

## 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 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21510137

研究課題名（和文） ジョセフソン磁束フロー現象の不揮発性記憶効果

研究課題名（英文） Flash Memory Effect in Intrinsic Josephson Junctions

研究代表者

羽多野 毅 (HATANO TAKESHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・超伝導物性ユニット・グループリーダー

研究者番号：50354337

研究成果の概要（和文）：

異方性  $\gamma$  を 35 程度と高くした Y-123 系高温超伝導体固有ジョセフソン接合で、CuO2 面を跨ぐ（パンケーキ磁束）と CuO2 面と平行のジョセフソン磁束を電流でスイッチさせることに成功し、しかもその磁束状態が電流を切っても保持されることから、不揮発性の記憶素子として使えることを提案した。さらに、Y-123 系高温超伝導体に加えて、Bi-2212 系においても、二つの磁束状態間を電流でスイッチさせることに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We have observed a flash memory behavior in highly anisotropic Y-123 ( $\gamma \sim 35$ ) IJJs under the near layer-parallel magnetic field. The basic concept for the memory operation is the current induced transition of flux-flow state in IJJs which can be readable by the flux-flow voltage with low current bias. By the transition, the flux-flow state can be (re)-programmed and this state "1" is proved to be non-volatile. The flux-flow state can be erased by applying the higher current and again this state "0" is kept even the current is turned off. All above operations can be understood by the hysteretic transition of vortex configurations, namely, the Josephson vortices with and without pancake vortices under near-layer-parallel magnetic field.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010 年度	300,000	90,000	390,000
2011 年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：固有ジョセフソン接合、ジョセフソン磁束、ロックイン現象、不揮発性記憶

## 1. 研究開始当初の背景

ビスマス系高温超伝導体は 1988 年に当研究機関において発見され、1992 年には日独で独立に固有ジョセフソン効果の発現が確認された。高温超伝導体の結晶構造に接合が膨大な数のアレイを形成していることから、数

を利してのテラヘルツ発振素子開発に期待がかかった。

すべての接合を同期発振させる必要性から、磁束量子、特に接合に平行に印加された磁界により形成される“ジョセフソン磁束”を利用する方法が提案され、ジョセフソン磁束が

接合電流によりローレンツ力を受けて接合面内を電磁波レベルの速度で運動（磁束フロー）する現象の研究が盛んになった。接合サイズ・バイアス電流・磁場強度・磁場と接合のなす角度・温度等々をパラメータとして我が国を中心に研究が進められた。特に磁場の角度を振って、フロー状態の ON/OFF が見いだされ、磁束量子の接合への Lock-in 現象として知られるようになった。

## 2. 研究の目的

Y 系高温超伝導体固有ジョセフソン接合で、磁束の二つの状態（ジョセフソン磁束フロー状態と磁束ピン止め状態）間の電流によるフリップ現象について測定を行うとともに、ミクロの発現機構の解明を進める。そのために、試料パラメータおよび電流—電圧特性の温度・磁界強度・磁界と接合のなす角度依存性等の発現条件の系統的な検討を行う。さらに、他の層状酸化物超伝導体 RE-123 系や Bi 系への適用を試み、電流による状態間遷移の条件範囲を系統的に探索し、機構解明にフィードバックする。これらの原理・機構を応用して不揮発性の書き込み・消去・読み出し技術を確立する。

## 3. 研究の方法

層状酸化物高温超伝導体 RE-123 単結晶に 3 次元微細加工して作成した固有ジョセフソン接合を用い、超伝導マグネット/精密試料回転機構付きクライオスタットにより、電流—電圧特性の温度・磁界強度・磁界と接合のなす角度依存性を評価し、電流による磁束状態書き換えの観測を行うとともに発現機構を解明する。また、固有ジョセフソン接合において、量子化磁束が発現する新たな現象を探索し、応用の萌芽を探る。さらに、ビスマス系やランタン系などの層状酸化物に探索範囲を拡げ、RE-123 と同様の電流による磁束状態書き換えおよびその物質のパラメータ特有の新現象の探索を行う。また、層状結晶の層に垂直方向に積層する多数のジョセフソン接合を個別に取り扱う手法の開拓に挑戦する。

## 4. 研究成果

異方性の高い高温超伝導体では、超伝導を担う  $\text{CuO}_2$  面と平行の磁場が磁束量子を形成する場合、磁束のコアが  $\text{CuO}_2$  面を横切ることがなければ、低散逸での運動が可能となる。この様な磁束量子はジョセフソン磁束と呼ばれ、接合バイアス電流によりローレンツ力を受けて面内を高速運動し、磁場  $B$  と面内運動速度  $v$  と面間隔  $s$  に比例した磁束フロー電圧  $V=Bvs$  が観測される。一方、磁束量子が  $\text{CuO}_2$  面を跨ぐと（パンケーキ磁束）、運動は大きく制約され電圧はほぼゼロとなる。

我々は異方性  $\gamma$  を 35 程度と高くした Y-123 系高温超伝導体固有ジョセフソン接合で、この二つの磁束状態間を電流でスイッチさせることに成功し、しかもその磁束状態が電流を切っても保持されることから、不揮発性の記憶素子として使えることを明らかにした。さらに、Y-123 系高温超伝導体に加えて、Bi-2212 系においても、二つの磁束状態間を電流でスイッチさせることに成功した。

Bi-2212 系試料はテラヘルツ発振現象で注目を集めていることから、平行磁場条件下での発振にはジョセフソン磁束状態を維持することが必須である。従って、磁束状態電流スイッチ現象のメカニズムを解明することは、発振条件の確立に欠かせないばかりか、磁場を変えずに ON/OFF を行うことも可能となる。今年度は、Bi-2212 系における磁束状態間電流スイッチ現象について詳細に検討し、スイッチングが接合の加熱により起きているというモデルを提案した。バイアス電流による加熱で、接合温度が超伝導遷移温度に近づくとパンケーキ磁束が生成する磁場 ( $H_{c1}$ ) がゼロに近づき、結晶と磁場の僅かな方位のずれによる接合方向磁場成分によりパンケーキ磁束が生成する。さらに温度が上がり超伝導遷移温度を超えると磁束が消滅し、この状態からバイアス電流を切ると急冷により、ジョセフソン磁束状態が再現すると考えられる。

## 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 8 件）

1. H. B. Wang, S. Guénon, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Grunzweig, A. Ishii, P. H. Wu, T. Hatano, D. Koelle, and R. Kleiner, “Coherent Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junction Stacks in the Hot Spot Regime”, Phys. Rev. Lett. 105, 057002 (2010). 「査読有」
2. S. Guénon, M. Grunzweig, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Y. Li., A. Ishii, P. H. Wu., T. Hatano, R. G. Mints, E. Goldobin, D. Koelle, H. B. Wang and R. Kleiner, “Interaction of hot spots and terahertz waves in Bi2Sr2CaCu2O8 intrinsic Josephson junction stacks of various geometry”, Phys. Rev. B, 82, 214506 (2010). 「査読有」
3. H. B. Wang, S. Guénon, J. Yuan, A. Ishii, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle, and R. Kleiner, “Hot spots and waves in Bi2Sr2CaCu2O8 intrinsic Josephson

junction stacks-a study by Low Temperature Scanning Laser Microscopy”, Phys. Rev. Lett. 102, 017006 (2009). 「査読有」

4. H. B. Wang, B. Y. Zhu, C. Gürlich, M. Ruoff, S. Kim, T. Hatano, B. R. Zhao, Z. X. Zhao, E. Goldobin, D. Koelle, and R. Kleiner, “Fast Josephson vortex ratchet made of intrinsic Josephson junctions in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>”, Phys. Rev. B 80, 224507 (2009). 「査読有」
5. H. B. Wang, B. Y. Zhu, C. Gürlich, M. Ruoff, S. Kim, T. Hatano, B. R. Zhao, Z. X. Zhao, E. Goldobin, D. Koelle, and R. Kleiner, “Fast Josephson vortex ratchet made of intrinsic Josephson junctions in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>”, Phys. Rev. B 80,224507, (2009). 「査読有」
6. Y. Krockenberger, K. S. Yun, T. Hatano, S. Arisawa, M. Kawasaki, Y. Tokura, “Layer-by-layer growth and magnetic properties of Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> thin films”, J. Appl. Phys. 106, 123911, (2009). 「査読有」
7. B.X. Wu, K. Jin, J. Yuan, H. B. Wang, T. Hatano, B. R. Zhao, B. Y. Zhu, “Preparation of electron-doped La<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4±d</sub> thin films with various Ce doping by dc magnetron sputtering”, PHYSICA C 469, 1945, (2009). 「査読有」
8. B. X. Wu, K. JIN, J. Yuan, H. B. Wang, T. Hatano, B. R. Zhao, B. Y. Zhu, “Thickness-induced insufficient oxygen reduction in thin films”, Supercond. Sci. Tech., 22, 085004, (2009). 「査読有」

[学会発表] (計 14 件)

1. 羽多野 毅、王 華兵、”固有ジョセフソン接合巨大メサの磁束フロー現象”, 第 19 回渦糸物理国内会議, 2011. 12. 7-9. 物質・材料研究機構、つくば.
2. T. Hatano and H. B. Wang, "Bi-2212 IJJs under layer parallel magnetic field - large mesa for THz cavity", 2nd JST-DFG Workshop on Terahertz Superconductor Electronics, Blaubeuren, 16.-19. 10. 2011.
3. Takeshi Hatano and Huabing Wang, “Lock-in phenomena in intrinsic Josephson junctions for THz oscillator under the layer parallel magnetic field”, Superconductivity Centennial Conference 2011, Superconductivity Centennial Conference 2011, The Hague, the Netherlands, 18 – 23

September 2011.

4. 羽多野 毅, 王 華兵, “固有ジョセフソン接合巨大メサの Lock-in 現象”, 2011 秋季応用物理学術講演会, 2011.8.31. 山形市.
5. Takeshi Hatano and Huabing Wang, “Lock-in phenomena of vortices in intrinsic Josephson junctions for THz oscillator”, The 13th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors, July 31-Aug 7,2011, Chicago, USA.
6. 羽多野 毅, 王 華兵, “固有ジョセフソン接合巨大メサの Lock-in 現象”, 第 18 回渦糸物理国内会議, 2010.12. 1. 日本原子力研究開発機構, 東京都.
7. Takeshi Hatano, Huabing Wang, Beiyi Zhu, Shinya Urayama, Shinichi Kawakami, and Tsutomu Yamashita, ""THz cavity resonance in intrinsic Josephson junctions under a layer-parallel magnetic field"", PLASMA2010, April 29-May 2, 2010, Hirosaki.
8. T. Hatano, S. Kawakami, S.M. Kim, S. Urayama, B.Y. Zhu and H. B. Wang, "Terahertz Excitation in Intrinsic Josephson Junctions under Layer-Parallel Magnetic Fields", The First JST-DFG Workshop on Terahertz Superconductor Electronics, Tsukuba, Japan, February 21-24, 2010.
9. T. Hatano, H. B. Wang, Y. Inamoto, and M. Nagao, "Novel transport properties in intrinsic Josephson junctions", The International Workshop on Terahertz Radiation and Metamaterials, Benasque, Spain, December 15-22, 2009.
10. 羽多野毅, "固有ジョセフソン接合の新規機能性探索", 第 17 回磁束線物理会議, 大阪, Dec. 1-3. 2009.
11. Takeshi Hatano, “Flash Memory Effect in Intrinsic Josephson Junctions”, Eastern Asia Symposium on Superconductor Electronics, Nanjing, China, Oct.11-15, 2009.
12. T. Hatano, M. Nagao, Y. Inamoto, and H. Wang, "Flash Memory Effect in Y-123 Intrinsic Josephson Junctions", 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-IX), Sept. 7-11, 2009, Tokyo, Japan.
13. T. Hatano, M. Nagao, Y. Inamoto, H. B. Wang, "Non-volatile Flash Memory Effect in Y-123 Intrinsic Josephson

Junctions", 12th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2009), June 16-19, 2009, Fukuoka, JAPAN.

14. T. Hatano, M. Nagao, Y. Inamoto, H. B. Wang, "Non-volatile Flash Memory Effect in Y-123 Intrinsic Josephson Junctions", International Superconductor Electronics Conference, 2009.6.17-19., Fukuoka.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

羽多野 毅 (HATANO TAKESHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・超伝導物性ユニット・グループリーダー  
研究者番号：50354337

### (2) 研究分担者

Wang Huabing (Wang Huabing)

独立行政法人物質・材料研究機構・超伝導物性ユニット・主幹研究員  
研究者番号：70421427

### (3) 連携研究者

なし