

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656232

研究課題名（和文） 二次元超伝導層を用いたスピン機能デバイスの開拓

研究課題名（英文） Investigation of spin-based functional devices using two-dimensional superconducting layer

研究代表者

入江 晃亘（AKINOBU IRIE）

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90241843

研究成果の概要（和文）：超伝導と磁性を融合した従来にはないスピン機能デバイスの開拓を目指し、層状酸化物高温超伝導体に内在する二次元超伝導層におけるスピンに依存した量子輸送現象について研究した。ビスマス系高温超伝導体ウイスキー結晶を用いて作製した試料に対し層に平行な磁場を印加した場合、臨界電流並びに定電流バイアスしたときの試料電圧の磁場依存性がヒステリシスを示すことを見出した。この結果は、同構造を用いることにより液体窒素温度以上で動作可能な新規なスピンドバイス開発の可能性を示すものである。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a novel spin device the spin-dependent transport properties in quasi two-dimensional superconducting layer have been investigated. The samples composed of a whisker crystal of Bi-system high T_c superconductor and Co thin film were fabricated by photolithography and Ar ion milling. We found that the samples showed the hysteretic field dependence of a critical current and the voltage at a constant bias current by applying magnetic field parallel to layer. The obtained results suggests a potential for the novel spintronics device application of such hybrid structures.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子デバイス・電子機器

キーワード：超伝導材料・素子，スピントロニクス，先端機能デバイス

1. 研究開始当初の背景

近年、微細加工技術の飛躍的な進展により電子のもつ「電荷」と「スピン」の双方を直接制御することが可能となり、それを利用したスピンドバイスが次世代高機能電子デバイスの一つとして注目されている。特に、第三電極により電子スピンを制御する半導体スピン電界効果トランジスタは量子計算素子としても期待されており国内外で活発に研究が進められているが、その実現のためには二次元電子系におけるコヒーレントなスピン依存伝導がキーとなる。ところで、従来

よりコヒーレント量子輸送を利用したデバイスとして超伝導デバイスがあるが、素子単体の性能は半導体素子に比べ優れているものの二端子素子のため集積回路設計における自由度が制約されるという問題があり、超伝導三端子素子の開発が望まれている。

ビスマス系層状酸化物高温超伝導体は、超伝導を担う CuO_2 層（厚さ～0.3nm）とその他の非超伝導層（厚さ～1.2nm）が交互に自然積層した超格子ナノ構造を内在している（図1）。このナノ構造は、ジョセフソン接合として機能することが知られており、固有

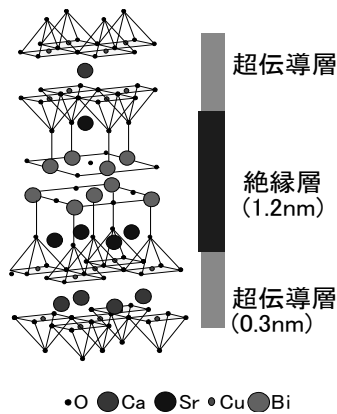


図1 ビスマス系高温超伝導体の結晶構造

ジョセフソン接合と呼ばれている。我々は、最近この固有ジョセフソン接合と強磁性体からなるハイブリット構造において強磁性から注入されたスピン流の巨視的トンネル現象を初めて観測し、スピン注入により固有ジョセフソン接合の臨界電流が大きく減少することを見出した。これは、二次元超伝導層である CuO_2 面内においてスピン非平衡が生じていることを意味しており、面内方向にスピン偏極電流を流した場合も超伝導特性が変化することを示唆するものである。したがって、 CuO_2 超伝導層へのスピン注入量並びに層内のスピン状態を外部から制御できれば、二次元超伝導層をチャンネルとした新しいスピン機能デバイスの開発が期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、超伝導と磁性を融合した従来にないスピン機能デバイスの開発を目指し、層状酸化物高温超伝導体に内在する二次元超伝導層におけるスピンに依存した量子輸送現象を明らかにするとともに、二次元超伝導層をチャンネルとした超伝導スピントランジスタの可能性を探求することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、超格子ナノ構造からなる高温超伝導体に内在する二次元超伝導層を利用した新規な超伝導スピント機能デバイスの開発を目指すものであり、以下の項目について研究を行った。

(1) 単結晶作製と評価

超伝導体へ効率よくスピン注入を行うためには平坦な表面と良質な結晶が必要である。そこで、本研究では、超伝導体としてビスマス系高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaC}_2\text{O}_y$ ウィスカー単結晶を用いた。結晶成長には、Te 添加法を用い、その結晶性と伝導特性を評価した。

(2) スピン依存伝導特性評価

得られたウィスカー結晶上に磁性体として Co をスパッタ成膜後、フォトリソグラフィ及び Ar イオンエッチングによりデバイス構造に微細加工し、試料の電流-電圧(I-V)特性を測定した。また、ソレノイドコイルにより試料に磁場を印加し、面内伝導特性の磁場依存性を測定した。

4. 研究成果

(1) ウィスカー結晶の成長と超伝導特性

結晶は Bi_2O_3 , SrCO_3 , CaCO_3 , CuO , TeO_2 粉末原料を混合し、 760°C , 780°C , 800°C で各 12 時間空气中仮焼き後、酸素並びに空気雰囲気中において焼成温度 $840\sim 870^\circ\text{C}$ で成長した。得られたウィスカー結晶の顕微鏡写真を図2に示す。ウィスカー結晶の大きさは、長さ 3mm 程度、幅 $15\sim 30\mu\text{m}$ であった。また、ウィスカー結晶の抵抗-温度特性の測定例を図3に示す。電気抵抗は 2223 相と 2212 相に由来する 105K と 83K において 2 段遷移が見られた。ただし、図4に示す X 線回折結果では 2212 相のみが観測され、2223 相の割合は極めて少ないことが示唆された。

(2) スピン輸送特性

得られたウィスカー結晶上に Co 電極を配した試料の顕微鏡写真を図5に示す。また、無磁場中、77K における試料の電流-電圧(I-V)特性の一例を図6(a)に示す。77K にお

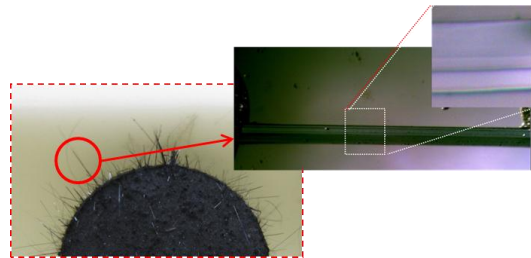


図2 作製したビスマス系高温超伝導体ウィスカー単結晶の顕微鏡写真

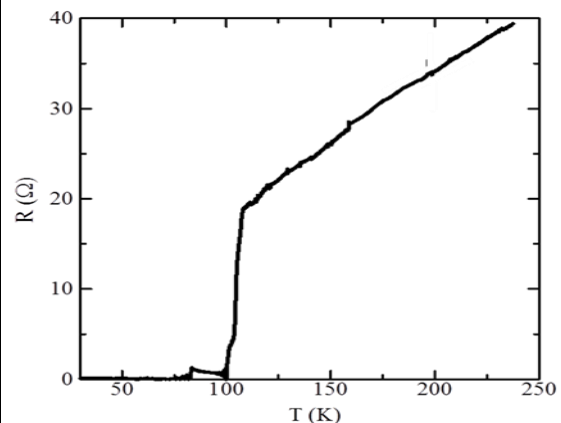


図3 作製したウィスカー結晶の抵抗-温

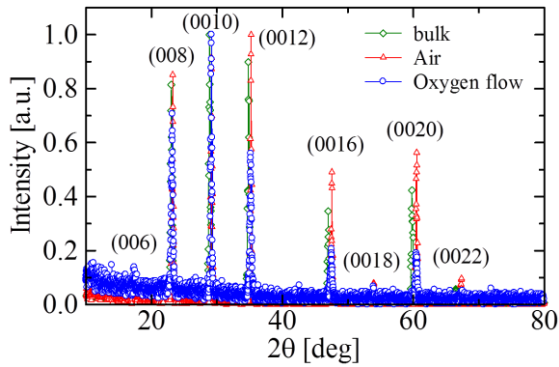


図4 ウィスカー結晶のX線回折パターン

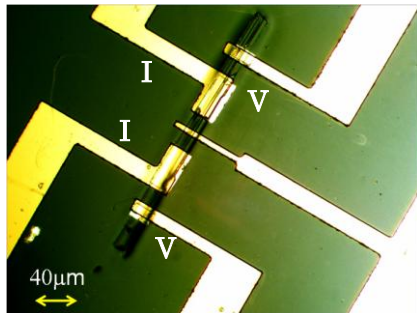


図5 スピン輸送評価用試料の顕微鏡写真

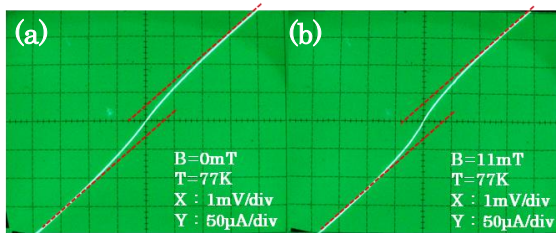


図6 77KにおけるI-V特性(a)B=0, (b)B=11mT

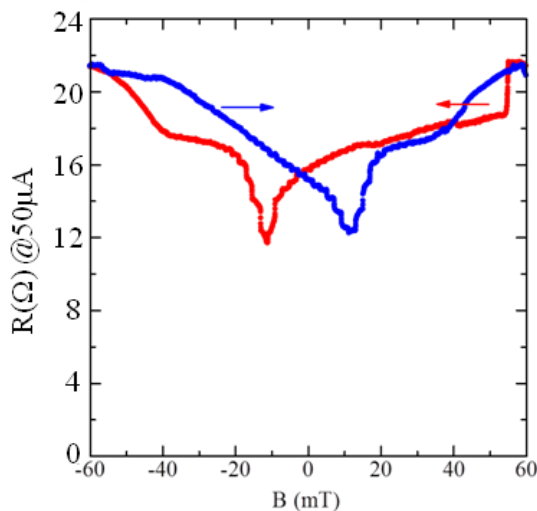


図7 一定電流バイアス時の印加電圧の磁場依存性

ける超伝導電流の大きさは試料に依存して大きく変わるが、この試料では、77Kで明瞭な超伝導電流は現れていない。ただし、原点近傍において変曲点を確認することができ、超伝導状態であることがわかる。本研究では、超伝導現象に対するスピン注入効果を効率よく観測することを目的としたため、実験には積極的に77Kにおいて臨界電流の小さい試料を用いた。図6(b)は $B=11\text{mT}$ の磁場を印加した時のI-V特性である。 $B=11\text{mT}$ では $B=0$ のときに比べ変曲点が顕著に現れており、超伝導状態が強くなったことが示唆される。さらに B を大きくするとほぼ直線的なオーミックな特性が観測された。I-V特性のこのような変化は、スピン注入源であるCoの磁化状態と対応しており、スピン注入により超伝導状態が変化したと考えられる。図7は、図6に示した試料に $50\mu\text{A}$ の一定電流を加えた時の抵抗の磁場依存性である。これより、磁気抵抗はヒステリシスを示し、 $B=-60\sim 60\text{mT}$ の磁場変化の間で約50%程度の変化が観測された。

以上の結果は、二次元超伝導層からなる酸化銅高温超伝導体のスピン機能デバイス応用の可能性を示すものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

(1) D. Oikawa, A. Irie, K. Yamaki, Size dependence of terahertz electromagnetic wave radiation from intrinsic Josephson junctions, IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 1500604-(1-4)(2013), 査読有
DOI: 10.1109/TASC.2012.2231894

(2) K. Yamaki, R. Fusegi, D. Oikawa, A. Irie, Synthesis of BSCCO single crystal whiskers for terahertz EM wave oscillator, IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 7200504-(1-4) (2013), 査読有

(3) G. Oya, T. Miyasaka, M. Kitamura, A. Irie, Shapiro Step Response of Intrinsic Josephson Junctions of $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ at Elevated Temperatures, Procedia, 36, 343-348 (2012), 査読有
DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.242

(4) A. Irie, D. Oikawa, G. Oya, Generation and Detection of THz Radiation Using Intrinsic Josephson Junctions, Physics Procedia, 36, 199-204 (2012), 査読有
DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.071

(5) D. Oikawa, A. Irie, K. Yamaki, G. Oya Terahertz electromagnetic radiation from

Bi₂Sr₂CaCu₂O_y intrinsic Josephson junction stack, Physics Procedia, 27, 312-315 (2012), 査読有
DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.473

(6) K. Yamaki, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, H. Minami, A. Irie, K. Kadowaki, Magnetic field effects and dynamical control of terahertz electromagnetic wave emission from high-T_c superconducting Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+d} mesa structures, J. Physics: Conference Series, 400, 022137-(1-4) (2012), 査読有
DOI: 10.1088/1742-6596/400/2/022137

(7) A. Irie, N. Arakawa, M. Kitamura, H. Sakuma, G. Oya, Control of critical current of intrinsic Josephson junctions due to spin injection, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 741-744 (2011), 査読有
DOI: 10.1109/TASC.2010.2090632

(8) N.B. Othman, G. Oya, M. Kitamura, A. Irie, Shapiro step response of intrinsic Josephson junctions with high critical currents of (Bi_{1-x}Pb_x)₂Sr₂CaCu₂O_y, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 176-179 (2011), 査読有
DOI: 10.1109/TASC.2010.2091248

[学会発表] (計 19 件)

① 村田健一郎, 八巻和宏, 入江晃亘, 高温超伝導体 BSCCO ウィスカー結晶へのスピン注入, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 2013 年 3 月 27 日~3 月 30 日, 神奈川工科大学

② 大塚雅哉, 入江晃亘, 八巻和宏, Co/Au/BSCCO 接合の零バイアス微分抵抗, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 2013 年 3 月 27 日~3 月 30 日, 神奈川工科大学

③ D. Oikawa, A. Irie, K. Yamaki, Size dependence of terahertz electromagnetic wave radiation from intrinsic Josephson junctions, Applied Superconductivity, 2012 年 10 月 7 日~10 月 12 日

④ K. Yamaki, R. Fusegi, D. Oikawa, A. Irie, Synthesis of BSCCO single crystal whiskers for terahertz EM wave oscillator, Applied Superconductivity, 2012 年 10 月 7 日~10 月 12 日

⑤ 八巻和宏, 伏木亮介, 及川大, 入江晃亘, BSCCO 系ウィスカーの構造解析と輸送特性, 2012 年 9 月 11 日~9 月 14 日

⑥ 大塚雅哉, 入江晃亘, 八巻和宏, 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輸送特性, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 2012 年 9 月 11 日~9 月 14 日, 愛媛大学

⑦ 及川大, 入江晃亘, 八巻和宏, BSCCO 単結晶固有ジョセフソン接合からの THz 電磁波放射特性, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 2012 年 9 月 11 日~9 月 14 日, 愛媛大学

⑧ G Oya, T Miyasaka, M Kitamura A Irie, Shapiro step response of intrinsic Josephson junctions of (Bi_{1-x}Pb_x)₂Sr₂CaCu₂O_y at elevated temperatures, Superconductivity Centennial Conference, 2011 年 9 月 20 日, ハーグ

⑨ A. Irie, D. Oikawa, K. Yamada, G. Oya, Generation and detection of THz radiation using intrinsic Josephson junctions, Superconductivity Centennial Conference, 2011 年 9 月 20 日, ハーグ

⑩ D. Oikawa, A. Irie, K. Yamaki, G. Oya, Terahertz electromagnetic radiation from Bi₂Sr₂CaCu₂O_y intrinsic Josephson junction stack, 第 24 回国際超電導シンポジウム (ISS2011), 2011 年 12 月 4 日

⑪ K. Yamaki, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, H. Minami, A. Irie, K. Kadowaki, Magnetic field effects and dynamic control of terahertz electromagnetic wave emission from high-T_c superconducting Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+d} mesa structures, The 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), 2011 年 8 月 12 日, Beijing International Convention Center

⑫ D. Oikawa, A. Irie, K. Yamaki, G. Oya, Terahertz electromagnetic wave emission and detection using mesa-type intrinsic Josephson junctions, The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2011), 2011 年 10 月 27 日, 山形大学

⑬ A. Irie, Transport properties in ferromagnet/intrinsic-Josephson-junction stack heterostructures, The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2011) (招待講演), 2011 年 10 月 28 日, 山形大学

⑭ 伏木亮介, 八巻和宏, 及川大, 大矢銀一

郎, 入江晃亘, BSCCO 系 THz 発振素子の実現に向けた単結晶ウィスカーの作成, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 17 日,早稲田大学

⑯大貫晋吾, 仲田智史, 北村通英, 大矢銀一郎, 入江晃亘, 「BPSCCO におけるジョセフソンボルテックスフローへのマイクロ波注入作用」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 16 日,早稲田大学

⑰今井佑貴, 宮坂貴広, 大矢銀一郎, 北村通英, 入江晃亘, ジョセフソンボルテックス・フロー抵抗を伴う BPSCCO のシャピロステップ応答, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 16 日,早稲田大学

⑱青木康太, 及川 大, 田村晃一, 入江晃亘, 八巻和宏, 大矢銀一郎, BSCCO テラヘルツ波発振素子における発振特性のサイズ依存性, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 16 日,早稲田大学

⑲荒川直大, 青木康太, 入江晃亘, 八巻和宏, 大矢銀一郎, Co/BSCCO メサ構造における固有ジョセフソン接合の臨界電流, 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2011 年 8 月 31 日, 山形大学

⑳及川 大, 山田清孝, 入江晃亘, 八巻和宏, 大矢銀一郎, メサ構造固有ジョセフソン接合のテラヘルツ波発振, 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2011 年 8 月 31 日,山形大学

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・教授

研究者番号：90241843