

	うえ まつ ゆたか	
氏 名	植 松 裕	
授 与 学 位	博士 (工学)	
学位授与年月日	平成 13 年 9 月 12 日	
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻	
学位論文題目	銅酸化物単結晶のジョセフソンプラズマ励振に関する研究	
指 導 教 官	東北大学教授 山下 努	
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 山下 努	東北大学教授 伊藤 弘昌
	東北大学教授 海老澤丕道	東北大学助教授 中島健介

論文内容要旨

銅酸化物超電導体は、結晶軸の c 軸方向に銅酸化物層と他の元素からなるブロック層が交互に積層する特異な結晶構造を持つ。このような結晶構造を反映し、 c 軸方向と ab 面方向では物性に異方性が生じ、 c 軸方向の電気伝導度は ab 面方向のそれに比べて数桁低い値をとる。これは銅酸化物層が電気伝導性を担い、ブロック層がほとんど電気伝導性を持たないことに由来する。さらに言えば、超伝導状態において銅酸化物超電導体結晶中では銅酸化物層が超電導層、ブロック層が絶縁層や常電導層として機能する事が判明しており、この結果、銅酸化物超電導体自体を結晶の c 軸方向に超電導層とブロック層が交互に積層したものと見なす事ができる。数々の実験により、ブロック層を介した 2 つの超電導層間に超電導トンネル効果 (ジョセフソン効果) が存在する事が実証されている。この結晶内のジョセフソン効果は、銅酸化物超電導体に固有に存在するため「固有ジョセフソン効果」と呼ばれ、原子オーダーで無数に配列するジョセフソントンネル接合は「固有ジョセフソン接合」と呼ばれている。この固有ジョセフソン効果に起因して、銅酸化物超電導体には「ジョセフソンプラズマ」振動という特異な電荷振動現象が存在する。このジョセフソンプラズマ振動の周波数は超電導材料の異方性によって異なるが、本研究で用いた $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO) では、Sr 置換量 x によって数百ギガヘルツ (GHz) から数テラヘルツ (THz) とサブミリ波帯の様々な周波数を得る事ができる。このジョセフソンプラズマの励振波の特徴として、結晶中でほとんど減衰されない事が挙げられる。そのため、LSCO のジョセフソンプラズマ振動を励振することで結晶外部へサブミリ波帯の電磁波を取り出す事が可能となり、これを利用すれば小型で高出力なサブミリ波源の実現が期待される。本論文は、LSCO 単結晶におけるジョセフソンプラズマ振動を効率よく励振する新しい手段を提案し、それを実験的に検証した結果を述べたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べている。固有ジョセフソン接合やジョセフソンプラズマに関する研究の歴史的背景を述べると共に、本研究で目的とするサブミリ波源の実現は、THz 分光や THz イメージング、電波天文学、さらには通信資源となる利用可能な周波数帯域の拡大に繋がり、工学的、科学的に幅広く利用価値が高い事を述べている。

第 2 章では、今まで、多くの研究グループの実験や理論によって検証された固有ジョセフソン接合やジョセフソンプラズマ、ジョセフソンプラズマ励振に関する知見を与え、それらの知見を元に本研究で行う LSCO のジョセフソンプラズマ励振の検討が行われている。本研究では、ジョセフソンプラズマ励振の手法として、銅酸化物超電導体を電極とするトンネル接合に対して直流電流バイアスする方法 (準粒子注入効果を利用する方法) を採用する。この手法を利用する利点は、簡便なシステム構成が可能で

あり、理論的に出力の高いプラズマ励振が期待される点である。ジョセフソンプラズマ励振に利用するトンネル接合としては、LSCO 単結晶中の LSCO の固有ジョセフソン素子を使う手法を提案し、その有用性について述べている。

第3章では、ジョセフソンプラズマ励振素子に利用するための LSCO 固有ジョセフソン素子の作製方法を示している。本研究では、結晶内の電子機能素子を利用するため、高い結晶性を有する試料を用いる必要があることから、溶媒帯域浮遊法で育成された大型で良質な単結晶を用いた。この単結晶を X 線ラウエ法で結晶方位を同定した後、結晶切断機やダイシングソーで加工し、*ab* 面内に 40 ミクロン角のサイズを有し、*c* 軸方向に 0.5mm 程度の長さを持つような LSCO 単結晶短冊を作製した。その後、短冊中央部を集束イオンビーム(Focused Ion Beam: FIB)を用いて微細加工する事で、数~数十平方ミクロンオーダーの面積を有し、接合の積層方向に 1 ミクロン程度の長さを持つマイクロブリッジ型固有ジョセフソン素子の作製に成功した。FIB 加工法によって作製されたブリッジにおいて、熱的なダメージによる超電導性の劣化がほとんどない事が、FIB 加工前後の抵抗率-温度依存性の比較から得られている。このマイクロブリッジ型素子の電流-電圧特性をカンタムデザイン社の PPMS を用いて検証を行った。マイクロブリッジ素子の電流-電圧特性では、ある臨界電流値まで零電圧状態にあり、臨界電流を超えると電圧の飛びが生じてヒステリシスを描く事が示された。電流電圧特性上ではギャップ構造が観測され、温度に対する構造の振る舞いから、この構造が超電導エネルギーギャップを反映している事が示された。また、臨界電流(ジョセフソン電流)が、超電導体(S)-絶縁体(I)-超電導体(S)型のジョセフソン素子特有の温度依存性を示した事も併せて、LSCO の固有ジョセフソン接合が SIS 型のトンネル素子である事が本研究を通して初めて明らかになった。

第4章では、LSCO 固有ジョセフソン素子の特徴について検討している。検討の内容としては、一般的に最も検討の行われている異方性の高い $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ (BSCCO) 銅酸化物超電導体との比較、並びに LSCO の異方性(具体的には Sr 置換量 x の異なる試料を用いる)を変化させた時の固有ジョセフソン接合パラメータの変化について行った。

まず、BSCCO 固有ジョセフソン接合との比較において見受けられる大きい違いとして以下の点が挙げられる。

(1) ジョセフソン臨界電流密度が非常に高い。

(2) 積層固有ジョセフソン接合が零電圧状態から有限電圧状態へと集団的に遷移する。

(1)については、LSCO と BSCCO の異方性の違いからよく説明ができ、ジョセフソン臨界電流密度と対応関係を持つジョセフソンプラズマ周波数との相関関係から、本研究で得られた高いジョセフソン臨界電流密度は LSCO 固有ジョセフソン接合の本質的な特性として判断される。また、(2)については、高い臨界電流密度に起因する積層接合間の相互作用の強さ、及びブロック層の特性の違いに起因する接合間位相ロック現象を反映した、集団的位相ロック遷移を表したものであると判断される。LSCO 固有ジョセフソン接合で見受けられる位相ロック現象は、単色性の高い発振に適した特性である事を示唆しており、これは LSCO の有用性を見出す新しい知見である。

また、異方性を変えたとき、ジョセフソン臨界電流密度、接合抵抗といった接合パラメータが異方性を良く反映して変化する事がわかり、異方性を変えたときのジョセフソン臨界電流密度から換算されるジョセフソンプラズマ周波数が、光学的な実験で得られた各異方性の LSCO におけるジョセフソンプラズマ周波数と良く一致する事が示された。また、Sr 置換量 x が 0.07 から 0.16 の範囲では、固有ジョセフソン接合が SIS 型のトンネル接合である事が臨界電流密度の温度依存性から示され、この範囲では固有ジョセフソン素子をプラズマ励振用のトンネル素子として利用可能な事が示された。

以上、第3章、第4章の結果から、LSCO 固有ジョセフソン接合が本研究で目的とするジョセフソンプラズマ励振素子として有用であることが明らかになった。

第5章では、LSCO 固有ジョセフソン素子の電流電圧特性から、微分コンダクタンス-電圧特性を評価する事で、ジョセフソンプラズマ励振が実現している現象を初めて見出している。微分コンダクタンス特性上には、周期的な電圧値で微分コンダクタンスピーク構造が観測されるが、このような特徴はジョセフソン接合に高周波を照射したときに現れるシャピロステップと呼ばれる高周波誘起電流ステップと同様な構造である事がわかる。ジョセフソンの関係式から、固有ジョセフソン素子に影響を与えている高周波成分の周波数を求めたところ、その周波数はジョセフソンプラズマ周波数と良く一致する結果が得られた。さらに、温度依存性・磁場依存性を調べたところ、光学的に検証されたジョセフソンプラズマのそれぞれの振る舞いと良く一致することが明らかとなった。これらの現象は、ブリッジ部分の LSCO 固有ジョセフソン素子が準粒子注入型励振器として働き、LSCO 単結晶内にジョセフソンプラズマ波を励振した事によって発現したと考える事でよく説明できる。これらの結果は、LSCO 固有ジョセフソン素子がプラズマ励振素子として有用である事を実証したものであり、大きな成果である。

第6章は、総括である。本研究の成果を章ごとにまとめている。

最後の付録では、本研究で目的としたジョセフソンプラズマ励振の手法として、研究当初考案した人工型ジョセフソン素子(金属超電導体 Nb と LSCO 間のジョセフソン素子)に関する研究成果、及びメサ型と呼ばれる突起型の固有ジョセフソン素子の特徴についてまとめている。メサ型の固有ジョセフソン素子では、マイクロブリッジ型では観測されなかった個々の接合の存在に由来する準粒子枝構造(ブランチ)が出現しており、マイクロブリッジ型素子の特性を理解する一助となることが期待される。

以上まとめると本論文は、銅酸化物超電導体におけるジョセフソンプラズマ振動の励振手段として、LSCO の固有ジョセフソン素子を使う手法の有用性を提案し、実際にサブミリ波帯ジョセフソンプラズマ振動の励振を実現して、サブミリ波発振源への応用の可能性を確認したものである。

論文審査結果の要旨

銅酸化物超電導体には、ジョセフソンプラズマ振動という特異な電荷振動現象が存在する。本研究で用いた銅酸化物超電導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (LSCO)の場合、ジョセフソンプラズマ振動の周波数は、数百ギガヘルツ(GHz: 10^9Hz)から数テラヘルツ(THz: 10^{12}Hz)に達する。このプラズマ振動を電磁波に変換することができれば、銅酸化物超電導体を心臓部に用いた小型で高出力なサブミリ波源が実現できると期待される。本論文は、ジョセフソンプラズマ振動を効率よく励振する新しい手段を提案し、それを実験的に検証した結果を述べたもので、全編6章よりなる。

第1章では、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、これまでに示されていたジョセフソンプラズマ励振に関する実験事実と理論を詳細に検討した結果から、LSCO 単結晶自身で構成される固有ジョセフソン素子を使ったプラズマ励振の可能性とその有用性について述べている。

第3章では、集束イオンビームを用いたLSCO 固有ジョセフソン素子の作製方法を示し、第4章では作製された素子の特性を積層トンネル型ジョセフソン接合が集団的に零電圧状態から有限電圧状態に遷移した結果として説明している。また、この特性が、LSCO 単結晶内に存在する固有ジョセフソン接合同士の強い位相ロック現象を反映しており、単色性の高い発振に適した特性であることを示唆している。これは新しい知見である。

第5章では、LSCO 固有ジョセフソン素子の特性をさらに詳しく解析した結果からプラズマ励振が実現している事を明示する実験結果を初めて見出している。これは、固有ジョセフソン素子がプラズマ励振素子として有用である事を実証したものであり、大きな成果である。

第6章は、総括である。

以上要するに本論文は、銅酸化物超電導体におけるジョセフソンプラズマ振動の励起の手段として、LSCO を使った固有ジョセフソン素子を利用する事を提案し、実際にサブミリ波帯ジョセフソンプラズマ振動の励起を実現して、サブミリ波源への応用の可能性を確認したものであり、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。