

機関番号：82626

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21710100

研究課題名（和文）銅酸化物超伝導体の磁束量子ビットにおける量子コヒーレンスの研究

研究課題名（英文） Study on the quantum coherence in cuprate superconductor

研究代表者

柏谷 裕美（KASHIWAYA HIROMI）

独立行政法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・研究員

研究者番号：60443181

研究成果の概要（和文）：銅酸化物超伝導体を用いて作製される固有ジョセフソン接合は、高温で動作する量子ビットの候補として期待されている。本研究では Bi 系銅酸化物超伝導体の固有ジョセフソン接合の量子効果を解明するために、ジョセフソン接合間の電磁氣的相互作用が最も強い場合の接合列のスイッチングダイナミクスを研究した。従来知られている範囲では、単一のジョセフソン接合は一つの量子力学系を構成するが、量子力学系の多体効果については、対応する実験を行うことが難しく未解明であった。実際に固有接合を作成し極低温でのスイッチング動作を解析した結果、固有ジョセフソン接合中の複数の接合が同時にスイッチする multi-junction switching (MJS) 現象を発見した。これは、相互作用により複数の量子力学系が同時に動作することを示している。回路中の負荷抵抗の値で同時スイッチ数が制御出来る新奇スイッチ現象であることも判明し、将来的に多ビットを同時制御できる可能性を示唆している。

研究成果の概要（英文）：Intrinsic Josephson junction made of high-Tc superconductor is one of the most promising candidate for the qubit. In this study, an $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ IJJ array was used because this sample is a good example for investigating the many body problem in quantum mechanics. The experimental result of the IJJ array showed multi-junction switching (MJS): several intrinsic Josephson junctions (IJJs) in an array switch to the finite voltage state simultaneously. The number of multi-switching junction was successfully tuned by changing the load resistance serially connected to an $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ IJJ array.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：量子情報、超伝導物性

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、ナノ構造科学

キーワード：量子情報、量子ビット、銅酸化物超伝導体、固有ジョセフソン接合

1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータの最小構成要素である

量子ビットでは、0 または 1 といった古典的に確定した状態ではなく、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の量子力学的重ね合わせ状態を情報として保持す

るが、重ね合わせ状態のコヒーレンスは、外界との相互作用や外部ノイズが引き起こすデコヒーレンスのために破壊されてしまう。そのため、量子ビット中でいかに長いコヒーレンス状態を実現するかが重要な研究課題となっている。

これまで、半導体、イオントラップ、核磁気共鳴など様々な系で量子ビット実現に関する研究が行われてきた。その中で超伝導体を用いた量子ビットは、集積化が容易なこと、準粒子に有限のギャップを有するためにデコヒーレンスに対して強固であることから、量子ビットの有力な候補と考えられている。

超伝導量子ビットは、その基本構成要素として、二つの超伝導体を薄い絶縁膜で挟んだジョセフソン接合を利用する。現状最も研究が進んでいるのは **SQUID**(超伝導量子干渉素子)と呼ばれる超伝導ループを用いた磁束量子ビットである。これまで金属超伝導体を用いて研究が行われているが、銅酸化物超伝導体を使用することにより、量子効果が観測される温度が高くなり、金属超伝導体で問題となっている、素子中の絶縁膜中の不純物や欠陥による電荷揺らぎが抑制できる可能性が高い。なぜなら、銅酸化物超伝導体は、単結晶中に原子スケールの絶縁層が存在し、より欠陥が少ないと考えられるからである。

酸化物超伝導体の固有ジョセフソンを量子ビットとして使用する場合の特徴的なことは、ジョセフソン接合が原子1層や2層で隔てられていることである。単一のジョセフソン接合は一つの量子力学系をなすが、量子力学系の多体効果については未解明であり、固有ジョセフソン接合を用いて量子ダイナミクスの研究を行うことは量子ビットの実現のためにも必須の実験である。

2. 研究の目的

本研究は、主に3つの成果((1)~(3))に分けられる。

(1) 銅酸化物超伝導体の単結晶中には、超伝導を担う層および絶縁層が交互に存在し、これらの層を利用して作製されるジョセフソン接合は、固有ジョセフソン接合と呼ばれている。金属超伝導体など通常のジョセフソン接合と比較すると、固有ジョセフソン接合は結晶そのものを使用できるため格子欠陥や不純物が少ないが、固有ジョセフソン接合が原子数層を隔てて存在することになり、接合同士の相間が強くなることが予想される。

電流バイアスされたジョセフソン接合は、位相を自由度とする洗濯板型のポテンシャルの質点の運動と等価となる。位相量子ビットにおいては、この位相差の空間での量子二準位系を利用する。ゼロ電圧状態では、位相

差空間のポテンシャル中への閉じ込めが起こった状態であり、引加電流を増加させることにより閉じ込めポテンシャルの高さが低くなり、質点がポテンシャルの山を越え運動状態、つまり有限電圧状態にスイッチする。クロスオーバー温度 (T^*) と呼ばれる温度以上では、このプロセスは熱活性 (TA) に支配されるが、 T^* 以下では巨視的量子トンネル現象が支配的となる。固有ジョセフソン接合のスイッチングに関しては、これまで一番小さい I_c をもつ接合のスイッチである **single Josephson switching (SJS)** と、**SJS** の後に引き続いて起こる高次のスイッチ、接合内の全ての接合の同時スイッチである **uniform junction switching (UJS)** が観測されてきた。本研究では、スイッチング現象の相関を詳細に研究するため、ジョセフソン接合が原子一層離れた結晶である $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ (**Bi2201**) を用い、詳細な測定を行った

(2) 磁束量子ビットの実現のためには、量子ビットの読み出しに (量子ビットとは別の) **SQUID** を用いて、信号を検出する必要がある。現段階では、金属超伝導体の **SQUID** の使用を検討しており、**SQUID** のデバイス部分は FIB 装置により加工を行っている。FIB 装置は Ga^+ イオンが注入されることにより **SQUID** が劣化するため、加工による劣化する距離を明らかにするべく実験を行った。

(3) 2008 年に新しく発見された鉄系超伝導体は、銅酸化物超伝導体と同様の層状構造を有する。そのため、固有ジョセフソン接合として機能する場合には、量子ビットの候補となりえる。本研究では、 $\text{PrFeAsO}_{0.7}$ を用いて c 軸の電気伝導のみ有する素子を作製し、電気伝導の異方性を測定した。

3. 研究の方法

(1) 本研究で作製された固有ジョセフソン接合は、**FZ** 法で作製された単結晶を $1\text{mm} \times 50\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 程度の微細片にカットされた後、基板に接着剤を用いて接着後、4 端子の電極が蒸着される。その後、FIB (収束イオンビーム) 装置により微細片が基板上部および断面より加工されることにより、結晶の c 軸のみの伝導になるよう固有ジョセフソン接合が作製される。

固有ジョセフソン接合は希釈冷凍機中で温度を 4.2K から 50mK 程度まで変化させながら、電圧状態へ転移するスイッチング電流値を 10000 回程度測定し、分布を得る。

(2) 本研究では、Nb 膜のみ、および Nb の上に Au を成膜した Nb/Au 膜の二種類を用い **SQUID** を作製し特性を測定した。

基板は Si を使い、Nb,Au はスパッタ装置により成膜され、その後フォトリソグラフィーにより $10\mu\text{m}$ 程度の幅のパターンを作製する。その後 FIB 加工により、SQUID の形状に加工を行った。

図 1 に、作製された SQUID の SIM 像を示す。典型的な SQUID は、ループ径 (a) $1\mu\text{m}$ 、ループ幅 (b) $0.5\mu\text{m}$ 、であり、弱結合幅 (W) は 60nm から 500nm の範囲で作製した。

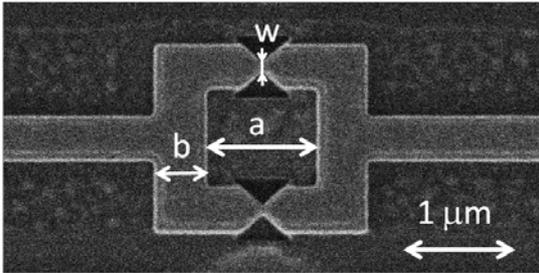


図 1 作製した SQUID の SIM 像

(3) $\text{PrFeAsO}_{0.7}$ を用いた素子は、基本的には銅酸化物超伝導体と同様のプロセスで作製を行った。結晶は $10\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ の細片にカットされた後、基板にのりづけされ、その後 FIB 装置により、まずはサンプル上部から幅を狭く加工した乗り、二本のスリットを入れることにより、c 軸のみの伝導が生じるような構造を作製した。

4. 研究成果

(1) 固有ジョセフソン接合の電流-電圧特性を図 1 に示す。二つの特性は同一のサンプルで得られたものであるが、測定回路中の固有ジョセフソン接合と直列に接続した負荷抵抗値 (R_L) が異なる。 $R_L=300\Omega$ の場合には、個々の接合が順次有限電圧に転移する SJS が起きているが、 $R_L=1\text{k}\Omega$ の場合には、二個の状態が、中間状態を介さずに同時にスイッチしており、我々はこれを multi-junction switching (MJS) と名付けた。が起きている。同時にスイッチする個数 N は、測定回路中の負荷抵抗により制御可能であることが判明した。

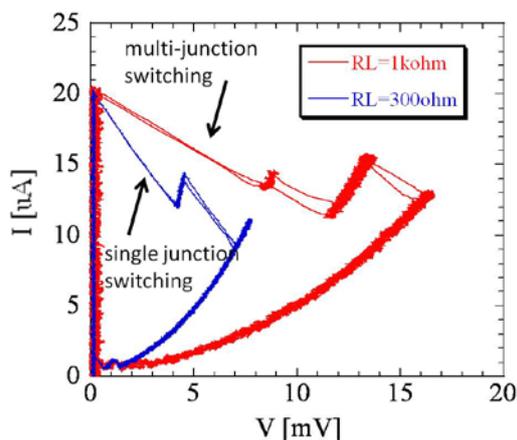


図 2 固有ジョセフソン接合の電流-電圧特性 ($T=40\text{mK}$)

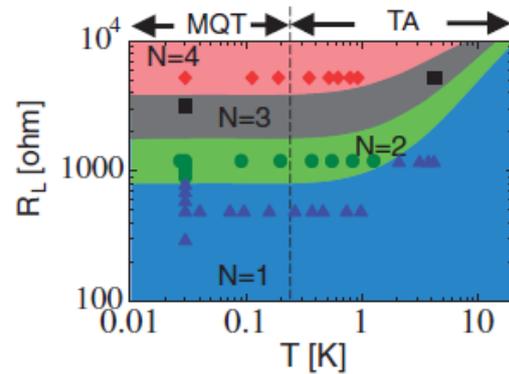


図 3 MJS を起こす接合数 N の温度依存性

図 3 に、上記方法で得られる N の個数を、温度を変化させながら測定した結果を示す。この温度領域は、TA および MQT の両方のスイッチングが含まれている。同時スイッチする接合数 N は、温度の低下、および R_L の増大とともに大きくなり、TA および MQT の両方の領域で MJS が観測されることが明らかとなった。このダイナミクスの起源は、接合が非平衡効果により臨界電流が抑制されることを考慮し、 I - V 平面内の負荷曲線と I_c の大小関係により説明できることを明らかにした。また、過去に UJS で観測された escape rate の増大が観測されなかったことにより、UJS とは全く異なるダイナミクスであることも判明した。この現象を将来的に多ビットの同時読み出しに利用可能か、今後も研究を進めていく予定である。

(2) それぞれの弱結合幅で作製した SQUID は $T=4.2\text{K}$ において電流-電圧特性が測定され、 I_c の値が抽出される。測定結果を図 4 に示す。

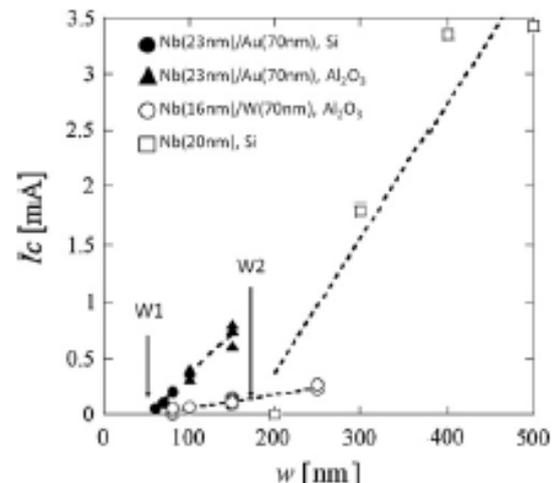


図4 I_c の弱結合部分の幅(W)依存性

図4の結果は、Nb単体の場合 $W=170\text{nm}$ でサンプルの超伝導性が失われるのに対し、Nb/Auの場合、 $W=60\text{nm}$ においても電流-電圧特性が測定可能であり、Nbの上部にAuを成膜することにより、FIB加工時の上部からの劣化が抑制できることが分かった。本研究の作製プロセスでは、 $W=55\text{nm}$ で超伝導性が失われると考えられるが、加工中の横からの Ga^+ イオンが左右両側から入ると考えると、片側からの劣化は約 27.5nm であると見積もられる。

(3)素子作製後のSIM像および、 c 軸方向の抵抗の温度依存性(ρ_c)および異方性(γ_p)を図5(a)に示す。比較のため、図(b)にはこれまでに測定された、Bi系銅酸化物の ρ_c および γ_p も示されている。 ρ_c および γ_p は、温度の低下とともに絶縁体的、また異方性の増大を示しており、これら二つの系が類似した電子状態を有することを示唆する。しかし、異方性の絶対値は、 $\text{PrFeAsO}_{0.7}$ では120程度であり、Bi系に示されるような値ではなかった。このことは、鉄系のブロック層は、絶縁体的なトンネル障壁として働くが、障壁の高さはBi系銅酸化物と比べると低いことを示唆する。

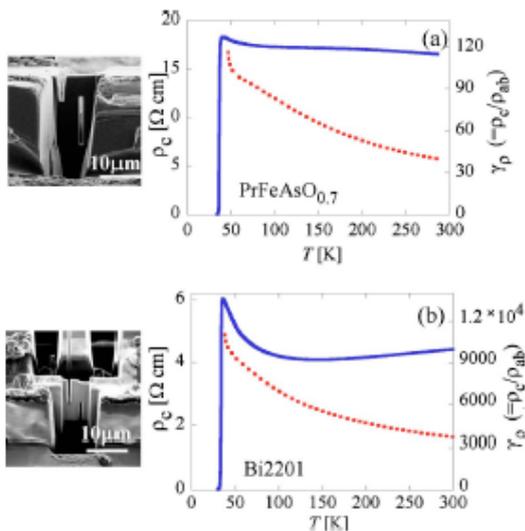


図5 $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ および $\text{PrFeAsO}_{0.7}$ の c 軸抵抗率 ρ_c 、異方性 γ_p の温度依存性

図6に、これらの接合の I_c の温度依存性および 4.2K で得られた電流-電圧特性を示す。鉄系、銅酸化物ともに臨界電流の温度依存性は、ジョセフソン接合の標準理論である Ambegaokar-Baratoff 表式と一致する特性を示す。

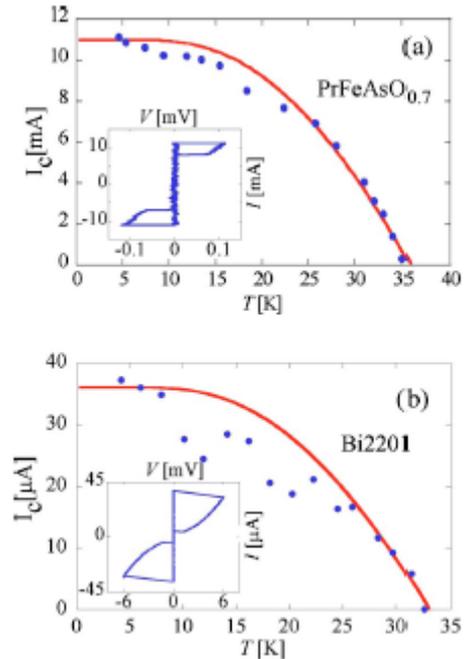


図6 $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ および $\text{PrFeAsO}_{0.7}$ の I_c の温度依存性および $T=4.2\text{K}$ で得られたサンプル

図6の結果は、鉄系超伝導体も固有ジョセフソン接合として動作する可能性が高いことを意味するが、量子ビットとして使用する場合の接合の性能指標である Q 値が Bi_{2201} が約 50 であるのに対し、 $\text{PrFeAsO}_{0.7}$ は 2 であり、今後ブロック層の障壁の高い系を探索することが望まれる。

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 3件)

- ① T. Matsumoto, H. Kashiwaya, H. Shibata, H. Takayanagi, S. Nomura, S. Kashiwaya, Fabrication of weak-link Nb-based nano-SQUIDS by FIB process, *physica C*, 2011 掲載確定
- ② H. Kashiwaya, K. Shirai, T. Matsumoto, H. Shibata, H. Kambara, M. Ishikado, H. Eisaki, A. Iyo, S. Shamoto, I. Kurosawa, c -axis critical current of a $\text{PrFeAsO}_{0.7}$ single crystal, *Appl. Phys. Lett.* 96, 2010, pp. 202504-1~3
- ③ H. Kashiwaya, T. Matsumoto, H. Shibata, H.

Eisaki, Y. Yoshida, H. Kambara, S. Kawabata, S. Kashiwaya, Multi-junction switching in $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ intrinsic Josephson junctions, Appl. Phys. Express, 3, 2010, pp.043101-1~3

〔学会発表〕（計 8 件）

① H. Kashiwaya, T. Matsumoto, H. Shibata, H. Eisaki, Y. Yoshida, S. Kawabata, Y. Tanaka, S. Kashiwaya, Switching Properties in $\text{Bi}_2\text{201}$ Intrinsic Josephson Junctions, 23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010), 2010 年 11 月 3 日、つくば国際会議場

② 柏谷裕美、松本哲朗、柴田肇、永崎洋、吉田良行、川畑史郎、田仲由喜夫、柏谷聡、 $\text{Bi}_2\text{201}$ 固有ジョセフソン接合のセカンドスイッチの特性、日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日、岡山大学

③ H. Kashiwaya, T. Matsumoto, H. Shibata, H. Eisaki, Y. Yoshida, S. Kawabata, Y. Tanaka, S. Kashiwaya, “*Strong Coupling Effect on MQT of $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ Intrinsic Josephson Junctions*”, 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-IX), 2009 年 9 月 8 日、京王プラザホテル（東京）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：固有ジョセフソン接合素子、及び、これを用いた量子ビット、超伝導量子干渉素子、テラヘルツ検出器、テラヘルツ発振器、電圧標準装置、ミリ波・サブミリ波受信機、並びに、固有ジョセフソン接合素子の製造方法

発明者：柏谷裕美、柏谷聡

権利者：

種類：特許

番号：特願 2010-105228

出願年月日：2010.4.30

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏谷 裕美 (KASHIWAYA HIROMI)

独立行政法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・研究員

研究者番号：6 0 4 4 3 1 8 1