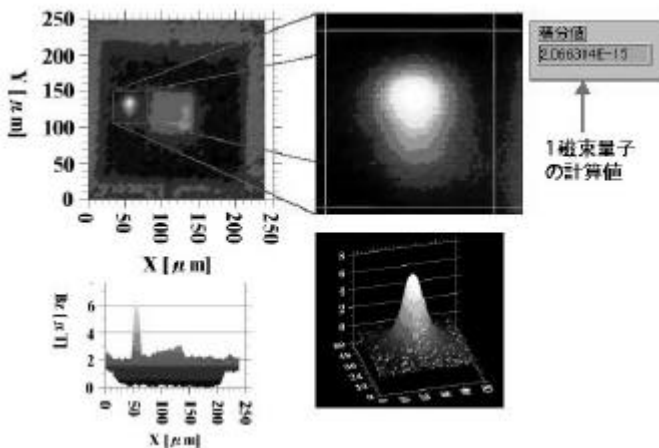


図4 SQUID 顕微鏡による磁気イメージ1
Nb 薄膜中にトラップした単一磁束量子

走査型 SQUID 顕微鏡による磁気イメージは、トラップされた磁束量子の位置や数の特定を可能にする。このように、走査型 SQUID 顕微鏡はデバイスや薄膜の評価のみならず、デバイス設計用ツールとしての可能性をもつ。

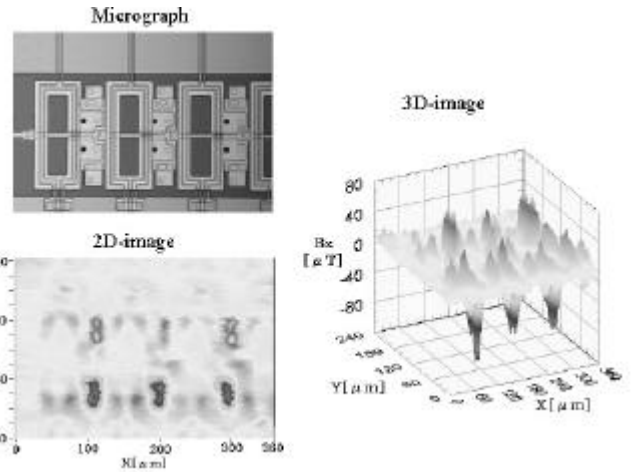


図5 SQUID 顕微鏡による磁気イメージ2
直列 SQUID アレイ

4. おわりに

Nb 系 SQUID は、実用化に必要な要素技術もほぼ確立され、普及段階になったといえる。近年、高温超伝導デバイスの研究も、世界中で盛んに行われている。しかし、本稿で紹介したような高空間分解能計測、さらに、SQUID アンプのような低雑音・広帯域計測を必要とする応用に対し、Nb 系 SQUID は依然として大きな役割を担っている。

SQUID をはじめとする超伝導エレクトロニクスの普及には、ユーザーに超伝導を扱っているという意識を持たせないことが必要である。そのための課題として、やはり、高温超伝導 SQUID と冷却技術が挙げられる。実用化に耐えうる高温超伝導プロセス技術と寒剤を必要としない冷凍機の普及が待たれる。本プロジェクトでは、今後、磁気計測装置から観察装置へ、さらに、分析装置への展開をはかり、産業計測分野への応用を目指している。

参考文献

- [1] K. Chinone, T. Ataka and N. Shimizu: "Easy process for fabrication of high-reliability DC-SQUIDS", IEEE Trans. Mang., Vol. 29, 3562 (1993).
- [2] T. Morooka, S. Nakayama, A. Odawara, N. Shimizu, K. Chinone, T. Ataka and N. Kasai: "Integrated Direct Current Superconducting Quantum Interference Device Gradiometer for Nondestructive Evaluation", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.35, L486 (1996).
- [3] K. Chinone, S. Nakayama, T. Morooka, A. Odawara, and M. Ikeda, "Scanning DC-SQUID System with High Spatial Resolution for NDE", IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 7, 3271 (1997).
- [4] T. Morooka, S. Nakayama, A. Odawara, M. Ikeda, S. Tanaka and K. Chinone, "Micro-imaging System using Scanning DC-SQUID Microscope", IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 9, 3491 (1999).

連絡先

師岡 利光
(株)エスアイアイ・アールディセンタ 要素開発部 要素開発2グループ 主任
〒270-2222 千葉県松戸市高塚新田563
Tel: 047-392-7859, fax: 047-392-2026
E-mail: toshimitsu.morooka@sii.co.jp
茅根一夫
セイコーインスツルメンツ株式会社 科学機器事業部 開発部開発1課 課長
〒270-2222 千葉県松戸市高塚新田563
Tel 047-391-2142, Fax 047-391-0960
E-mail: kazuo.chinone@sii.co.jp