

平成21年 6月26日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18510113

研究課題名（和文）固有ジョセフソン接合への磁束書き込み・演算・読み出し

研究課題名（英文）Writing, operation and reading of vortices 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・ナノ物質ラボ^{*}・グループリーダー

研究者番号：50354337

研究成果の概要：高温超伝導体は層状の結晶構造そのものが超伝導性と絶縁性を示すことから、ジョセフソン素子としてどうさせることが知られ、固有ジョセフソン接合と呼ばれている。固有ジョセフソン接合 Y-123 系における磁束量子の層平行磁束と層に垂直の磁束との二状態間を、電流によりスイッチングさせることに成功した。磁束状態は温度を保持している限り電流を切っても不揮発性で記憶されていることを見いだした。また、その繰り返し読み出し・繰り返し書き込み消去動作を確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,900,000	0	1,900,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	540,000	4,240,000

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：ジョセフソン磁束・ロックイン現象・不揮発性記憶・固有ジョセフソン接合

1. 研究開始当初の背景

固有ジョセフソン接合は、ジョセフソン接合が結晶の完全性と並進対称性をもって3次元的に集積している、理想的なナノ集積材料である。超伝導は半導体と比較しても、超高速性と超低消費電力性において2桁の優位性を具備していれば尚更であり、冷却の手間を補って余りあるポテンシャルを持っている。

2. 研究の目的

サブミクロン・サイズ固有ジョセフソン接合におけるジョセフソン磁束・パンケーキ磁束の静的・動的挙動を印加磁場強度・磁場方位・温度・履歴・電流バイアスなどをパラメータとして観測することによる磁束物理現象の解明と、その工学的応用に向けた磁束状態の書き込み・演算・読み出し技術の開発への挑戦を行う。

3. 研究の方法

ビスマス系高温超伝導体において固有ジョセフソン接合の層平行磁場下の挙動が理論的・実験的に明らかになりつつある。磁場の強さ・磁場の角度・温度・それらの履歴・接合のサイズにより、稀薄・三角・四角格子やスメクティック状態をとることが指摘されており、接合に直流電流を流すことにより、磁束の接合エッジ間でのピン止め状態と面内フロー状態を制御できることも分かってきた。

電流ゼロの極限では、磁束が接合内にトラップされていて動かないが、どのような状態（磁束格子配置・構造）をとるかは、履歴による。提案者らは、サブミクロン・サイズでは、磁束の数が比較的少なく・同時に接合エッジによるピン止め効果が強いため、履歴を伴い顕著な静的・動的挙動を示すことを明らかにしてきた。従って、電流ゼロで、ある磁束状態が記憶されていて、これにパルス電流・高周波電磁波パルス・磁場のパルス成分の重畳等を行うことにより、状態の遷移（書き込み・演算）を行うことが出来るはずである。直流電流下であれば、磁束状態の部分を接合電圧状態と称することも可能である。そして何よりも、磁束状態はバイアス電流を切った後も磁束配置として記憶される筈である。

4. 研究成果

固有ジョセフソン接合を層平行磁場下に置くと、磁束がロックインしているか否かに因り、磁束フロー電圧がON/OFFすることが知られている。典型的な固有ジョセフソン接合 Bi-2212 の場合、磁場の強度・磁場の層平行からのズレ角度・温度・その条件に至る履歴により、ロックインするか否かが決まり、パンケーキ磁束が独立した粒子の様に振る舞うと定性的に理解されている。

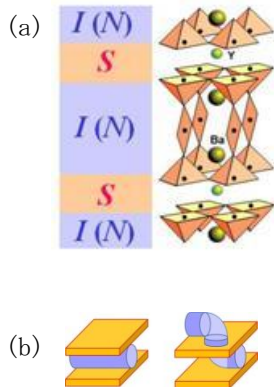


図1:固有ジョセフソン接合を形成する Y-123 系高温超伝導体の結晶構造と、磁束量子の二つの状態、(a)層間磁束と(b)層を跨ぐ磁束(所謂、交差磁束状態)の模式図

しかし、角度・温度・磁場強度を変化させて、ロックイン状態を ON/OFF させても実用的ではない。応用する場合には、電流・電圧・光などの ON/OFF で駆動させる必要がある。

本研究では、異方性が Bi-系よりも低く、必ずしも典型的な固有ジョセフソン接合とは言えない、Y-123 系について、ロックイン現象の検討を行った。Y-123 の単結晶としては、Te 添加法で作製したウイスキーを用い、収束イオンビーム 3 次元加工により、S 字型の固有ジョセフソン接合を作製した。Y-123 系は、 T_c の極大 **93 K** を示す最適ホールドープ状態では、異方性が 7 程度で、結晶を構成する原子層がジョセフソン接合として動作するかどうか不明である。ホールドープ量を減らすことで、超伝導遷移温度を犠牲にしつつも、超伝導を示す銅酸素原子面の間に挟まる SrO-BiO-BiO-SrO の 4 原子層の絶縁性を高め、Bi-系に近づけることにより固有ジョセフソン効果を発現させることができる。

Ar 雰囲気アニールによる酸素量の調整により、 $T_c \sim 35 \text{ K}$ (異方性 ~ 40) として、層平行近傍の磁場下、温度 **2-10 K** の電流-電圧特性・磁束フロー抵抗の測定を行った。その結果、Bi-2212 のような、角度・温度・磁場強度に依存するロックイン現象に加えて、**10K** 以下の低温において、バイアス電流によるロックイン状態のスイッチング現象が見出され、パンケーキ磁束の消滅と生成、即ち、ロックイン状態を OFF するパンケーキ磁束の消去と書き込みが行われたと考えられる現象が見出された。

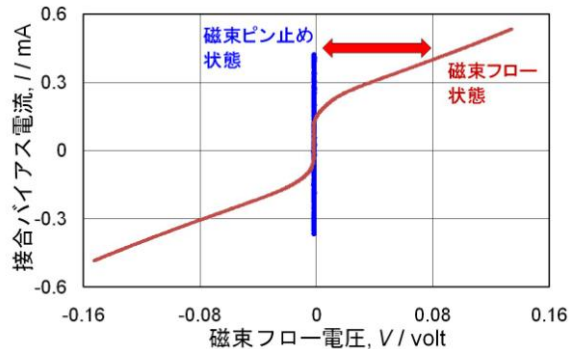


図2: $T_c \sim 35 \text{ K}$ (異方性 ~ 40) が傾斜磁場中で示すパンケーキ磁束を伴う磁束構造(公差磁束状態)の時の電流-電圧特性(青線)は、原子層に平行なジョセフソン磁束がパンケーキ磁束により層内の運動を抑制されるため、エネルギーの散逸がなく、超伝導のゼロ電圧状態が保たれる。その状態において、**0.5 mA** 以上の電流を印加すると、パンケーキ磁束が消滅し、ジョセフソン磁束は層内を高速で運動できるようになり、磁束フロー電圧が発生する(赤線)。**0.8 mA** 以上の電流パルスを印加することで、再びパンケーキ磁束を生成することができ、ゼロ電圧状態に戻すこと

ができる。

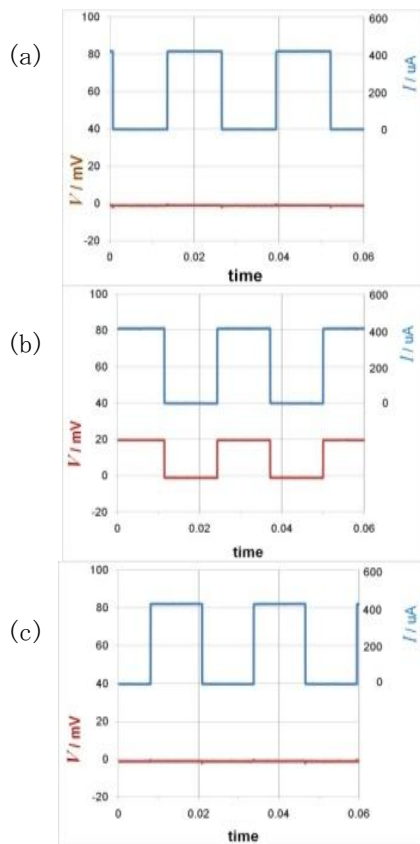


図3：(a)交差磁束状態であるため、層間を運動できるジョセフソン磁束がパンケーキ磁束（磁束の超伝導層との交差部分）にピン止めされて、バイアス電流を流しても磁束フロー電圧が生じない。(b)閾値以上の電流パルスを与えると、パンケーキ磁束が消滅しジョセフソン磁束状態へ遷移して、バイアス電流に応じて磁束フロー電圧が生じる。磁束の状態と保持されているため、電流をゼロにしても状態は変化しない（不揮発性記憶）。(c)さらに高いレベルのバイアス電流（0.8 mA以上）により、再び交差磁束状態へ変化させることができ、磁束フロー電圧は生じなくなる。

以上の様に、磁束量子の二つの状態、(a)層間のジョセフソン磁束と(b)層を跨ぐパンケーキ磁束を伴う磁束（所謂、交差磁束状態）を電流のみで、書き換えることに成功し、二状態が電流を切っても不揮発性で記憶されることが示された。固有ジョセフソン接合においては、ユニット構造の数だけジョセフソン接合があるため、3次元集積のポテンシャルを有する系での素子動作を確認したことになる。超伝導素子の高速性・低消費電力性を担保していえることから、夢の3次元デバ

イスの候補といえる。

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 羽多野毅，「Bi 系高温超伝導体単結晶ウイスキー、超-高周波・低消費電力・集積素子の開発」，工業材料 57 巻 1 号 32-33 2009.

② S.-J. Kim, T. Hatano, and M. Blamire, “Flux-flow behaviors on a $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (Bi-2212) stack” , J. Appl. Phys. 103 07C716(1-3) 2008.

③ KungSung. Yun, Takeshi Hatano, Shinichi Arisawa, Akira Ishii, Huabing Wang Tsutomu Yamashita, Ienari Iguchi, Masashi Kawasaki and Hideomi Koinuma, “Observation of intrinsic Josephson effects in tetragonally synthesized single-crystalline $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.65}$ films grown by tri-phase epitaxy” , Supercond. Sci. Technol., 21 075006-075009 2008.

④ T. Hatano, S. Kawakami, S. M. Kim, S. Urayama, K. Inomata, M. Nagao, S.-J. Kim, H. B. Wang, K. S. Yun, Y. Takano, A. Ishii, S. Arisawa, T. Yamashita, M. Tachiki, “Possible formation of rectangular Josephson-vortex lattice in narrow Bi-2212 intrinsic Josephson junctions by the enhanced edge effect” , J. Phys. Chem. Solids 67 365-368 2007.

⑤ S. M. Kim, S. Urayama, H. B. Wang, S. Kawakami, K. Inomata, M. Nagao, K. S. Yun, Y. Takano, K. Lee and T. Hatano, “Current-dependent flux-flow resistance and resonant current steps in BSCCO intrinsic Josephson junctions” , J. Phys. Chem. Solids 67 438-441 2007.

⑥ M. Nagao, S. Urayama, S. M. Kim, H. B. Wang, K. S. Yun, Y. Takano, T. Hatano, I. Iguchi, T. Yamashita, M. Tachiki, H. Maeda, M. Sato, “Periodic Oscillations of Josephson-Vortex Flow Resistance in Oxygen-Deficient $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ” , Phys. Rev. B 74 054502(1-5) 2006.

⑦ 長尾雅則, 羽多野毅, “高温超伝導体ウイスキー高温超伝導体の結晶構造は多重ジョセフソン素子構造” , セラミックス 41 283-287 2006.

⑧I. Iguchi, T. Takeda, T. Uchiyama, A. Sugimoto, T. Hatano, “Images of Interlayer Vortices and c-axis Penetration Depth of High- T_c $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ Superconductor”, Phys. Rev. B **73** 224519(1-5) 2006.

[学会発表] (計 8件)

①□羽多野 毅, 長尾 雅則、稲本 悠也、王 華兵「ジョセフソン磁束/交差磁束状態の電流によるスイッチング」日本物理学会第64回年次大会 2009. 3. 30. 立教大学、東京都豊島区.

②T. Hatano H. B. Wang, Y. Inamoto, and M. Nagao, “Switching between Vortex-flow and pinned states in Intrinsic Josephson Junctions”, The 6th International Symposium on Intrinsic Josephson Effect and Plasma Oscillations, 2008. 7. 17., POSTEC, Pohang, Korea.

③T. Hatano, H. B. Wang, M. Nagao, Y. Inamoto and S. Arisawa, “Non-volatile flash memory effect in intrinsic Josephson junctions”, 第4回「超伝導ナノサイエンスと応用」研究会 2008. 3. 28、兵庫県有馬市.

④T. Hatano, , H. B. Wang, K. S. Yun, S. Arisawa, Y. F. Wei, A. Ishii and I. Iguchi, “THz excitation in intrinsic Josephson junctions”, 4th CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity Kita-Kyushu Fukuoka 2007. 12. 19.

⑤T. Hatano, H. B. Wang, M. Nagao, K. S. Yun and S. Arisawa, “Non-volatile flash memory effect in superconducting junctions by the flow states of Josephson and pancake vortices”, 7th International AQDJJ conference on Frontiers of Josephson Physics and Nanoscience (FJPN07) in memory of the late professor Bob Parmentier, 2007. 9. 26, Palinuro, Italy.

⑥T. Hatano, M. Nagao, K. S. Yun, H. B. Wang, “Superconducting flash memory by programming vortex state in intrinsic Josephson junctions”, European Conference on Applied Superconductivity, 2007. 9. 20, Brussels, Belgian.

⑦T. Hatano, K. S. Yun, S. Arisawa and H.

B. Wang,” Lock-in phenomena of Josephson vortices in Bi-2212 and RE-123 intrinsic Josephson junctions”, Joint ESF and JSPS Conference on VORTEX MATTER IN NANOSTRUCTURED SUPERCONDUCTORS (VORTEX V), 2007. 9. 12, Rhodes, Greek.

⑧羽多野 毅, 長尾 雅則, 尹 炅成, 王 華兵, 「固有ジョセフソン接合の交差磁束状態でのパンケーキ磁束の消去と書き込み」, 応用物理学会 2007 年春の学術講演会, 2007. 3. 27 青山学院大学相模原キャンパス、神奈川県相模原市.

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・ナノ物質ラボ・グループリーダー
研究者番号：50354337

(2) 研究分担者

王 華兵 (WANG HUABING)
独立行政法人物質・材料研究機構・ナノ物質ラボ・主幹研究員
研究者番号：70421427

(3) 連携研究者

なし