

平成 21年 5月 25日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007年度－2008年度

課題番号：19560011

研究課題名 (和文) ナノスタック超伝導接合系における集団電荷励起の研究

研究課題名 (英文) Study of collective charge excitations in nano-stack of Intrinsic Josephson junctions

研究代表者

北野 晴久 (KITANO HARUHISA)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：00313164

研究成果の概要：超伝導体と絶縁体がナノスケールで交互に積み重なった構造（ナノスタック超伝導接合）を持つ高温超伝導体の固有ジョセフソン接合における複雑な位相ダイナミクスを解明するために、Bi系及びLa系高温超伝導体のナノスタック接合素子を作製する技術を開発した。この二つの物質系で大きく異なる接合間相互作用の違いがナノスタック接合素子の位相ダイナミクスに強く影響することを見出した。さらに、接合間相互作用効果の検証にスイッチング電流分布測定が有効なことを見出した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：超伝導材料素子、ナノ材料、量子コンピューター、高温超伝導、ジョセフソン効果

1. 研究開始当初の背景

(1) ジョセフソンプラズマ共鳴 (JPR)

高温超伝導体における JPR は 1992 年に発見され、従来超伝導体のジョセフソン接合に比べて共鳴周波数が一桁以上大きいことが分かった。ジョセフソン接合の力学モデルでは、このプラズマ振動はポテンシャル井戸周辺の固有振動に対応し、超伝導量子ビット実現に必要な巨視的量子状態は、この固有振動の温度スケールよりも低温で実現することが期待される。

(2) 巨視的量子トンネル (MQT)

高温超伝導体の高い JPR 周波数は巨視的量子状態をより高温まで保持できる優位性を示唆し新たな量子ビット候補として注目された。2005 年に約 1 ミクロン四方に微細加工された Bi 系高温超伝導体のナノスタック超伝導接合における MQT 現象が観測され、この優位性が実証されて以来、理論と実験の両面から研究が活発化している。

(3) 接合間相互作用効果

本研究代表者は 2003 年より Bi 系高温超

伝導体における MQT 観測を目指し、スイッチング電流分布測定を行ってきた(科学技術振興機構さきがけ研究「量子と情報」領域、2003 年度-2006 年度)。その結果、①ジョセフソン侵入長が非常に小さい、②ジョセフソン接合間の相互作用が強い、という 2 つの特徴が重要なことを見出した。特に後者の特徴は従来のジョセフソン接合系にはない新しい特徴であり、今後、その理解が益々重要になることが予想された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ナノスタック超伝導接合を有する高温超伝導体の固有ジョセフソン接合系の複雑な位相ダイナミクスを解明し、高温超伝導体を将来の量子情報処理技術に用いる量子ビットとして役立てるための基礎研究を行うことである。特に、ジョセフソン接合における集団的電荷励起で、かつ巨視的量子状態を支配する重要なパラメータである JPR 振動に着目し、微細加工されたナノスタック超伝導接合における JPR を実験的に研究し、接合間相互作用効果の解明に具体的メスを入れることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 微小ナノスタック超伝導接合の作製

集束化イオンビーム(FIB)を用いて高温超伝導体単結晶を微細加工し、微小なナノスタック超伝導接合を作製する技術を開発する。作製するナノスタック接合には、すでに MQT 測定の実績のある Bi 系高温超伝導体に加え、より強い接合間相互作用効果が期待される La 系高温超伝導体も候補に含める。

(2) JPR 観測装置の開発

試料にマイクロ波を照射した際のマイクロ波吸収を周波数の関数として測定する装置を作製し、JPR 観測を行う。特に、金属探針の先端に交流電場が集中する効果を活用し、ナノスタック超伝導接合部分からの JPR 観測を目指す。

(3) スwitching電流分布測定による位相ダイナミクスの解明

すでに稼働中のスイッチング電流分布測定装置を用い、ナノスタック超伝導接合に対する電流-電圧特性やスイッチング電流分布特性を調べ、接合サイズとジョセフソン侵入長の大小関係に応じた位相ダイナミクスの変化を解析する。特に、接合間相互作用の強さがスイッチング電流分布にどのような影響を及ぼすかを調べ、ナノスタック超伝導接合系における位相ダイナミクスの完全解明を目指す。

4. 研究成果

(1) FIB によるナノスタック接合の作製

青山学院大学理工学部附置の機器分析センター内に設置された集束化イオンビーム(FIB)装置を用いて、Bi 系高温超伝導体単結晶を S 字形状(図 1 参照)に微細加工し、ナノスタック超伝導接合を作製することに成功した(図 2 参照)。次にナノスタック接合部のサイズ効果の検証に向けて、接合サイズを $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ から $1 \times 6 \mu\text{m}^2$ まで系統的に変えた素子を作製した。さらに、La 系高温超伝導体にも同様な手法を適用し $0.6 \times 1 \mu\text{m}^2$ の接合サイズを持つナノスタック超伝導接合の作製に成功した。



図 1

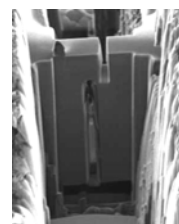


図 2

これにより、FIB がナノスタック超伝導接合の作製に非常に有効なことが確立した。現在、FIB によるナノスタック超伝導接合の作製に関しては、我々を含む日本国内の数グループ(青学、物材研究機構、産総研など)が世界をリードする状況にある。今後、銅酸化物超伝導体以外の様々な層状超伝導物質に対しても FIB によるナノスタック超伝導接合の作製が活発化していく可能性が高い。

同時に、以下に挙げる FIB 法の課題も明らかになった。

- ① $0.1 \mu\text{m}$ 以下の接合サイズは困難。
- ② 10 層以下の接合数制御が困難。
- ③ FIB に用いるガリウムイオンの残留が素子特性に影響を及ぼす。

上記①の改善は容易ではないが、上記②については、今後、接合数制御に優れたメサ形状のナノスタック接合作製に着手する予定である。また、上記③については FIB 加工面の電子顕微鏡観察や表面組成分析を通じて、素子特性と残留イオンの関連を検証すると共に、イオンミリング装置などによる残留イオン除去も試みる予定である。

(2) JPR 観測装置の開発

ボロメトリック検出法によるマイクロ波吸収測定から、ナノスタック超伝導接合の集団的電荷励起であるジョセフソンプラズマ共鳴(JPR)の直接観測を目指したが、現在の照射方法では微小ナノスタック部からの JPR とバルク結晶部からの JPR を区別するのは非常に困難であることが判明した。今後、金属探針部の設計を電磁界解析などを利用

してやり直し、さらなる高感度化を図る必要がある。

(3) スwitching電流分布測定による位相ダイナミクスの解明

①接合サイズ効果の検証

固有ジョセフソン接合系ではジョセフソン侵入長が非常に小さくなる特徴があり、FIBによる微細加工を用いてもジョセフソン侵入長より十分小さい接合サイズ（スモール接合）を得るのは難しい。物理的には接合サイズがジョセフソン侵入長よりも大きい場合（ラージ接合）、位相ダイナミクスがより複雑になることが知られている。

一般に、JPR周波数の高い物質ほどジョセフソン侵入長は小さくなるため、より高温までMQT状態を維持するような物質ほどラージ接合になりやすい。従来のMQT理論はスモール接合を前提にしており、複雑な位相ダイナミクスを示すラージ接合におけるMQT現象はまだ十分に理解されていない。

このため、FIBで作製されたナノスタック接合におけるswitching電流分布のサイズ効果を検証した。その結果、MQT状態よりも高温側の古典的熱活性領域において、特徴的エネルギースケールが接合サイズと共に系統的に変化することを見出した。また、この振舞いを定量的に説明するモデルとして、ジョセフソン磁束量子を古典的な紐と見なすモデルが適切であることが示唆された。

このようなサイズ効果の定量的検証はまだほとんど報告されておらず、ラージ接合系の複雑な位相ダイナミクスを解明する上で、重要な知見を与えるものと期待される。今後は、測定温度領域をさらに低温まで拡大し、MQT状態への交差温度の決定とMQT状態での位相ダイナミクスの解明を試みる予定である。

②接合間相互作用効果の検証

Bi系高温超伝導体に比べてLa系高温超伝導体は、結晶構造の違いに起因して接合間相互作用効果がより強くなるものと期待される。(2)で述べたようにJPRの直接観測による接合間相互作用効果の検証は非常に困難なことが判明したが、本研究によりナノスタック接合のswitching電流分布測定からも接合間相互作用効果が検証できることが見出された。

Bi系ナノスタック接合とLa系ナノスタック接合に対して、switching電流分布測定を行い(図3及び図4参照)、その分散値の温度依存性を調べたところ、両者とも従来の単一接合モデルで予想されるMQT状態での分散値よりも大きい分散値を示すことが分かった。特に、La系ナノスタック接合の方が

従来モデルとの差異が大きいことから、現時点でこの振舞いを説明する最も有力な候補として、従来の単一接合モデルでは考慮されていなかった接合間相互作用の効果が強く示唆された。

接合間相互作用の効果は、固有ジョセフソン接合系の大きな特徴であり、このような振舞いを実験的に見出した意義は非常に大きいと考えられる。今後、この振舞いの定量化を詳細に調べることにより、接合間相互作用効果が位相ダイナミクスに果たす役割を解明していく予定である。

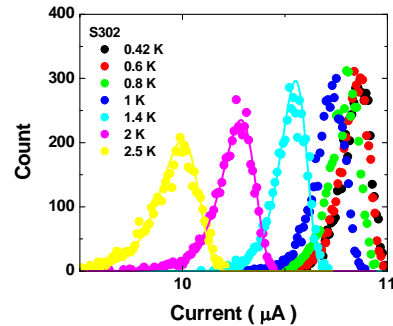


図 3

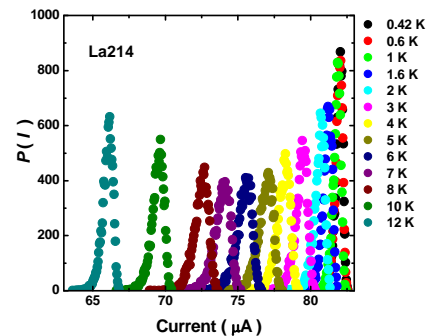


図 4

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7件)

1. “Comparative study of macroscopic quantum tunneling in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic Josephson junctions with different device structures,” K. Ota, K. Hamada, R. Takemura, M. Ohmaki, T. Machi, K. Tanabe, M. Suzuki, A. Maeda, and H. Kitano, Phys. Rev. B, **79**, 134505 (2009). 査読有
2. “Macroscopic quantum tunneling and thermal activation in a small mesa structured $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic Josephson junctions,” H. Kitano, K.

- Ota, K. Hamada, R. Takemura, M. Ohmaki, A. Maeda, and M. Suzuki, *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 052110 (2009). 査読有
3. “Comparison between the first- and the second-junction switchings in a small stack of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic Josephson junctions,” K. Ota, A. Maeda, T. Machi, K. Tanabe and H. Kitano, *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 052205 (2009). 査読有
 4. “Broadband method for precise microwave spectroscopy of superconducting thin films near the critical temperature”, H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda, *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 074701 (2008). 査読有
 5. “Critical fluctuations and phase diagram of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films”, H. Kitano, T. Ohashi, A. Maeda, and I. Tsukada, *Physica C* **468**, 1120 (2008). 査読有
 6. “Study of switching events from the zero-voltage state of $\text{Bi}2212$ intrinsic Josephson junctions”, H. Kitano, K. Ota, A. Maeda, *Supercond. Sci. Technol.* **20**, S68 (2007). 査読有
 7. “Switching current distribution in large $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic Josephson junctions”, H. Kitano, K. Ota, and A. Maeda, *Physica C* **460-462**, 1483 (2007). 査読有

[学会発表] (計 8件)

1. 北野晴久 他, “ $\text{La}214$ 系固有ジョセフソン接合におけるスイッチング電流分布”, 第56回応用物理学関係連合講演会, 2009年4月2日, 筑波大学
2. 北野晴久 他, “ $\text{Bi}2212$ 系および $\text{La}214$ 系固有ジョセフソン接合におけるMQT挙動と接合間相互作用”, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月27日, 立教大学
3. 北野晴久 他, “ $\text{Bi}2212$ 微小固有ジョセフソン接合のスイッチング特性におけるサイズ効果”, 日本物理学会 2008年秋季大会, 2008年9月22日, 岩手大学
4. 太田健介 他, “固有ジョセフソン接合における接合間の相互作用効果”, 日本物理学会 2008年秋季大会, 2008年9月22日, 岩手大学
5. H. Kitano et al. “Macroscopic quantum tunneling and thermal activation in a small mesa structured $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic Josephson junctions”, 25th International Conference on Low Temperature Physics, 2008年8月8日,

Amsterdam

6. K. Ota et al., “Comparison between the first- and the second-junction switchings in a small stack of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic Josephson junctions”, 25th International Conference on Low Temperature Physics, 2008年8月8日, Amsterdam
7. 太田健介 他, “ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有接合におけるスイッチング電流分布とMQT”, 日本物理学会, 2008年3月24日, 近畿大学
8. 太田健介 他, “ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 固有ジョセフソン接合における電流電圧特性とスイッチング分布”, 日本物理学会 2007年9月21日, 北海道大学

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-kitano/o/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野 晴久 (KITANO HARUHISA)
青山学院大学・理工学部・准教授
研究者番号：00313164

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者