

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887053

研究課題名(和文)異種秩序状態の混成によって生じるスピン輸送現象の理論的研究

研究課題名(英文)Theoretical study of spin transport in heterogeneous order state

研究代表者

挽野 真一(Hikino, Shin-ichi)

独立行政法人理化学研究所・柚木計算物性物理研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：80587923

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：1)強磁性ジョセフソン接合において、スピン三重項クーバー対によって長距離スピン流が強磁性体中を伝播することを理論的に示した。2)超伝導/強磁性絶縁体/超伝導(S/FI/S)接合において、S/FI/S接合を用いると直流電圧のみでスピンポンピングを利用する事が出来ることを示した。3)強磁性ジョセフソン接合を用いると電流電圧特性を用いて高感度にbreathing mode測定することが可能であることを示した。4)2つの超伝導体で挟まれた常伝導体の上下に強磁性絶縁体を接合したデバイスは、低ジュール熱のスイッチングデバイスに応用できることを示した。

研究成果の概要(英文)：1)We have theoretically predicted that long-range spin current is driven by phase difference between two superconductors in ferromagnetic Josephson junction. 2)We have shown that superconductor/ferromagnetic insulator/superconductor junction is a promising potential of this junction as spin pumping device by applying DC voltage.3)We have proposed how to observe the breathing mode of domain wall by the Josephson junction having a ferromagnetic layer, with a magnetic domain wall between superconducting electrodes. 4)We have theoretically studied the Josephson effect in a superconductor/normal metal/superconductor (S/N/S) Josephson junction composed of s-wave Ss with N which is sandwiched by two ferromagnetic insulators (Fs), forming a spin valve, in the vertical direction of the junction. We have shown that $0-\pi$ transition can be freely controlled. It is expected that result indicates a promising potential of this junction as a $0-\pi$ switching device.

研究分野：物性理論

キーワード：強磁性ジョセフソン接合 超伝導体 強磁性体

1. 研究開始当初の背景

近年の微細加工技術の発展に伴って、電子スピンを実験的に制御することが可能となり、従来の電子の電荷によって動作する電子デバイスを凌駕するデバイス開発を目指す「スピントロニクス」と呼ばれる分野が注目されている。スピントロニクスでは、電子の電荷に加えて、電子のスピンも輸送現象に利用する。この電子スピンに依存した輸送現象で重要な役割を担っているものは、スピン流と呼ばれるスピン角運動量の流れである。例えば、スピン流は、強磁性体の磁化の向きを制御するために用いられ、不揮発性メモリへの利用が考案されている。また、スピン流を生成する方法として、強磁性体と常伝導体の接合を作り、マイクロ波を強磁性体に照射して励起されるスピン波を利用してスピン流を生成するスピンプンピングがデバイスに利用されている。スピン流を生成するスピンプンピングは、交流および直流磁場、そして空洞共振器を必要としており、デバイス構造が複雑である。更に、スピン流は、電流とは異なり保存量ではないために、試料中をある距離伝搬すると消失してしまう。従って、スピン依存伝導現象を理論的に研究し、如何に効率良くそして簡単なデバイス構造でスピン流を生成するのかが、スピントロニクスにとって重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、スピン流を簡単なデバイス構造で生成する方法、スピン流の長距離伝搬の可能性、強磁性体の磁壁の運動を測定する原理、そして、低消費電力のメモリとして利用が期待されるデバイスの理論的提案を行うことである。

3. 研究の方法

数値計算法および解析的計算による方法

4. 研究成果

[1]

2層構造の強磁性体を2つのs-波超伝導体(S)で挟んだS/F1/F2/S接合において、強磁性体を流れるスピン流を理論的に調べた。スピン流を計算するために用いる手法は、準古典Green関数法である。超伝導体および強磁性体は、拡散伝導領域である場合を想定してUsadel方程式を解いた。その結果、図1に示したようにスピン流その結果、図1に示したようにスピン流(実線)は、超伝導体間の位相差によって電圧降下無しで強磁性体中を流れる事が分かった。S/F1/F2/S接合における位相差駆動によるスピン流の起源は、近接効果によって強磁性体中に誘起されるスピン三重項クーパ対(STC)である。そのために、このスピン流は、F中を長距離に渡って伝搬することが可能となり、効率良くスピン流を伝搬させることが出来る。従って、超伝導/強磁性多重接合を流れるスピン流は、強磁性

体中を長距離伝搬することが出来るために、スピントロニクスへの応用が期待できる。更に、本研究で取り扱う接合系では、ジョセフソン電流(点線)が実質的にゼロになるにも関わらず、スピン流(実線)は有限になる事も分かった。この結果は、クーパ対のスピンと電荷の自由度を分離することが出来ることも示唆している。

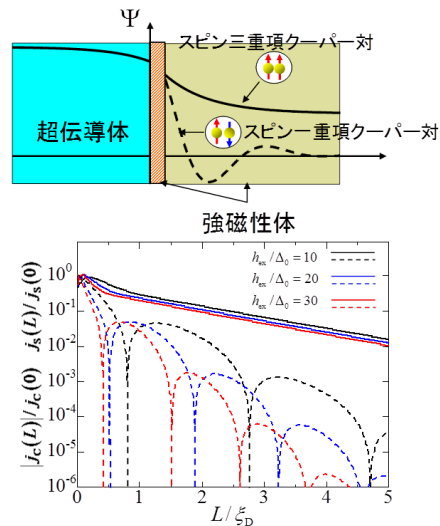


図1. 超伝導/強磁性接合におけるクーパ対の波動関数の空間変化の概念 (上)スピン流(実線)とジョセフソン電流(破線)の強磁性体の膜厚依存性(下)

[2]

強磁性ジョセフソン接合(FJJ)におけるスピン波励起を伴った場合のFiske共鳴の理論を構築した。まず、交流ジョセフソン電流によって接合内に生じる電磁場をMaxwell方程式強磁性体(F)の動的磁化に対してはランダウ-リフシッツ-ギルバート(LLG)方程式を用いる。Maxwell方程式とLLG方程式を連立させて解くことにより求めた電場を動的な位相差の式を用いて、Fiske共鳴によって誘起される直流ジョセフソン電流を計算した。その結果、FJJにおいても各電磁場のモードに対して直流ジョセフソン電流が現れることが分かった。更に、FJJにおけるFiske共鳴では、各電磁場のモードに対して2つの直流ジョセフソン電流が現れることも分かった。この結果は、電磁場とスピン波の結合によって、各共振モードに対してFiske共鳴の共鳴電圧が通常のジョセフソン接合とは異なり2つ持つことを示している。これは、FJJを用いると直流電圧のみでスピンプンピング(スピン流を生成する方法)を利用する事が出来ることを示唆している。

[3]

図2に示した磁壁を含む強磁性細線を2つ

の超伝導体で挟んだ強磁性ジョセフソン接合において、磁壁幅が時間変化する場合

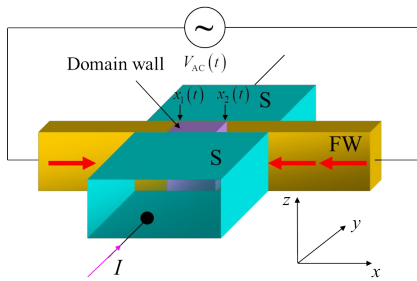


図 2. 強磁性細線(FW)を2つの超伝導体(S)で挟んだ強磁性ジョセフソン接合. 磁壁の幅は時間に依存して変化する場合(Breathing mode).

(breathing mode と呼ぶ)の電流電圧特性を理論的に計算した。ジョセフソン電流と磁気との結合を取り込んだRSJモデルを解くと、電流電圧特性は階段状の構造を示した。この結果から、磁壁幅の振動数の整数倍に比例定数をかけた電圧のところで、電流電圧特性が階段状に変化していることを明らかにした(図3参照)。そして、その比例係数は、プランク定数と素電荷という基礎物理定数のみで決まることが分かった。この結果から、強磁性ジョセフソン接合を用いたbreathing modeを高感度に測定することができることを明らかにした。

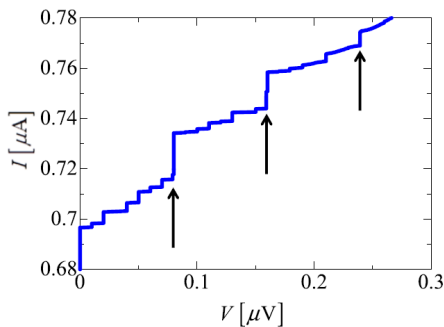


図 3. Breathing modeが生じている場合の強磁性ジョセフソン接合における電流電圧特性.

[4]

図4に示したように2つの超伝導体(S)で挟まれた常伝導体(N)の上下に強磁性絶縁体(FI)を接合した場合のジョセフソン接合のジョセフソン電流を考察した。FIからNへの磁気的近接効果を考慮した場合、Nは磁化する。その結果、図5に示したようにFI間の磁化が平行(P)の場合、ジョセフソン接合は π 状態になることが分かった。また、FI間の磁化が反平行(AP)の場合、ジョ

セフソン接合は0状態になることが分かった。この結果は、強磁性絶縁体の磁化の向きを変えることで0- π 転移を自由に制御できるジョセフソン素子となりうることを示唆している。

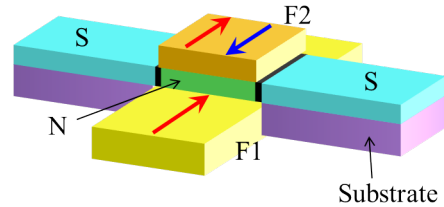


図 4. 成果[4]で考察したジョセフソン接合の概念図. Sは超伝導体、F1およびF2は強磁性絶縁体、Nは常伝導体、そしてSubstrateは基板を表す. 赤と青の矢印は強磁性絶縁体の磁化の向きを表す.

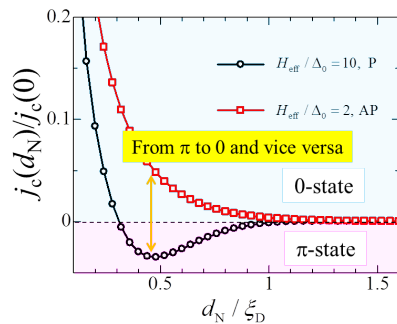


図 5. ジョセフソン接合を流れるジョセフソン臨界電流 j_c の常伝導体(N)の厚さ d_N 依存性. H_{eff} は N に誘起される有効交換エネルギー. P は磁化が平行、AP は磁化が反平行であることを示す. Δ_0 は絶対零度における超伝導ギャップ. ξ_D はコヒーレンス長.

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 3 件)

[1] S. Hikino, M. Mori and S. Maekawa: "Zero-Field Fiske Resonance Coupled with Spin-waves in Ferromagnetic Josephson Junctions", J. Phys. Soc. Jpn. 83, 074704 (2014). 査読有り.

[2] M. Mori, W. Koshibae, S. Hikino, and S. Maekawa: "Possible method to observe breathing mode of magnetic domain wall in Josephson junction", J. Phys.: Condens. Matter 26, 255702 (2014). 査読有り.

[3]S. Hikino and S. Yunoki : “ $0\text{-}\pi$ Transition Driven by Magnetic Proximity Effect in a Josephson Junction”, J. Phys. Soc. Jpn. 84, 024712 (2014). 査読有り.

〔学会発表〕(計 3 件)

[1]挽野真一、柚木清司、”金属多層膜を持つジョセフソン接合における奇周波数スピン三重項クーパ対によって誘起される磁化およびその制御”，日本物理学会第70回年次大会，発表年月日：2014年9月21日，会場名：早稲田大学 早稲田キャンパス，東京都・新宿区西早稲田.

[2]S. Hikino and S. Yunoki, “Spin current carried by spin-triplet Cooper pair in a Josephson junction composed of s-wave superconductors and double layer ferromagnets”, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, Grenoble, France, 2014年7月，発表年月日：2014年7月7日.

[3]挽野真一、柚木清司、”スピンバルブと磁氣的近接効果を利用したジョセフソン接合の $0\text{-}\pi$ スイッチング効果”，日本物理学会2014年秋季大会，発表年月日：2014年3月7日，会場名：中部大学，春日井キャンパス，愛知県・春日井市松本町.

6. 研究組織

(1)研究代表者

挽野 真一 (HIKINO Shin-ichi)
理化学研究所・柚木計算物性物理研究室・
基礎科学特別研究員
研究者番号：8058797923