

研究種目：個人研究 研究期間：平成 28 年 10 月～平成 28 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：

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

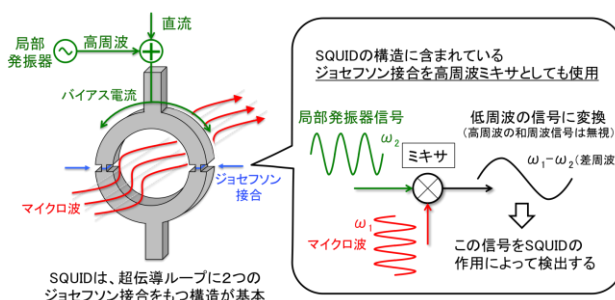


図 1. ヘテロダイン SQUID の概念図.

いる。これは、図 1 に示すように、SQUID を構成しているジョセフソン接合を高周波ミキサとして動作させ、局部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。

すべての SQUID は、大きく分けて 2 つの種類に分類される。直流電流で駆動する dc-SQUID と高周波の磁場で駆動する rf-SQUID であり、これまで両方の SQUID を高温超伝導体の YBCO (臨界温度 90K) で作製してきた実績がある。本研究で開発しようとするヘテロダイン SQUID では、dc-SQUID を主構造とすることで、この dc-SQUID に含まれるジョセフソン接合のヘテロダインの作用によって、低周波領域の信号に周波数変換するとともに、dc-SQUID そのものによって周波数変換された信号が測定されることを期待している。しかしながら、従来の単純な dc-SQUID 構造だけでは、外部からマイクロ波を与えても、SQUID のインピーダンス不整合のため、SQUID がマイクロ波をうまく受信できないことが予想される。そこで、効率的な受信のため、rf-SQUID が有する共振器構造を主構造に加えるという方針で設計を開始した。

また、ヘテロダイン SQUID においては、SQUID に直流電流を流す同じ配線に局部発振器信号を加える必要があるが、その際、外部に置かれた局部発振器との整合をとるため、マイクロ波の周波数帯で配線の特性インピーダンスを 50Ω にする必要がある。そこで、直流および局部発振器信号を通す配線はマイクロストリップラインとすることにした。研究代表者が所属する研究室では、dc-SQUID、rf-SQUID とともに SrTiO₃(STO)基板で作製している。この STO 基板は、基板厚みが $500 \mu\text{m}$ であり、80K での比誘電率が 2000 と高く、 $\tan \delta$ は 2.5×10^{-4} と、損失がそれほど低くない。また、YBCO 薄膜も 200 nm 以内の膜厚でしか良好に成膜できないなどの制約がある。このためマイクロ波を伝達することが可能なマイクロストリップラインを STO 基板上に YBCO

で作製しようとする、現実的なスケールで 50Ω の特性インピーダンスを有するものを作ることが現状では難しく、安定して通常のフォトリソグラフィにより微細加工で作製できるサイズの下限である $10 \mu\text{m}$ のラインでは、 10Ω 程度と低くなってしまふことがわかった。比誘電率が高いので、比較的低い周波数に対応する共振器もサイズを小さくできるメリットがあり、構造を工夫すればマイクロ波を効率的に与えることができる可能性は残されており、STO 基板での作製は引き続き検討しているが、より誘電率の低い基板に変えることも検討した。一般に、超伝導を用いたマイクロ波回路は MgO 基板上に作製されることが多い。80K での MgO の比誘電率は 9.7、 $\tan \delta$ は 3.5×10^{-6} と良好である。そこで、まずはヘテロダイン SQUID のデザイン・設計を MgO 基板 (基板厚: $500 \mu\text{m}$) で行うことにした。まず、マイクロ波回路の基本となるマイクロストリップラインの設計を行った。基板裏面を金で全面コートしてグランドプレートにすることを想定し、特性インピーダンスが 1 GHz 付近で 50Ω となるように YBCO ラインの線幅を求めると $480 \mu\text{m}$ となった。図 2(a)はその時のシミュレーションモデルで、(b)は S21 パラメータの結果であり、伝送損失はほぼゼロとなる。また、サイズも現実的に作製できる範囲である。このマイクロストリップラインをベースに、マイクロ波伝送線路共振器の設計概念を dc-SQUID のデザインに組み込むことにした。このとき、単純に dc-SQUID の構造をマイクロ波で共振するようにすると、SQUID ループサイズが大きくなりすぎて動作しなくなることが予想された。そこで、dc-SQUID 部のデザインは安定に動く従来のものから変えずに用いることとし、これに共振器を直接結合させる構造 (directly coupled type) を考案した。共振器部の構造としては、1 波長リング共振器を採用した。図 2 (c), (d) に考案した構造を有するシミュレーションモデルおよびそのときの S11 パラメータの結果をそれぞれ示す。

図 2(a)は、MgO 基板上のマイクロストリップラインのシミュレーションモデルを示している。緑色の基板に、赤いストリップラインが描かれ、両端が port1 と port2 とラベルされている。図 2(c)は、ヘテロダイン SQUID のシミュレーションモデルを示している。緑色の基板に、中央に dc-SQUID の構造と、その周囲に ring-resonator が描かれ、port1 が示されている。

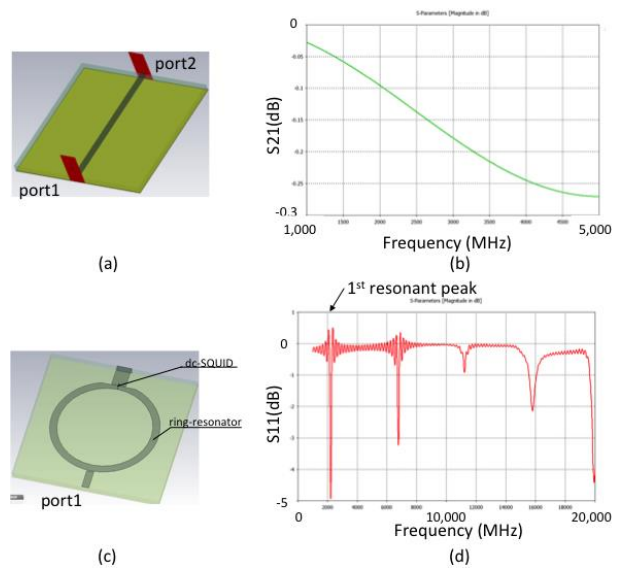


図 2. (a) MgO 基板上のマイクロストリップラインのモデルと (b) 伝達特性(S21 パラメータ). (c) ヘテロダイン SQUID のモデルと (d) 反射特性(S11 パラメータ).

図 2(d)において、2 GHz ぐらいのところに深いディップが見られており(研究室の装置の都合で 5 GHz までの範囲で共振するように設計)、ここでリング共振器が共振していると考えられる。ただし、過去に rf-SQUID を作製してきた経験では、このままでも実物で共振するとは思いますが、設計の段階で、まだ完全に整合は取れていないのが現状である。現段階では、形状を変化させてさらに整合が取れる構造を探索しており、もう少し設計を詰めた後、次期の早い段階でマスクを発注して実際に作製する予定にしている。

ここまでで、ヘテロダイン SQUID の構造を検討してきた状況について説明してきたが、先にも述べたように、これまで SQUID は STO 基板上に作製している。他グループにおいては MgO 基板で作製した報告例はあるものの、われわれの装置で成膜するための条件を確立する必要がある。そこで、実際に MgO 基板において、STO 基板のときの条件をベースに、成膜条件、特に基

表 1. MgO 基板上への YBCO 成膜時の基板温度による表面形状および臨界温度の変化.

基板温度	747°C	758°C	768°C	779°C
薄膜表面 SEM 像				
臨界温度 (K)	82.7	84.8	84.6	79.4

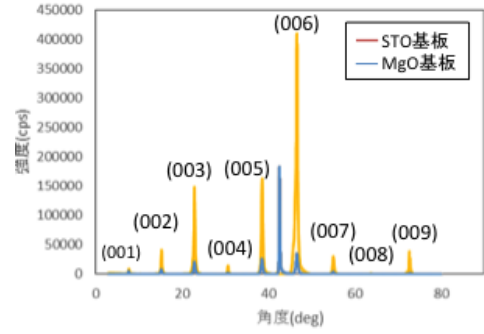


図 3. STO および MgO 基板上の YBCO 薄膜の XRD 測定結果 (θ - 2θ).

板温度の条件を変えて、良好な YBCO 薄膜を作製できる条件を探索するとともに、従来タイプの SQUID を作製するところまで行った。まず、成膜時の基板温度の条件を変えて成膜状態を評価した。表 1 に臨界温度および表面形状の測定結果の一覧を示す。これから、成膜時の基板温度が 768°C のときに最も臨界温度、表面状態も良好であることがわかった。基板温度以外にも酸素分圧等の条件も変えて成膜したが、MgO 基板ではこの条件よりも臨界温度が高くなる条件は見つけれなかった。図 3 に示した YBCO 薄膜の XRD の測定結果において、MgO 基板上に成膜したときと、STO 基板のときのピーク位置はほぼ一致しており、どちらも良好な c 軸配向膜であると言える。しかしながら、同条件で測定したピーク強度が MgO の方が低い。これは、YBCO と MgO 結晶の格子状数のミスマッチの影響であると考えられる。このため、ミスマッチの少ない STO 基板の時には 90K 程度の臨界温度が確認されるのに対し、MgO では 85K 程度とやや低くなったのだと考えられる。臨界温度はやや低いものの、液体窒素温度で十分駆動できる条件と考え、ジョセフソン接合および rf-SQUID を作製した。当初は、ステップエッジでジョセフソン接合を作製するために、イオンミリングにより MgO 基板自体に溝加工を試みたが、深さ 200 nm 程度を加工するのに所有している装置では大変な時間がかかることがわかった。そこで、基板が高価になるが、MgO のバイクリスタル基板(接合角: 26°)を購入し、これに成膜することで生じる YBCO のグレイン境界によりジョセフソン接合を作製することにした。図 4 に MgO 基板に作製したジョセフソン接合の電圧-電流特性とマイクロ波を加えたときの特性を示す。強いマイクロ波を加えると、

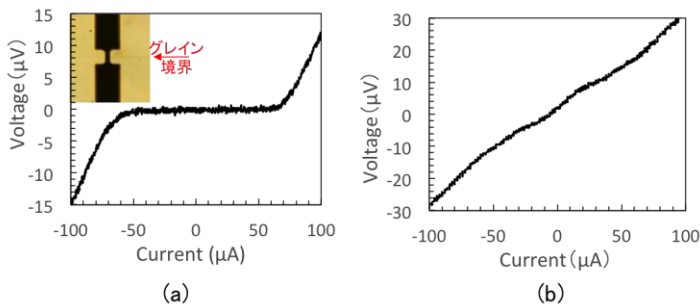


図 4. MgO バイクリスタル基板で作製したジョセフソン接合. 挿入図はデバイスの光学顕微鏡像. 接合幅 3 μ m. (a) マイクロ波を加えていない時と, (b) 近くに配置した同軸ケーブルから マイクロ波(-15 dBm)を加えた時の電圧-電流特性.

特性が変化してしまうことがわかるが、検出しようとしている強度ではほとんど特性が変化しないことを確かめている。ちなみに図 4(b)には変曲点がいくつか見られているが、これがシャピロステップと呼ばれるものであり、ジョセフソン接合として動作している証左でもある。続いて、従来タイプの SQUID としてジョセフソン接合を 1 つ含む rf-SQUID を作製することにした。研究室で SQUID

を駆動するために所有していたエレクトロニクスの駆動帯域は 450 - 900 MHz であり、この範囲に rf-SQUID が共振周波数をもたなければならない。rf-SQUID の共振器たる構造はスリット部であり、1/2 波長の共振器となるようにスリット長を調整する必要がある。シミュレーションにより駆動帯域内に収めることに成功した構造および作製したデバイスの Φ -V 特性を図 5(a) および (b) にそれぞれ示す。SQUID に特徴的な特性が確認できる。さらに、作製

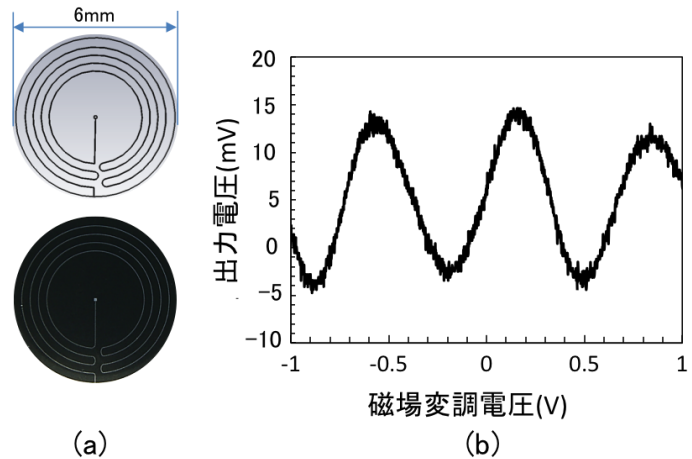


図 5. MgO バイクリスタル基板で作製した rf-SQUID. (a)上:モデル図, 下:実際に作製したデバイスの写真. (b)その Φ -V 特性.

した素子を精密に低温で測定するために、冷凍機による臨界温度測定装置にマイクロ波を導入するための改造を行っており、MgO 基板上にヘテロダイン SQUID を作製する準備は整ってきている。次期は、今期に準備したことを実際のヘテロダイン SQUID の作製に昇華させて、実際にヘテロダイン動作によりマイクロ波検出を確認できるところまで進め、研究目的をぜひ達成したい。

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（H27 年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0 円	48 万円	0 円	0 円	0 円	48 万円

共同研究者等

研究協力者： 齋藤恵美・システム創成専攻・電子光科学領域・学部 4 年

発表論文等（平成 28 年 3 月 31 日現在）

〔その他〕招待講演

神戸大学統合研究拠点「次世代サブサーフェスイメージングシステム研究」プロジェクトスタートアップセミナー，“高温超伝導 SQUID 顕微鏡による磁気イメージング”，平成 28 年 3 月 23 日

外部資金獲得状況・申請状況

平成 28 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/>