

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：平成 19 年度～平成 20 年度

課題番号：19510107

研究課題名 (和文) 高温超伝導体ナノ構造における量子輸送とスピン制御

研究課題名 (英文) Quantum transport and spin control in nanostructure of high-Tc superconductor

研究代表者 入江晃亘 (IRIE AKINOBU)

宇都宮大学・工学研究科・教授

研究者番号：90241843

研究成果の概要：

本研究は、ビスマス系酸化物高温超伝導体に内在するナノ構造におけるスピン伝導に関連した量子輸送を制御・利用する超伝導スピントロニクスへの創製を目指し、磁性体/酸化物高温超伝導体ハイブリッド構造を作製し、そのスピン輸送特性について調べた。その結果、ナノ構造に起因する固有ジョセフソン接合の臨界電流は、磁性体の磁化特性と密接に相関関係を有することを見出した。これは、固有ジョセフソン接合の臨界電流が磁性体からのスピン注入により制御できることを意味しており、同接合のスピンデバイス応用の可能性を示すものである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：超伝導電子工学

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：酸化物高温超伝導体, ナノ構造, ジョセフソン接合, スピン注入, トンネル現象

1. 研究開始当初の背景

CMOS デバイスを中心とする半導体エレクトロニクスの高集積化はおよそ 2010 年まで 3 年で 2 倍というトレンドに沿って続くものと予想されているが、電荷を制御する従来型デバイスの性能向上は限界に近づきつつあり、新しい動作原理に基づく超高性能の新基盤デバイス開発の必要性が指摘されている。その一端を担うデバイス候補として量子力学的現象を直接制御・利用する量子効果デバイスが注目されている。

ところで、強磁性と超伝導はお互いに競合する量子現象であるため、強磁性体/超伝導体ハイブリッド素子では様々な新しい量子現象が期待される。一般に、超伝導体内ではスピンの逆向き 2 つの電子が対(クーパー対)を形成しているが、磁性体から超伝導体へスピン偏極した電子が注入された場合、超伝導体内のスピンのバランスが崩れ非平衡状態となり、超伝導特性が変化しうる。我々は、ビスマス系高温超伝導体において結晶構造自体がジョセフソン接合(固有ジョセフソン

接合)として機能することを発見後、固有ジョセフソン接合の基礎特性の解明及びデバイス応用を目指した研究を進めてきた。固有ジョセフソン接合では、超伝導層の厚さが0.3nmと極めて薄いため、固有ジョセフソン接合へスピン偏極電子を注入した場合、従来の超伝導体バルクと比較して大きい超伝導特性の変化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、層状酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (BSCCO) に内在するナノ構造 (固有ジョセフソン接合) におけるスピン伝導に関連した量子輸送を制御・利用する超伝導スピントロニクス創製を目指し、強磁性体/固有ジョセフソン接合ハイブリッド構造を作製し、そのスピン輸送特性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、良質な酸化物高温超伝導体 BSCCO 単結晶を用いた磁性体/固有ジョセフソン・トンネル接合超格子ハイブリッド構造の作製技術を確認し、その超伝導特性、電流-電圧特性、温度特性、磁場特性を系統的に調べた。具体的な方法を以下に示す。

(1) BSCCO 単結晶の育成並びに Co/BSCCO ハイブリッド構造の作製

BSCCO 単結晶を自己フラックス法により育成し、電子線リソグラフィ技術及びエッチング技術を用いて面積が $9\sim 25\mu\text{m}^2$ の強磁性体 (Co) と超伝導体 (BSCCO) で構成されたメサ構造を作製した。

(2) 量子輸送特性の解明

作製した素子について系統的に電流-電圧特性、及びその温度依存性、磁場依存性を測定し、磁性体/固有ジョセフソン接合ハイブリッド構造におけるスピン輸送特性について検討した。

4. 研究成果

得られた研究成果を以下に示す。

(1) Co/BSCCO ハイブリッド構造における固有ジョセフソン接合の輸送特性

強磁性体/固有ジョセフソン接合ハイブリッド構造におけるスピン輸送特性の解明に向けて、まず強磁性体が固有ジョセフソン接合特性に及ぼす影響を把握するために Co/BSCCO ハイブリッド構造からなる微小メサ (面積 $9\sim 25\mu\text{m}^2$) を作製し、ゼロ磁場におけるメサ内の固有ジョセフソン接合の電流-電圧特性、並びに臨界電流の温度依存性を測定した。

① 結晶成長、並びに微小磁性体/固有ジョセ

フソン接合ハイブリッド構造の作製

本研究で用いた BSCCO 単結晶は、自己フラックス法により作製した。原料として、 $\text{Bi}_2\text{O}_3, \text{SrCO}_3, \text{CaCO}_3, \text{CuO}$ の各粉末を用いて、これらの原子量比が $\text{Bi}:\text{Sr}:\text{Ca}:\text{Cu}=2:2:1:2$ になるように計量し、アルミナ坩堝に入れ、電気炉にて成長させた。

得られた BSCCO 単結晶表面をへき開し、真空蒸着、RF スパッタリングにより作製した $\text{Co}(70\text{nm})/\text{Au}(10\text{nm})/\text{BSCCO}$ 三層構造を電子ビームリソグラフィ技術、フォトリソグラフィ技術、Ar イオンミリングを用いてメサ構造 (面積 $3\times 3\sim 5\times 5\mu\text{m}^2$) に加工した。ここで、Au は Co と BSCCO 間の接触抵抗を軽減するために挿入しているが、Au 層でのスピン散乱を避けるためにその厚さはスピン拡散長以下にした。図 1 に作製した試料の断面図を示す。



図 1 試料断面の概略図

② 電流-電圧特性

作製した試料の 77K におけるゼロ磁場における代表的な電流-電圧 (I-V) 特性を図 2 に示す。固有ジョセフソン接合に典型的なブランチ構造が現れており、Co/Au/BSCCO 構造においても固有ジョセフソン接合特性を確認できることがわかる。観測されたブランチ数よりこの試料に内在している固有接合数は 40 と見積もられる。

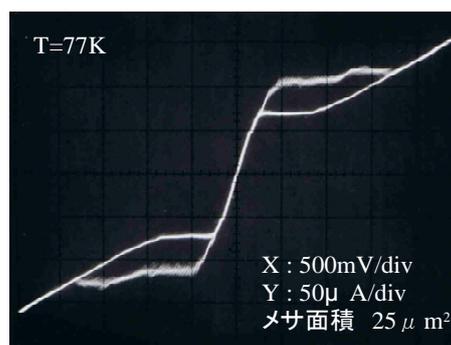


図 2 作製した試料の 77K におけるゼロ磁場における I-V 特性

③ 臨界電流の温度依存性

作製した試料の臨界電流の温度依存性を図 3 に示す。なお、比較のため通常の固有ジョセフソン接合 (Co がない) からなる Au/BSCCO メサの臨界電流の温度依存性も同図に示している。これより、ゼロ磁場における臨界電流の温度依存性は通常の固有ジョセフソン接合のそれと同様な振舞いを示し

ており、温度変化に対する強磁性体の影響は小さいことがわかる。さらに、これらの温度依存性は Ambegaokar-Baratoff 理論に従うジョセフソントンネル接合の臨界電流の温度依存性と同様であり、固有ジョセフソン接合のトンネル輸送機構に対する Co 層の影響は無視できるものと考えられる。

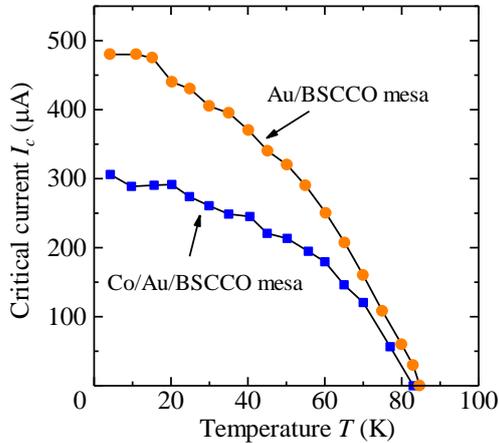


図 3 ゼロ磁場における臨界電流の温度依存性

(2) Co/Au/BSCCO ハイブリッド構造におけるスピン輸送特性

同上構造におけるスピン輸送特性を明らかにするために同構造に磁場を印加し、固有ジョセフソン接合の臨界電流、並びにゼロバイアス抵抗を測定した。

①臨界電流の磁場依存性

77K における臨界電流の磁場依存性を図 4 に示す。これより、(i)臨界電流は磁場の掃引方向に応じてヒステリシスを描く、(ii)0~±30mT の磁場の範囲で大きく変動する、(iii)15mT 付近で極大値をとることがわかる。臨界電流に対する Co 層の磁化の影響を調べるため、この試料の磁化特性を測定したところ、臨界電流が最大となった磁場の強さは試料の保磁力にほぼ対応していることがわかった。本研究で作製した試料は単一磁区をもつサイズではなく、そのため磁区構造は印加磁場の大きさに応じて変化していると考えられる。このとき、各磁区のスピン偏極率に差異はないが、Co 層全体の正味のスピン偏極率を各磁区内のスピン方向のベクトル和として定義すると正味のスピン偏極率は磁場の大きさに依存して変化する。すなわち、外部磁場が保磁力に相当するとき、Co 層の自発磁化はゼロとなり、正味のスピン偏極率 P もゼロになる。一方、磁化が 0 でない場合、Co 層の正味のスピン偏極率も 0 とはならず、固有ジョセフソン接合へはスピン偏極電流が流入し、結果として臨界電流が減少したと解

釈することができる。

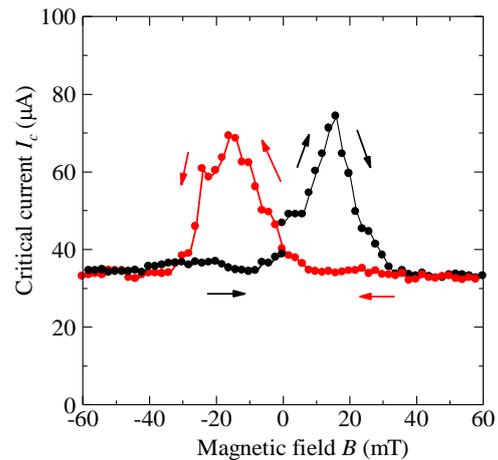


図 4 77K における臨界電流の磁場依存性

②ゼロバイアス抵抗の磁場依存性

常伝導(N)/超伝導(S)接合境界面では、N 側から S 側へ入射する電子は N 側の電子を連れ去り、クーパ対として S 側へ透過していき、N 側へホールを反射する現象(アンドレーフ反射)が生じる。このとき、N/S 接合の抵抗はアンドレーフ反射確率によって変化する。常伝導体が強磁性体の場合も同様にアンドレーフ反射が発生するが、そのときのアンドレーフ反射確率は強磁性体のスピン偏極率 P に依存して変化し、P=0 で最大となる。そこで、図 4 に示した臨界電流の磁場依存性がスピン注入効果によるものか検証するために、ゼロバイアス抵抗(ZBR)を測定した。図 5 に ZBR の磁場依存性を示す。ZBR の磁場依存性はヒステリシスを示すとともに、15mT 付近で最少となった。これは、約 15mT でアンドレーフ反射確率が最も高くなることを意味するとともに、ZBR が最小となる磁場は、Co 層の正味の P がゼロになる磁場と一致している。すなわち、ZBR の磁場依存性もスピン注入によるものと解釈できる。

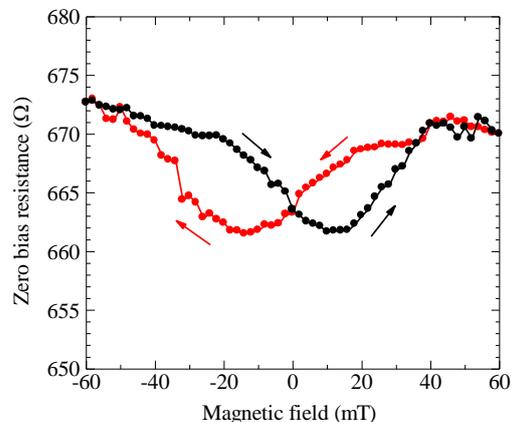


図 5 77K における ZBR の磁場依存性

以上、本研究では、強磁性体/BSCCO ハイブリッド構造のメサを作製し、固有ジョセフソン接合における臨界電流及びゼロバイアス抵抗の磁場依存性を測定することにより同構造におけるスピン輸送特性を調べた。その結果、スピン注入効果に起因して外部磁場の増減に応じ臨界電流が変動する現象の観測に成功した。これまで高温超伝導体系ではこのような明瞭なスピン注入効果の観測例はなく本研究成果の意義は大きいといえる。加えて、固有ジョセフソン接合の際立った特徴は、原子層スケールのジョセフソン接合が多数結合して積層している「多重積層ジョセフソン接合系」を構成していることであり、従来の人工的ジョセフソン接合とはその物理的な意味合いが大きく異っている。本研究成果は、多重積層接合系においてもスピン偏極電子が散乱されることなくスピン情報を保った状態でトンネルしていることを示すものであり、固有ジョセフソン接合のスピン素子としての側面、並びに多重積層接合系におけるスピン輸送の解明という新しい研究領域を切り拓くものと位置づけられる。特に、多重積層接合系としての側面では、接合間の電磁氣的結合により集団動作が可能であるが、人工的ジョセフソン接合ではその作製が困難な現在、固有ジョセフソン接合の役割は極めて重要といえ、今後同接合のスピンデバイスへの応用が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- ① A. Irie, G. Oya, Thermally assisted vortex motion in intrinsic Josephson junctions, *Journal of Physics: Conference Series*, 97, pp. 012244-1–012244-6 (2008) 査読有
 - ② A. Irie, G. Oya, Numerical simulations of Fiske steps in intrinsic Josephson junctions, *Physica C* 468, pp. 679-683 (2008) 査読有
 - ③ M. Kitamura, A. Irie, G. Oya, Shapiro steps in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions in magnetic field, *J. Appl. Phys.* 104, pp. 063905-1–063905-13 (2008) 査読有
 - ④ A. Irie, Yu. M. Shukrinov, G. Oya, Experimental manifestation of the breakpoint region in the current-voltage characteristics of intrinsic Josephson junctions, *Appl. Phys. Lett.* 93, pp. 152510-1–152510-3 (2008) 査読有
 - ⑤ A. Irie, Yu. M. Shukrinov, G. Oya, Experimental observation of the longitudinal plasma excitation in intrinsic Josephson junctions, *J. Phys. Conf. Ser.*, 129, pp. 012029-1–012029-7 (2008) 査読有
 - ⑥ M. Kitamura, A. Irie, G. Oya, Conditions for observing Shapiro steps in a $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ high- T_c superconductor intrinsic Josephson junction: Numerical calculations, *Phys. Rev. B* 76, pp. 064518-1–064518-15 (2007) 査読有
- 〔学会発表〕(計 16 件)
- ① 小西将大, 荒川直大, 入江晃亘, 大矢銀一郎, 固有ジョセフソン接合へのスピン注入(II), 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 松本祐二, 広長隆介, 入江晃亘, 大矢銀一郎, 固有ジョセフソン接合への印加磁場傾斜効果, 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)
 - ③ A. Irie, Ferromagnet-intrinsic Josephson junctions hybrid systems, Joint JSPS-ESF International Conferences on Nanoscience and Engineering in Superconductivity, 2009 年 3 月 26 日 (つくば)
 - ④ A. Irie, M. Konishi, T. Tsuji, G. Oya : Transport properties in $\text{Co}/\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ hybrid structures, The IUMRS international conference in Asia 2008, 2008 年 12 月 10 日 (名古屋国際会議場)
 - ⑤ 小西将大, 辻 忠明, 入江晃亘, 大矢銀一郎, $\text{Co}/\text{Au}/\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y/\text{Au}/\text{Co}$ 接合の臨界電流の磁場依存性, 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月 5 日 (中部大学)
 - ⑥ Nurmiza Othman, 磯部義章, 北村通英, 入江晃亘, 大矢銀一郎, $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合におけるマイクロ波応答, 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月 5 日 (中部大学)
 - ⑦ 松本祐二, 大矢銀一郎, 入江晃亘, 固有ジョセフソン接合におけるサブランチ構造, 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月 5 日 (中部大学)
 - ⑧ 入江晃亘, 大矢銀一郎, 固有ジョセフソン接合における電磁特性の数値解析, 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会, 2008 年 7 月 24 日 (機械振興会館)
 - ⑨ A. Irie, Experimental observation of the longitudinal plasma excitation in intrinsic Josephson junctions, The international conference on theoretical physics “Dubna-Nano2008”, 2008 年 7 月 8 日 (Dubna Russia)
 - ⑩ 松本祐二, 江戸野誠, 入江晃亘, 大矢銀一郎, 固有ジョセフソン接合におけるサブランチ構造の磁場依存性, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 2008 年 3 月 27 日 (日本大学)
 - ⑪ N. Othman, 磯部義章, 入江晃亘, 大矢銀一郎, $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合におけるマイクロ波照射効果, 第 55

回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月27日(日本大学)

- ⑫ 入江晃亘, 大矢銀一郎, 固有ジョセフソン接合における自己共振モードの数値解析, 第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月27日(日本大学)
- ⑬ A. Irie, Influence of thermal fluctuations on intrinsic Josephson junctions operated in the vortex-flow mode, East Asia Symposium on Superconductive Electronics (EASSE), 2007年12月14日(インド, ニューデリー)
- ⑭ 小西将大, 本田祐樹, 入江晃亘, 大矢銀一郎, 固有ジョセフソン接合へのスピン注入, 第68回応用物理学学会学術講演会, 2007年9月4日(北海道工業大学)
- ⑮ 松本祐二, 江戸野誠, 木村博文, 入江晃亘, 大矢銀一郎, $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ ($x=0.15$) 固有ジョセフソン接合におけるサブブランチ構造, 第68回応用物理学学会学術講演会, 2007年9月4日(北海道工業大学)
- ⑯ N. Othman, 磯部義章, 入江晃亘, 大矢銀一郎, $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合におけるマイクロ波誘起ステップ, 第68回応用物理学学会学術講演会, 2007年9月4日(北海道工業大学)

[産業財産権]

○取得状況(計1件)

名称: 定電圧発生装置及び定電圧発生装置の製造方法

発明者: 入江晃亘, 大矢銀一郎

権利者: 国立大学法人宇都宮大学

種類: 特許

番号: 第4129522号

取得年月日: 2008年5月30日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

入江 晃亘 (AKINOBU IRIE)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90241843

(2) 研究分担者

大矢 銀一郎 (GIN-ICHIRO OYA)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00006280

北村 通英 (MICHIHIDE KITAMURA)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90161497