

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8日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22710096

研究課題名（和文） 高温超伝導体・強磁性体ハイブリッド素子の量子輸送と
量子ビットへの応用研究課題名（英文） Quantum transport in high-Tc superconductor/ferromagnet hybrids and
its application to quantum bit

研究代表者

川畑 史郎（KAWABATA SHIRO）

独立行政法人産業技術総合研究所・ナノシステム研究部門・主任研究員

研究者番号：30356852

研究成果の概要（和文）：本研究においては、高温超伝導体と強磁性絶縁体からなる新奇な超伝導ハイブリッド素子の提唱を行い、コヒーレントな量子ビット実現のために不可欠な π 接合が出現することを示した。また摂動理論を用いて π 接合出現の条件を明らかにし、量子ビット素子の提唱を行った。以上の成果により高温超伝導/強磁性絶縁体接合は極めてコヒーレンス性能の高い量子ビットとなり得ることが示された。

研究成果の概要（英文）：We have developed a theory of the quantum transport phenomena in high-Tc superconductor/ferromagnetic insulator Josephson junction and found the formation of the π -junction in such systems. Based on this peculiar result, we have also proposed a coherent quantum bit using such hybrid systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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・ナノ構造科学

キーワード：量子コンピュータ、スピントロニクス、ジョセフソン効果、磁性半導体、高温超伝導体、計算物理、メゾスコピック系

1. 研究開始当初の背景

近年、大規模集積化が可能な超伝導体素子を用いた量子ビットに関する研究が盛んに進められている。実際、最近になって超伝導量子ビット・フォトン間の量子もつれ生成や2量子ビットのアルゴリズムのデモンストレーションも行われ基礎科学だけでなく産業応用的にも大きな注目を集めるようになってきた。

これまでの研究においては BCS 金属超伝

導体(S)を絶縁体(I)を介して積層した S/I/S 接合が量子ビットとして利用されてきた。しかしながら、この素子には [欠点 1] 印加磁場に含まれるノイズによるデコヒーレンスの存在、[欠点 2] 著しく低い動作温度(mK程度)、欠点 3] S/I 界面の欠陥準位による $1/f$ ノイズの存在という根本的問欠点があり、これらの事実は実用化のための大きな障害となっていた。そのため、実用的量子コンピュータを実現するために、上記欠点を克服する新たなデ

バイスの提唱が望まれている。

そのような状況の中、近年 S/磁性体金属 (FM)/S から構成される π 接合が次世代固体量子ビットとして注目を集めるようになってきた。 π 接合とは、超伝導体の位相差が π の場合が安定なジョセフソン接合のことである。 π リングにおいては、外部磁場を印加することなく自発的に量子ビットが形成される。そのため π リングは外部磁場のノイズの影響を受けない"静かな"量子ビットとなり、[欠点 1] が克服できると期待されていた。ところが π 接合においては、[欠点 4] 強磁性金属内で発生する低エネルギー準粒子が新たなデコヒーレンス源となることが明らかとなった。

その深刻な問題を解決するために、我々は強磁性絶縁体を用いても π 接合が可能になることを現象論的モデル計算により明らかにしてきた。さらに、強磁性絶縁体 π リングは低エネルギー準粒子の影響を受けない理想的な"静かな"量子ビットとなりうることを示した。

しかしながら、これまでの研究においては、強磁性絶縁体として現象論的なデルタ関数ポテンシャルが用いられており、具体的にどのような材料で π 接合が実現するのかどうかは未解決問題となっていた。そこで、最近磁性体のバンド構造を取り入れてジョセフソン電流を数値的に計算する手法を開発した。そして、強磁性絶縁体の代表物質である LBCO(La₂BaCuO₅) を利用した S/FI/S 接合の場合、 π 接合が実際に出現することを明らかにした。しかしながら、この π 接合は BCS 金属超伝導体を用いているため、量子ビットの動作温度は極低温領域のみである[欠点 2]。さらに、金属超伝導体と LBCO との良質な接合を作ることも実際は極めて困難であるため[欠点 3]、この π 接合は実用的視点からは望ましくない。

そこでこれまでの成果を基に、高温超伝導体 / 強磁性絶縁体 / 高温超伝導体 (HTSC/FI/HTSC) 接合を用いれば上記の全ての欠点[欠点 1-4]を克服した究極の"静かな"量子ビットが実現可能になると認識するに至った。

2. 研究の目的

本研究においては、以下の点を明らかにすることを目標とする。まず初年度においては、これまでの成果を集結・発展させ、HTSC/FI/HTSC 接合において π 接合が発現することを理論的に示す。また、実験的にエピタキシャル成長が可能で界面に欠陥準位が形成されない c 軸 YBCO/LBCO/YBCO 接合について検討を行う。この接合を用いることにより、[欠点 3]の界面欠陥に起因する 1/f

ノイズの問題が克服されると期待される。さらに高温超伝導体を利用しているために、従来型超伝導体量子ビットに比べて 1 桁以上高温領域で動作し、[欠点 2]が克服されると考えられる。そこで二年目は、初年度の結果を基に、超伝導リングを用いた"静かな"量子ビットの提案・素子設計を行う。

3. 研究の方法

強磁性絶縁体のバンド構造を取り入れた計算を行うために、強束縛モデルに基づく再帰的グリーン関数法を用いて、超伝導/強磁性絶縁体/超伝導接合のジョセフソン電流の計算を行う。また以上の結果を基に、高温超伝導体 π 接合量子ビットの提案を行う。

4. 研究成果

2010 年度は独自開発した高温超伝導体/強磁性絶縁体/高温超伝導体接合におけるジョセフソン電流計算プログラムを用いて現実的構造(エネルギーバンド、素子構造)を考慮したジョセフソン電流の大規模数値シミュレーションを行い、 π 接合が出現することを示した。そして π 接合発現のためにはエネルギーバンドの波数依存性が重要であることを明らかにした。さらに摂動理論を用いた解析計算を行い、 π 接合出現の物理的起源を明らかにした。そして、超伝導体/強磁性体/絶縁体/超伝導体接合における準粒子輸送理論も構築した。

2011 年度は前年度の結果に基づいて人工酸化物超格子を用いて 0 π 転移を観測する方法及びそれを利用したコヒーレント量子ビットの提唱を行った。さらに、Beenakker 公式を用いることにより有限温度領域におけるジョセフソン電流の計算を行い、温度変化によって π 接合から 0 接合へ転移が生じることも示した。またさらに、ジョセフソン臨界電流が極めて異常な温度依存性を示すことが明らかとなった。このことは実験的に接合の温度依存性を測定するだけで π 接合の検証が可能になることを意味する。そして、Bogoliubov-de Gennes 方程式を対角化することによりアンドレーフ束縛状態の観点から、温度誘起 0 π 転移の起源を明らかにした。以上の重要な成果に関して国際会議において 3 件の招待講演を行った。以上の成果により、強磁性絶縁体/超伝導体接合の量子情報デバイスとしての高いコヒーレンス性能が明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① S. Nakamura, S. Souma, M. Ogawa, and S. Kawabata, Theory of finite temperature Josephson transport through a ferromagnetic insulator, *Physics Procedia*, 査読有、 Vol. 27 (2012) 308~311, DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.472
- ② S. Kawabata, Y. Tanaka, A. A. Golubov, A. S. Vasenko, S. Kashiwaya, and Y. Asano, Tunneling Hamiltonian description of the atomic-scale $0-\pi$ transition in superconductor/ferromagnetic-insulator junctions, *Physica C*, 査読有、 Vol. 471 (2011) 1199-1201, DOI:10.1016/j.physc.2011.05.158
- ③ S. Vasenko, S. Kawabata, A. A. Golubov, M. Yu. Kupriyanov, C. Lacroix, F. S. Bergeret, and F. W. J. Hekking, Current-voltage characteristics of tunnel Josephson junctions with a ferromagnetic interlayer, *Phys. Rev. B*, 査読有、 Vol. 84 (2011) 0245241-1~0245241-11, DOI: 10.1103/PhysRevB.84.024524
- ④ S. Kawabata, Y. Tanaka, and Y. Asano, Atomic scale $0-\pi$ transition in a high-Tc superconductor/ferromagnetic-insulator/high-Tc superconductor Josephson junction, *Physica E*, 査読有、 Vol. 43 (2011) 722-725, DOI:10.1016/j.physe.2010.07.038
- ⑤ S. Kawabata, and Y. Asano, Theory of quantum transport in Josephson junctions with a ferromagnetic insulator, *Low Temp. Phys.*、 査読有、 Vol. 36 (2010) 915-919, DOI:10.1063/1.3515524
- ⑥ S. Kawabata, H. Kashiwaya, and S. Kashiwaya, Effect of Strong Coupling on Collective Macroscopic Quantum Tunneling in Intrinsic Josephson Junctions, *Physica C*, 査読有、 Vol. 470 (2010) S848~S850, DOI:10.1016/j.physc.2010.01.045
- ⑦ S. Kawabata, S. Kashiwaya, Y. Tanaka, A. A. Golubov, and Y. Asano, A tunneling Hamiltonian theory of $0-\pi$ transition in d-wave superconductor/ferromagnetic-insulator heterostructure, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有、 Vol. 248 (2010) 012039-1~012039-7, DOI:10.1088/1742-6596/248/1/012039
- ⑧ S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, A. A. Golubov, and S. Kashiwaya, Thermally induced $0-\pi$ phase transition in Josephson junctions through a ferromagnetic oxide film, *Physica C*, 査読有、 Vol. 470 (2010) 1496~1498, DOI:10.1016/j.physc.2010.05.147
- ⑨ A. S. Vasenko, S. Kawabata, A. A. Golubov, and F. W. J. Hekking, Dissipative current in SIFS Josephson junctions, *Physica C*, 査読有、 Vol. 470 (2010) 863~866, DOI:10.1016/j.physc.2010.02.081
- ⑩ A. S. H. Kashiwaya, T. Matsumoto, H. Shibata, H. Eisaki, Y. Yoshida, S. Kawabata, and 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. Exp.*, 査読有、 Vol. 3 (2010) 043101-1~043101-4, DOI:10.1143/APEX.3.043101
- [学会発表] (計 12 件)
- ① 中村周平、相馬聡文、小川真人、川畑史郎, 強磁性絶縁体を用いたジョセフソン π 接合の理論, 2012 年日本物理学年次大会, 2012. 3. 24, 関西学院大学(兵庫県)
- ② 中村周平、相馬聡文、小川真人、川畑史郎, 強磁性絶縁体を用いたジョセフソン π 接合の理論, 第 25 回量子情報技術研究会, 2011. 11. 21, 大阪大学(大阪府)
- ③ S. Nakamura, S. Souma, M. Ogawa, and S. Kawabata, Theory of finite temperature Josephson current through a ferromagnetic-insulator, 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011), 2011. 10. 24, Tokyo
- ④ A. S. Vasenko, S. Kawabata, A. A. Golubov, M. Yu. Kupriyanov, C. Lacroix, F. S. Bergeret, and F. W. J. Hekking, Current-voltage characteristics of SIFS tunnel junctions, *Superconducting hybrids: from conventional to exotic*, 2011. 9. 7,

Villard de Lans/France

- ⑤ A. S. Vasenko, S. Kawabata, A. A. Golubov, M. Yu. Kupriyanov, C. Lacroix, F. S. Bergeret, and F. W. J. Hekking, Novel features of DOS in S/F bilayer, Moscow International Symposium on Magnetism (MISM2011), 2011.8.21, Moscow/Russia
- ⑥ S. Kawabata, Y. Tanaka, S. Kashiwaya, A. S. Vasenko, A. A. Golubov, and Y. Asano, Theory of Josephson transport through ferromagnetic insulators and semiconductors, Moscow International Symposium on Magnetism (MISM2011), 2011.8.21, Moscow/Russia
- ⑦ A. A. Golubov, A. S. Vasenko, S. Kawabata, M. Yu. Kupriyanov, F. S. Bergeret, and F. W. J. Hekking, Dynamic properties of SIFS Josephson Junctions, Moscow International Symposium on Magnetism (MISM2011), 2011.8.21, Moscow/Russia
- ⑧ S. Kawabata, S. Kashiwaya, Y. Tanaka, A. A. Golubov, and Y. Asano, Novel Josephson π -state in a Ferromagnetic Insulator, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2011), 2011.1.12, NTT 物性科学基礎研究所(神奈川県)
- ⑨ S. Kawabata, S. Kashiwaya, Y. Tanaka, A. A. Golubov, and Y. Asano, Theory of Josephson π -state in a Ferromagnetic Insulators, Superconductivity and Magnetism: Hybrid proximity nanostructures and intrinsic

phenomena (SM2010), 2010.9.10, Salerno/Italy

- ⑩ S. Kawabata, and Y. Asano, Theory of π -junction in a mesoscopic ferromagnetic-insulator/superconductor or hybrid structure, The 6th International Conference on the Physics and Applications of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI), 2010.8.3, 東京大学(東京都)
- ⑪ S. Kawabata, Y. Asano, S. Kashiwaya, Y. Tanaka, and A. A. Golubov, and Y. Asano, Atomic-scale $0-\pi$ transition in a superconductor/ferromagnetic-insulator or heterostructure, The International conference on Theoretical Physics: Dubna-Nano2010, 2010.7.8, Dubna/Russia
- ⑫ S. Kawabata, and Y. Asano, Josephson transport through a ferromagnet/superconductor hybrid structure and its application to quantum bit, International Symposium on Physics of Quantum Technology (CREST2010), 2010.4.8, 国立情報学研究所(東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川畑 史郎 (KAWABATA SHIRO)
産業技術総合研究所・ナノテクノロジー研究
部門・主任研究員

研究者番号 : 30356852