

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560020

研究課題名（和文） 超伝導多重接合系の接合間相互作用による新しい巨視的量子効果の研究

研究課題名（英文） Novel macroscopic quantum effects due to interactions between 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（和文）：超伝導層と絶縁層が原子スケールで交互に積み重なった構造を持つ超伝導多重接合系は、将来の量子情報技術の基本素子として注目される。本研究では、この系の特徴である接合間相互作用が量子ビット操作の基本となる巨視的量子現象に及ぼす影響を様々な角度から探求した。微小接合素子のマイクロ波照射実験から離散化量子準位形成の温度変化を初めて捉え、量子準位の形成温度が接合形状に強く依存する振舞いを発見した。さらに、接合間相互作用の効果解明につながる少数接合素子の作製に成功した。

研究成果の概要（英文）：Intrinsic Josephson junction (IJJ) systems, where the superconducting layer and the insulating layer are stacked in an atomic scale, is extensively attracted as a possible candidate of future quantum information processing technology. In this study, we investigate the interlayer coupling effects, which are essentially important for the IJJ systems, to fundamental phenomena of quantum bits operation, such as an energy level quantization (ELQ) in macroscopic quantum tunneling (MQT) state. We observed that the separation of the switching current probability distribution attributed to ELQ under microwave irradiation is varied with increasing temperatures. We also found that a crossover temperature to MQT regime is strongly dependent on the junction geometry of IJJs. Finally, we succeeded in fabricating an IJJ device with small junction numbers below 10 junctions, which is quite useful for the understanding of the interlayer coupling effects.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：超伝導体、量子情報、ナノ材料、高温超伝導、ジョセフソン効果

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者は、銅酸化物高温超伝導体な

どの層状超伝導体の特徴である、超伝導層と絶縁層が原子スケールで交互に積み重なっ

た構造(以下、超伝導多重接合系)に着目し、この系における巨視的量子トンネル(以下、MQT)状態の観測実験に着手し(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)、微小な多重接合素子の作製及びスイッチング電流分布特性(以下、P(I)特性)の測定環境を整備してきた。2007年度に研究拠点を東京大学から青山学院大学に移した後、Bi系高温超伝導体の超伝導多重接合系においてMQT状態や離散化量子準位(以下、ELQ)の観測に成功した。当時の研究成果を要約すると、(1)超伝導多重接合系では従来の単一接合モデルには含まれない接合間の相互作用効果が重要であること、(2)強い接合間相互作用によりMQT状態がより高温まで持続すると予想される超伝導多重接合系ではジョセフソン侵入長(以下、 λ_J)も非常に小さくなるため、ラージ接合系の複雑なP(I)特性の解明が重要であること、が判明した。さらに、超伝導多重接合系の接合間相互作用をジョセフソンプラズマ共鳴(以下、JPR)から調べる研究(科研費基盤研究(C)19560011)から、(3)ポロメーター法を用いた微小接合部からのJPR観測よりもマイクロ波照射下のP(I)測定の方が、接合間相互作用効果の検証に有効なことが判明した。以上の知見をもとに本研究を着想するに至った。

国内外の研究動向について整理すると、銅酸化物高温超伝導体の固有ジョセフソン接合における多重ブランチ特性の発見(R. Kleiner et al. Phys. Rev. Lett. 68 (1992) 2394)以来、ジョセフソン磁束のダイナミクスを中心に研究されてきた超伝導多重接合系において、2005年に従来のジョセフソン接合よりも約一桁高い温度(絶対温度約1K)までMQT状態が維持されることが判明し(K. Inomata et al. Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 107005)、将来の量子情報処理に向けた新たな量子ビット候補として超伝導多重接合系の巨視的量子状態に関する研究が急速に進展した。我々のグループを含む複数の研究グループの研究成果を総合すると(例えば、K. Ota, et al, Phys. Rev. B 79 (2009) 134505)、1番目の接合のみ電圧状態に遷移するスイッチング過程(以下、第1スイッチング事象)のMQT状態については従来の単一接合モデルで定性的に説明されることが確立したが、2番目の接合が電圧状態に遷移するスイッチング過程(以下、第2スイッチング事象)や、数十個の接合がほとんど同時に電圧状態へ遷移するスイッチング過程(X. Y. Jin et al. Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 177003)については未解明のままであった。

2. 研究の目的

本研究では、接合間相互作用効果がMQT

やELQの形成など巨視的量子状態に及ぼす影響を様々な角度から探求し、上述した未解決問題の解明と将来の量子ビット実現に向けた基盤技術開発を推進しようとするものである。具体的には、超伝導多重接合系の電流電圧特性やP(I)特性を多角的に調べることにより、この系の特徴である接合間の相互作用効果が巨視的量子状態に及ぼす影響を探求した。さらに、超伝導多重接合系を将来の量子情報処理に応用するための基盤測定技術の開発も目指した。

3. 研究の方法

(1) P(I)特性における接合形状効果

超伝導多重接合系として研究実績のある $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (以下、BSCCO)高温超伝導体単結晶を用い、集束化イオンビーム(以下、FIB)加工により作製した微小な超伝導多重接合素子の接合形状を系統的に変えながら、P(I)特性を極低温まで測定し、MQT状態への交差温度などの接合形状効果を探求する。

(2) MQT状態でのマイクロ波照射効果

マイクロ波照射実験を極低温領域を含む複数の温度領域で実施し、P(I)特性に現れるELQについて探求する。

(3) 物質系による接合間相互作用の違い

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ (以下、LSCO)系超伝導多重接合は、結晶構造からBSCCO系よりも強い接合間相互作用が期待される。この検証に向けて、LSCO系超伝導多重接合素子を作製し、系統的なP(I)特性やマイクロ波照射効果を調べる。

(4) 接合数の制御と接合間相互作用

FIB法を用いてBSCCO高温超伝導体単結晶の微細加工から作製される超伝導多重接合素子における接合数の制御方法を研究し、各接合のP(I)特性から接合間相互作用の効果を検証する。

(5) 微細加工方法の再検討

これまで用いてきたFIB加工における残留Gaイオンによる超伝導特性の劣化、および電流電圧特性やP(I)特性に与える影響を検証するために、透過電子顕微鏡を用いて多重接合部の観察を試みると共に超伝導多重接合素子の微細加工方法を再検討する。

4. 研究成果

(1) P(I)特性における接合形状効果

まず、図1に示すような接合部分の形状が異なる3種類の素子($L_1 > L_2$, $L_1 < L_2$, $L_1 \sim L_2$)を作製し、極低温～低温領域(絶対温度約0.5K～約10K)でP(I)特性を測定し、MQT領域への交差温度およびP(I)特性などが接合形状に強く依存して変化することを発見した。超伝導多重接合系の巨視的量子状態が接合形状に強く依存する振舞いについては、国内外を通じて本研究が最初であるが、従来

超伝導を用いた単一超伝導接合系の過去の研究成果を調査したところ、接合部を流れる超伝導電流密度の空間分布が接合形状や接合サイズに依存して変化する振舞いが報告されており、本研究成果も定性的にはこの振舞いに起因するものと考えられる。

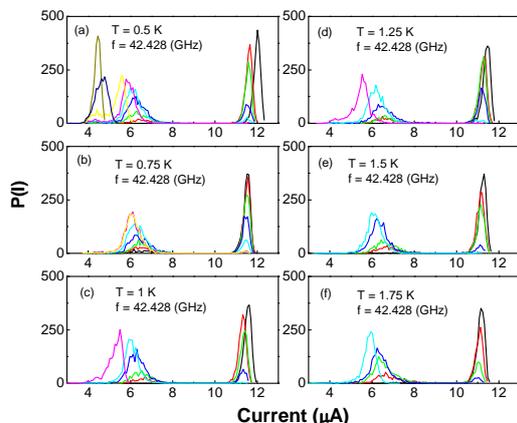
超伝導多重接合系では、接合サイズに比べて λ_J が短くなるラージ接合系の位相ダイナミクス解明が重要と考えられてきたが、本研究成果は、今後ラージ接合系の複雑なスイッチング電流分布特性の解明に重要な役割を果たす重要な知見と位置づけられる。



図1 作製した超伝導多重接合素子

(2) MQT 状態でのマイクロ波照射効果

BSCCO 系超伝導多重接合において、極低温領域（絶対温度約 0.5 K）でマイクロ波を照射しながら P(I)特性を測定し、ELQ の形成を強く示唆する実験結果を得た。すなわち、基底状態から単一光子過程または多光子過程で励起された第一励起状態からの MQT に起因する P(I)特性の観測に成功した。さらに、マイクロ波非照射のスイッチング電流測定から示唆される MQT 状態への交差温度（絶対温度約 1 K）よりも少し高い温度領域（絶対温度約 4 K）まで ELQ が観測されるという実験結果を得た（図2参照）。この MQT 交差温度前後における ELQ 形成の温度変化は国内外の他の研究グループに先駆けた実験結果であり、今後の研究展開が注目されるインパクトの高い研究成果と言える。



(3) 物質系による接合間相互作用の違い

LSCO 系超伝導多重接合に対して P(I)特性を測定し、絶対温度約 1 K 以下で MQT 領域

への移行を示唆する実験結果を得た。しかしながら、65GHz までのマイクロ波照射実験では ELQ の形成は確認されなかった。LSCO 系超伝導多重接合に対する P(I)特性に関しては、独立行政法人物質・材料研究機構の高野グループ（Y. Kubo et al., J. Phys. Conference Series 150 (2009) 052132）からも報告があるが、マイクロ波照射実験も含めた報告は本研究成果が最初である。現在、ELQ 形成の確認に向けて、照射マイクロ波周波数を 90GHz まで広げる実験準備を進めている。

(4) 接合数の制御と接合間相互作用

これまでは接合数が数百個以上の超伝導多重接合素子しか作製できなかったが、FIB 加工時の諸条件を再検討することにより、良好な電流電圧特性を示し、かつ接合数が 10 個程度の超伝導多重接合素子の作製に成功した（図3参照）。この超伝導多重接合素子における接合間相互作用の効果を知るため、第1スイッチング事象から第4スイッチング事象までの P(I)特性を低温領域（絶対温度 4 K~40 K）で測定した。少数接合の超伝導多重素子による高次側スイッチング事象の系統的研究は、国内外を通じてこれが最初である。現在、P(I)特性が従来の単一接合モデルでどこまで説明可能かを詳細に解析中である。今後、測定温度領域を極低温領域の MQT 状態まで拡充し、マイクロ波照射下の P(I)特性なども測定することにより、未解明の接合間相互作用効果についてさらに知見を深められる可能性が高い。

さらに、本研究で培った測定技術を応用して自己発熱効果を抑えるための短パルス法による電流電圧特性の測定にも取り組み、少数接合の超伝導多重接合素子において、全接合の超伝導が破れた超伝導ギャップ領域を含む完全な電流電圧特性の測定にも成功した。

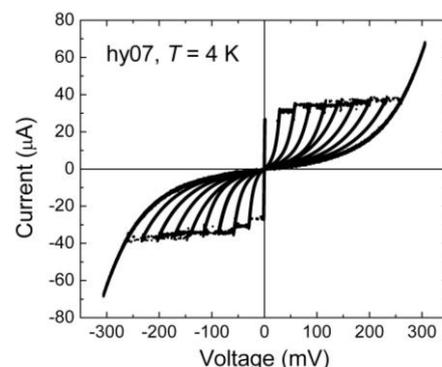


図3 接合数9の超伝導多重接合素子の電流電圧特性

(5) 微細加工方法の再検討

FIB加工による残留 Ga イオンの影響を検証するために、透過電子顕微鏡による多重接合部の観察を試みた。しかしながら、原子像レベルの透過電子顕微鏡観察に耐え得る薄片化試料の作製は予想以上に困難なことが判明し、透過電子顕微鏡による接合部観察には成功したが原子像観察には至らなかった。引き続き、良質な薄片化試料作製技術の蓄積が必要であると考えられる。

次に残留 Ga イオンによる超伝導特性の劣化を低減するため、超伝導多重接合素子の作製プロセスに Ar イオンによるミリング加工を導入する実験を行った。Ar イオンミリング時のマスク材料としてメタルマスクが有効であることを見出し、超伝導多重素子のブリッジ部加工に Ar イオンミリングを用いることにより、素子作製時間の大幅な短縮が図れることを見出した。現在、ブリッジ部加工用のメタルマスクを準備中であり、今後、新作製プロセスによる超伝導多重接合素子の作製を行い、残留 Ga イオンの影響を定量的に調べていく予定である。

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 2 件)

1. "Effects of junction geometry in crossover temperature to macroscopic quantum tunneling regime of intrinsic Josephson junctions", H. Kitano, K. Ishikawa, S. Takekoshi, K. Ota, A. Maeda, *Physica C: Superconductivity*, 471, 1210-1213 (2011). 査読有
doi:10.1016/j.physc.2011.05.161

2. "Switching-current distribution in underdoped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ intrinsic Josephson junctions", H. Kitano, K. Ota, K. Ishikawa, M. Itoi, Y. Imai, A. Maeda, *Physica C: Superconductivity*, 470, S838-S839 (2010). 査読有
doi:10.1016/j.physc.2009.10.103

[学会発表] (計 5 件)

1. H. Kitano et al., "Effects of Junction Geometry in Crossover Temperature to Macroscopic Quantum Tunneling Regime of Intrinsic Josephson Junctions", 23rd International Symposium on Superconductivity (2010.11.3), EPOCAL TSUKUBA (Japan)

2. 北野晴久 他, "Bi2212 微小固有ジョセフソン接合における long 接合効果と MQT", 日本物理学会第 65 回年次大会 (2010.3.20), 岡山大学

3. 北野晴久 他, "Bi 系固有ジョセフソン接

合における接合形状とスイッチング特性", 第 57 回応用物学会関係連合講演会 (2010.3.18), 東海大学

4. 石川一樹 他, "Bi2212 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 2", 日本物理学会 2009 年秋季大会 (2009.9.27), 熊本大学

5. H. Kitano et al., "Switching-current distribution in underdoped $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ intrinsic Josephson junctions", 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-IX) (2009.9.11), Keio Plaza Hotel Tokyo (Japan).

[その他]

ホームページ等

<http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-kitano/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