

平成21年6月22日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19710085

研究課題名（和文）強磁性体ジョセフソン接合を用いた量子コンピュータの理論

研究課題名（英文）Theory of quantum computer using ferromagnetic Josephson junctions

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・ナノテクノロジー研究部門・主任研究員

研究者番号：30356852

研究成果の概要：

本研究においては、強磁性絶縁体を用いたジョセフソン接合の量子輸送及び巨視的量子ダイナミクスの理論・数値解析を行い、その基礎物性の予測及びコヒーレンス評価を行う。そして、強磁性絶縁体ジョセフソン接合が量子ビットとして有望な素子となりうることを明らかにする。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	390,000	3,790,000

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,巨視的量子トンネル現象

## 1. 研究開始当初の背景

量子ビットは、量子コンピュータを実現するための最も重要な構成要素である。近年、高密度集積化が可能な超伝導体ジョセフソン接合を用いた量子ビットの研究が盛んに進められている。現在最も実証研究が進展している超伝導量子ビットは、超伝導/絶縁体/超伝導接合(S-I-S接合)から構成される磁束量子ビットである。磁束量子ビットにおいては外部から磁場を印加することにより量子二準位系を形成する。しかし、現実の外部磁場は不安定であるために、外場の揺らぎの影響でコヒーレンス時間が抑制されるという深刻な問

題が存在し、このことは実用化のための大きな障害となっている。一方、超伝導/強磁性金属/超伝導接合(S-FM-S接合)においては、位相差が $\pi$ の場合に系が安定となる $\pi$ 接合が形成される。そのため、強磁性金属 $\pi$ 接合を構成要素とする磁束量子ビットにおいては、磁場を印加することなしに量子二準位系が形成できる。そのため外場の揺らぎの影響を全く受けない“静かな量子ビット”が実現できる。しかし、強磁性金属 $\pi$ 接合量子ビットには致命的欠陥がある。それは、強磁性体金属中における低エネルギー準粒子の存在である。通常のS-I-S接合量子ビットにおいては絶縁体が障壁として用いられており、準粒子励起の

問題は生じなかった。しかし、強磁性体金属  $\pi$  接合においては、強磁性金属中に低エネルギー準粒子励起が発生し、それにより量子ビットのコヒーレンス時間が著しく短くなってしまふ。このことはこれまでの研究において見落とされていたことであり、技術的に取り除くことの出来ない本質的かつ致命的欠陥である。従って、この問題を回避することなしに真の静かな量子ビットの実現はあり得ない。これまで研究代表者は、NEDO-SYNAF (2005) 及びオランダ NanoNED-project (2006) において強磁性絶縁体を強磁性金属の代わりに用いても自発的に二準位系が形成されうること理論的に明らかにした。また、強磁性絶縁体  $\pi$  接合における巨視的量子トンネル現象 (MQT) についても理論的に解析を行い、準粒子励起が MQT にもたらす影響は強磁性金属  $\pi$  接合の場合に比べて無視できるほど小さくなることを示した。MQT とは巨視的量子自由度であるジョセフソン接合の位相差が起こすトンネル現象のことであり、量子コンピュータ動作における最も基本的な物理過程である。これらの成果は強磁性絶縁体  $\pi$  接合 (図 1) が、“静か” かつ準粒子デコヒーレンスの影響を全く受けない究極の量子ビットになりうることを強く示唆している。研究代表者は、これまで用いてきた解析手法を発展・拡張させることにより、強磁性絶縁体研究代表者接合量子ビットの高いコヒーレンス性を示すことができると考え、本研究を開始した。

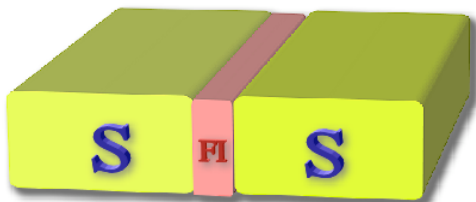


図 1 超伝導体/強磁性絶縁体/超伝導体ジョセフソン接合の模式図

## 2. 研究の目的

本研究においては強磁性絶縁体を用いたジョセフソン接合の輸送特性を理論的に解明する。そして、静かな量子ビット実現に必要な  $\pi$  接合出現の条件を明らかにする。また、強磁性絶縁体ジョセフソン接合を用いた超伝導量子ビットの提案を行い、真に“静か” かつ準粒子散逸の無い究極の量子ビットが実現できることを示す。

## 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、強束縛模型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 (図 2) 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、 $\pi$  接合量子ビットの提案及びデコヒーレンス解析を行う。

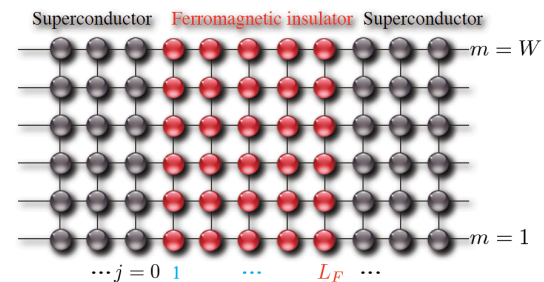


図 2 ジョセフソン接合の二次元格子モデル

## 4. 研究成果

2007年度は、 $\pi$  接合が出現する条件を量子散乱理論に基づいて明らかにした。また、単一の  $\pi$  接合から構成される  $\pi$  接合位相量子ビットのアーキテクチャ提案を行った。そして、提案した  $\pi$  接合位相量子ビットの読み出し過程におけるデコヒーレンス解析を行い、従来の 0 接合の場合に比べて準粒子散逸の影響が著しく小さくなることを示した。これにより高い精度で量子ビットの読み出しが可能となることがわかった。また、強磁性絶縁体のエネルギーバンド構造を考慮にいたしたジョセフソン電流の数値計算プログラムを作成し、大規模数値シミュレーションを行った。そして LSCO などの (アップスピンバンドとダウンスピンバンドがフェルミ面を境に完全分離した) 完全偏極強磁性体を用いたジョセフソン接合の場合、 $\pi$  接合が出現することを理論的に明らかにした。また、原子スケールで膜厚を増やしていくと  $\pi$  接合から 0 接合へ転移することも明らかにした (図 3)。この結果を基に、電流をバイアスした強磁性絶縁体  $\pi$  接合における巨視的量子トンネル現象の解析を行った。そしてトンネル確率は準粒子散逸によってほとんど減少しないことを明らかにした。

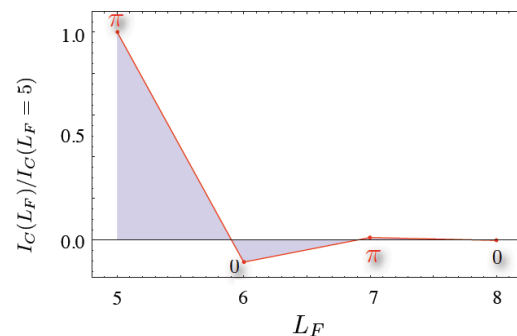


図 3 ジョセフソン臨界電流の膜厚  $L_F$  依存性

2008年度は、Euカルコゲナイドなどのスピンフィルター材料を介したジョセフソン効果に関して大規模数値シミュレーションを行った。その結果、スピンフィルター効果のみでは $\pi$ 接合は生じないが、局在電子と価電子との間の軌道混成が大きければ、 $\pi$ 接合が実現可能であることを明らかにした(図4)。さらに、スピンフィルター材料の膜厚を変化させると0接合から $\pi$ 接合へ交互に転移を引き起こすという興味深い新奇現象を見出した。また、超伝導電極が高温超伝導体の場合にも拡張を行い、その動作温度が金属超伝導体に比べて大きく向上することも分かった。

以上の研究を基に、強磁性絶縁体 $\pi$ 接合を用いた位相量子ビットの提案もを行い、量子コンピュータとして非常に高いポテンシャルを有することが明らかにした(図5)。

上記の成果は世界的にも高く評価され、合計二件の国際会議で招待講演を行い、国内外の研究機関において6件の依頼セミナー(フランス、ドイツ、オランダ、日本)を行った。

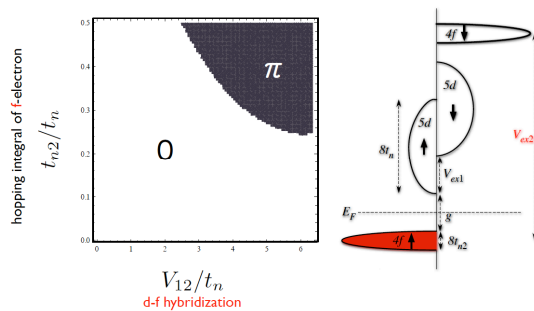


図4 Euカルコゲナイドを介したジョセフソン電流の0- $\pi$ 相図とEuカルコゲナイドのバンド構造の模式図

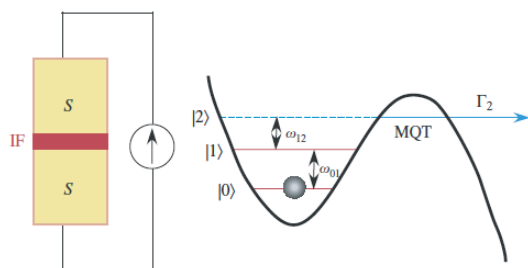


図5 強磁性絶縁体を用いた位相量子ビットの模式図とその動作原理

## 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12件)

① S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, and S. Kashiwaya, Effect of d-f hybridization on the Josephson current through Eu-chalcogenides, Physica C, 受理 (2009) 有

② S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, S. Kashiwaya and A. A. Golubov, Cooper pair transport and macroscopic quantum dynamics in Josephson junctions through ferromagnetic insulators, Physica C, 468, 701-704 (2008) 有

③ S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, S. Kashiwaya and A. A. Golubov, Cooper pair transport and macroscopic quantum dynamics in Josephson junctions through ferromagnetic insulators, Physica C, 468, 701-704 (2008) 有

④ S. Kawabata, A. A. Golubov, Ariando, C. J. M. Verwijs, H. Hilgenkamp, and J. R. Kirtley, Macroscopic quantum tunneling and quasiparticle-tunneling blockade effect in s-wave/d-wave hybrid junctions, Physical Review B, 76, 064505-1~064505-6 (2007) 有

⑤ T. Yokoyama, S. Kawabata, T. Kato, and Y. Tanaka, Theory of Macroscopic Quantum Tunneling in High-Tc c-Axis Josephson Junction Physical Review B, 76, 134505-1~134505-4 (2007) 有

⑥ S. Kawabata and A. A. Golubov, Macroscopic Quantum Tunneling in pi Josephson Junctions with Insulating Ferromagnets and its Application to Phase Qubits, Physica E, 40, 386-389 (2007) 有

[学会発表] (計16件)

① S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, and S. Kashiwaya, Atomic-scale 0- $\pi$  transition in ferromagnetic-insulator based Josephson junctions, Joint JSPS-NES International Conference on Nanoscience and Engineering in Superconductivity, 2009. 3. 24, つくば市

② S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, and S. Kashiwaya, Josephson  $\pi$ -junction through spintronics materials, International Symposium on Nanoscience and Quantum Physics, 2009. 2. 23, 東京

③ S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, and S. Kashiwaya, Theory of Josephson effect

through spintronics materials, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (NTT2009), 2009. 1. 21, 厚木市

④ S. Kawabata, Theory of  $\pi$ -junction using spin filtering barrier, The 23rd Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop Spin Transport in Condensed Matter, 2008. 11. 11, 京都市

⑤ S. Kawabata, Y. Asano, Y. Tanaka, and S. Kashiwaya, Effect of s-f hybridization on the Josephson current through spin filters, 21st International Symposium on Superconductivity (ISS2008), 2008. 10. 29, つくば市

⑥ S. Kawabata, Theory of  $\pi$ -junction using spin filtering barriers, XXXII International Workshop on Condensed Matter Theories (CMT32), 2008. 8. 15, Loughborough/イギリス

⑦ S. Kawabata,  $\pi$  junction formation in Josephson junctions with ferromagnetic insulator: physics and qubit application, Lorentz Workshop on Physics of Nanoscale Superconducting Heterostructures, 2007. 7. 2, Leiden/オランダ

⑧ S. Kawabata, and Y. Asano, Cooper pair transport and macroscopic quantum dynamics in Josephson junctions through ferromagnetic insulators, Joint ESF and JSPS Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors, 2007. 9. 13, Rhodes/ギリシャ

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

## 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

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者