

平成 28 年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目：個人研究 研究期間：平成 28 年 4 月～平成 29 年 3 月
 研究課題名：マイクロ波イメージングに向けたヘテロダイン超伝導量子干渉素子の開発
 ラボ長
 所属：システム創成専攻・電子光科学領域
 氏名：宮戸祐治

研究成果（当初の研究目的と得られた結果を記載してください。図表を含め 3 ページ程度）：

超伝導量子干渉素子(SQUID)は、非常に高感度な磁場センサとして知られている。しかしながら、定量的に磁場を測定できる周波数範囲が直流から数 100 kHz 程度までに限られるという課題があった。本研究では、GHz オーダの高い周波数のマイクロ波を検出できるようにすることを目的に、ヘテロダイン SQUID と呼んでいる新しいタイプの SQUID の開発を目指している。これは図 1 に示すように、SQUID を構成している Josephson 接合を高周波ミキサとして動作させ、局発振器から高周波の参照信号を素子に加えることで、ヘテロダインと呼ばれる手法によってマイクロ波信号を低周波領域の信号に周波数変換し、その変換された低周波領域の信号を SQUID の作用によって測定しようとするものである。

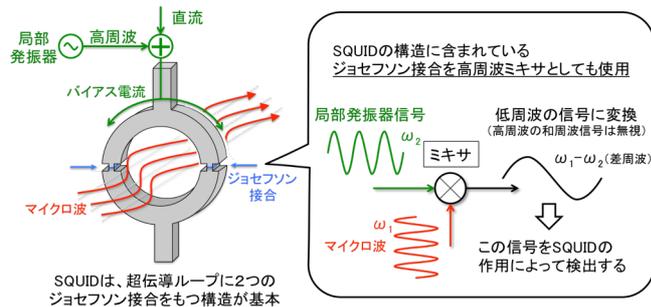


図 1. ヘテロダイン SQUID の概念図.

これは図 1 に示すように、SQUID を構成している Josephson 接合を高周波ミキサとして動作させ、局発振器から高周波の参照信号を素子に加えることで、ヘテロダインと呼ばれる手法によってマイクロ波信号を低周波領域の信号に周波数変換し、その変換された低周波領域の信号を SQUID の作用によって測定しようとするものである。

本研究ではヘテロダイン SQUID の実現にむけ、dc-SQUID と rf-SQUID の概念を融合させることとし、共振作用によってマイクロ波を高感度に受信する役目をもたせるため、図 2(a)のように 1 波長リング共振器に、dc-SQUID を直結させるコンセプトとして構造を検討してきた。図 2(a)の挿入図は dc-SQUID 部付近を拡大したもので、リング共振器から検出対象となる信号と、ポートから伝達された参照信号が、ともに dc-SQUID 内の Josephson 接合に流れ、接合のミキサ作用を受けることを期待している。前年度に、MgO 基板 (比誘電率 : 9.7, $\tan \delta : 3.5 \times 10^{-6}$ @80K) 上に高温超伝導体の YBCO 薄膜を堆積させて、共振周波数 820MHz の rf-SQUID を作製し、実際に

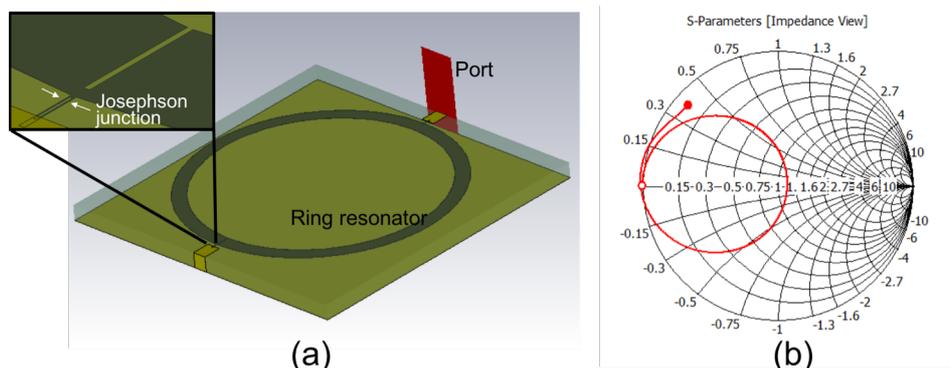


図 2. (a)検討したヘテロダイン SQUID のデザインと、(b)S11 の計算により得られたミスチャート.

動作することを確認しており、ヘテロダイン SQUID においても MgO 基板を採用する方針で進めた。まず、電磁界解析シミュレータ CST を用いて、コンセプト通り動作する構造を目指し、デザインの最適化を行った。完全ではないが、前年度のデザインよりもシミュレーション上では整合をとることに成功した。図 2(b)の例では、最も整合がとれた周波数が 2.5 GHz であり、所有している RF 信号発生器の周波数範囲である 3 GHz までに収まっている。このように、ある程度、目的の機能を有する設計ができたと考えていた。

しかしながら、その結果をもとに試作に移ることを検討していた矢先、本研究室において YBCO の成膜に用いている PLD 用のエキシマレーザー装置が経年劣化による故障のため発振できなくなるというトラブルに見舞われ、さらに研究室の諸事情により成膜できない期間が長期間あった。このため、残念ながら今年度においては、ヘテロダイン SQUID を試作するまでには至れなかった。一方、SQUID の作製には Josephson 接合を作ることが必須であるが、これまで本研究ではバイクリスタル基板に YBCO 薄膜を成膜した際に形成される YBCO 薄膜の結晶粒界を接合に利用してきた。レーザーが故障したとき、バイクリスタル基板に成膜した未加工の YBCO 薄膜はストックされていなかったが、単結晶基板に成膜してあったものはストックが多くあった。そこで、このストックを使って、He/Ne FIB により微細加工をすることで Josephson 接合を作製することを検討した。また、これまでのバイクリスタル基板では、接合位置が基板の結晶粒界によって定義されてしまうため、加工できる SQUID のデザインには多くの制約があった。一方、FIB を用いれば基板表面のどこにでも接合を作製できることになり、図 2 (a)に示したデザインでも問題なく Josephson 接合が作製できることになる。FIB での加工にあたり、以前から研究交流してきた英国 UCL グループが He/Ne FIB を所有していたことから、Josephson 接合の作製において共同研究を行うこととなった。まず YBCO 薄膜をフォトリソグラフィーによってパターンニングし、Ar イオンミリングにより図 3(a)の配線パターンに微細加工した。次に、共同研究上、詳細なドーズ条件は述べられないが、中央付近の細くブリッジしている箇所を横切るように FIB 装置によって、He あるいは Ne のイオン源によりライン状にドーズ加工した。加工によって、図 3(b)に示す

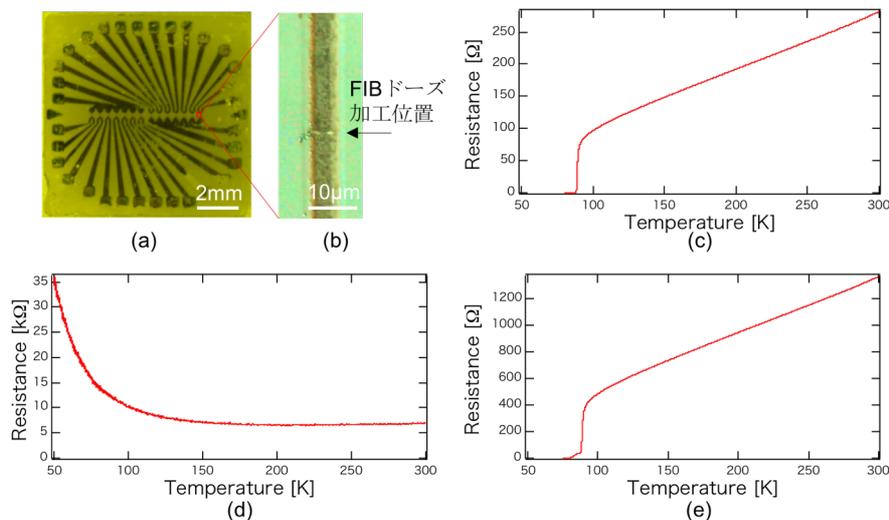


図 3. Ne/He ソースの FIB で加工した試料の温度抵抗特性変化. (a)未ドーズの試料, (b)ドーズにより半導体的に変化した試料, (c)臨界温度付近のみが変化した試料.

ように、ドーズ条件によってはブリッジ部を横切るように加工痕が光学顕微鏡で確認できる。FIB ドーズをしていないものは、図 3(c)のように臨界温度で超伝導転移する典型的な温度抵抗特性を示していたが、FIB ドーズの条件によっては、図 3(d)のように温度低下に伴って抵抗値が急増する特性を示したものがあり、半導体的な振る舞いに変化した。また、条件によっては、図 3(e)のように臨界温度付近の特性が明瞭に変化したものも観測された。これは局所的な性質の変化を反映している。この電流電圧特性を測定したものが図 4(b)の結果で、比較として未ドーズの試料を測定した結果が図 4(a)である。未ドーズのものよりも非線形的な振る舞いを示しており、臨界温度の低下に伴い、同じ温度で測定した結果同士を比較すると臨界電流も低くなった。このように FIB ドーズ加工により、超伝導特性を変化させて、超伝導の性質を失わせたり、臨界電流の値を変化させたりすることができており、これらを組み合わせれば、望み通りの場所に接合を作製できるようにすると期待している。

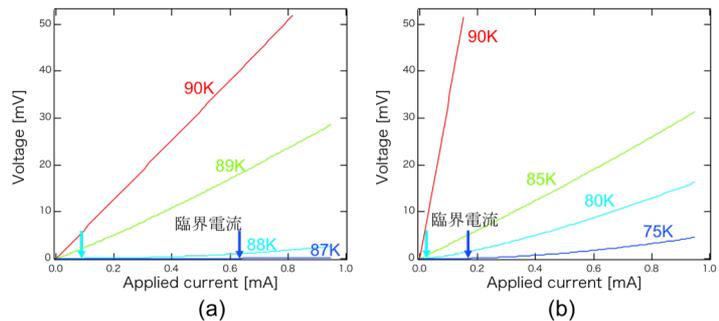


図 4. Ne/He ソースの FIB で加工した試料の電流電圧特性変化. 温

さらに、SQUID を駆動させ、磁場の定量計測するために必要となる磁束ロックループ(FLL)制御を行う SQUID エレクトロニクスの検討も行った。エレクトロニクスは市販品も存在するが、大部分がアナログ回路で構成されている。今回、インタフェース部のみはアナログ回路ではなるが、それ以外の主要部となる IQ 検出・FLL システム部は A/D コンバータと FPGA からなるデジタル回路で構成した我々独自の SQUID エレクトロニクスを開発した。このエレクトロニクスでは、基本的なシステム構築した後でも、プログラムの書き換えによってシステム構成を比較的容易に変更ができるメリットがあり、プログラムによる改良を進めた。これにより、市販品のエレクトロニクスよりも高周波数の SQUID に対応できるようになるとともに、汎用性・拡張性も向上できた。

以上のように、研究課題の内容を進められたところもある一方、実際にデバイスを作製することが課題として残った。しかし、本研究課題に関連した内容で新たに外部資金を獲得できたことから、次年度こそ、ヘテロダイン SQUID の試作・動作検証を着実にやりたいと考えている。

最後に、未来研究ラボシステムでの研究をきっかけとして予算獲得ができ、海外の研究グループとの共同研究も進められました。ここに、頂いたご支援に感謝を申し上げます。

キーワード：

高温超伝導、超伝導量子干渉素子、磁場センサ、マイクロ波

研究経費 (H28 年度) の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
48,114 円	267,606 円	86,280 円	0 円	12,000 円	414,000 円

共同研究者等

研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

齋藤恵美・システム創成専攻電子光科学領域・学部4年（昨年度卒業生）

渡邊一樹・システム創成専攻電子光科学領域・学部4年

横町伝・システム創成専攻電子光科学領域・学部4年

赤羽英夫・システム創成専攻電子光科学領域・准教授

Ed. Romans・University College London・Lecturer

発表論文等（平成29年3月31日現在）

〔学会発表〕

1. 第77回応用物理学会秋季学術講演会，宮戸 祐治，齋藤 恵美，糸崎 秀夫 “単独駆動が可能なMgO基板を用いた高温超伝導 rf-SQUID”，平成28年9月14日
2. 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016), Yuji Miyato “Investigation of readout coil for performance improvement of high-Tc rf-SQUID”, December 15, 2016
3. 第15回低温工学・超伝導若手合同講演会，渡邊 一樹，宮戸 祐治，赤羽 英夫 “RF-SQUID 駆動用デジタル制御システムの開発”，平成28年11月25日
4. 電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会，渡邊 一樹，宮戸 祐治，赤羽 英夫 “高温超伝導 RF-SQUID のためのデジタル FLL システムの開発”，平成29年1月19日

外部資金獲得状況・申請状況（本研究課題に関連して、科研費、JST等の競争的資金、受託研究、奨学寄付金等を受給された場合、また、申請された場合はその状況を記入ください）

- ・公益財団法人村田学術振興財団 平成28年度研究助成に本研究課題の関連課題で採択
- ・平成29年度科学研究費助成事業(科研費) 若手研究(A)に本研究課題の発展テーマにて申請

参考となるHP等

<http://www.sup.ee.es.osaka-u.ac.jp/>