《表　題》

スピン注入による近藤状態の人工的操作

Manipulation of a Kondo state using spin injection technique

（日本物理学会推薦）

研究代表者 東京工業大学 谷山智康　　Tokyo Institute of Technology Tomoyasu TANIYAMA

《英文サマリー》

Spin injection into a nonmagnetic material has attracted much interest for the development of novel spin electronic devices. Recently, we have studied spin accumulation effect on the Kondo state of CuFe alloy, indicating that spin polarized electrons suppress the Kondo effect, while a full description of the spin accumulation effect on the Kondo effect has not been clear, yet.

In this study, we report on spin accumulation effect on the Kondo state of CuFe wires using lateral spin valve structures with a CuFe/Co wire junction. Also, spin accumulation effect at a CuFe/GaAs interface is investigated under optical spin orientation condition which excites spin polarized electrons in GaAs efficiently. These combined results indicate that spin accumulation in the Kondo alloy CuFe suppresses the Kondo effect due to the splitting of chemical potentials for spin-up and spin-down channels near the interfaces. The results are discussed in detail.

《本　文》

研究目的

微量の磁性不純物原子を貴金属中に固溶した物質の磁気状態が、磁性物理学において広く研究されている。この状態は磁性不純物原子の局在エネルギーと磁性不純物原子－伝導電子間のクーロン相互作用に依存し、特に伝導電子スピンが磁性不純物スピンを遮蔽するような状態を近藤状態と呼ぶ。近藤状態は磁性不純物スピンと伝導電子スピンとのスピン反転散乱に起因して生じるため、磁性不純物スピンのエネルギー状態、伝導電子スピンのエネルギー状態に極めて敏感に応答する。実際、近藤状態に磁場を印加することにより、磁性不純物スピンのエネルギー状態を変化させ、近藤状態を消失させるような実験的研究が報告されている。しかしながら、伝導電子のエネルギー状態を変化させるといった研究は全く行われていない。

一方、最近の磁性体微細加工技術の進展により、スピン偏極した伝導電子を人為的に物質中に注入することができるようなマイクロ・ナノスケール試料を作成することが可能となり、これにより伝導電子のエネルギー状態を変化させることが可能となりつつある。本研究では、近藤状態にスピン偏極電子を外部から注入し、近藤合金における伝導電子状態を変化させ、近藤状態が如何に振る舞うかと言った物理的に極めて興味深い現象を実験的に探求する。そして、伝導電子のスピン状態、磁性不純物のスピン状態の双方の変化に起因する近藤現象の人工的操作の可能性までを検討する。

研究経過

1．局所電極配置を持つ強磁性金属／近藤合金接合におけるスピン注入

強磁性金属Coから近藤合金CuFeにスピン偏極電子を電気的に注入するため、Co／CuFe細線接合を電子線リソグラフィーおよび超高真空成膜装置（初期真空度：5×10^{-10} Torr）を用いて作成した。具体的には、Si基板上に電子線リソグラフィーを用いてCo細線をパターニングし、その後、Co細線パターンの位置に合わせCuFe接合を形成した。作成した接合試料の走査型電子顕微鏡（SEM）写真をFig.1に示す。電流をCo端子よりCuFe端子に注入し、注入端近傍の電極を用いて電気抵抗を測定する。電流方向を変化させることにより、電気抵抗がどのように変化するかを計測し、界面状態とスピン注入の関係を検討した。

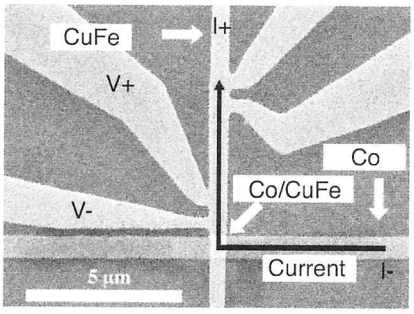

Fig.1　SEM image of a Co/CuFe local spin injection device.

2．非局所電極配置を持つ強磁性金属／絶縁層／近藤合金接合におけるスピン注入

強磁性金属Coから近藤合金CuFeにスピン偏極電子を電気的に注入し、その際に生じる、Co／CuFe界面でのスピン依存化学ポテンシャルの変化を計測するために、Co／AlOx／CuFe接合を前述と同様の手法を用いて作成した。作成した接合試料のSEM写真をFig.2に示す。Fig.2におけるI+およびI-間に電流を流し、その際に生じる非局所電極V+およびV-間の電圧を計測した。本手法では、電圧端子間に電流を流さないため、接合界面付近でのスピン蓄積による効果のみを検出することが可能である。

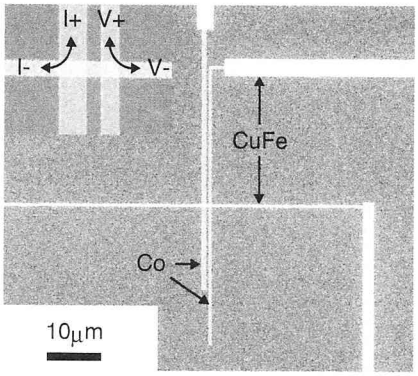

Fig.2 SEM image of a Co/AlOx/CuFe non-local spin valve device

3．円偏光スピン励起を利用した近藤合金薄膜／半導体接合におけるスピン注入

直接遷移型半導体GaAsにバンドギャップエネルギーを持つ円偏光を照射することで、光学遷移の選択則に基づいてGaAs中にスピン偏極電子を励起することができる。このスピン偏極電子がCuFeの電気抵抗に及ぼす影響を調べるために、膜厚30 nmのCuFe薄膜をp-GaAs(001)基板上に成長し、波長800 nmの円偏光をGaAsに照射し、円偏光照射時、無照射時におけるCuFeの電気抵抗の変化を計測した。これにより、光学的スピン注入による近藤状態への影響を検討した。P型GaAsを用いることで励起したスピン偏極電子がCuFe/GaAs界面でのSchottky障壁の形成に伴うバンドベンディングにより、効率的にCuFe中に注入されることを期待している。

考察

1．局所電極配置を持つ強磁性金属／近藤合金接合における電流方向依存電気抵抗

Fig.1 の局所電極配置を持つスピン注入試料に対して測定した CuFe 端子間電圧を電流値で除した値（電気抵抗：V/I+, V/I-）の温度依存性を Fig.3 に示す。同一温度で大小と変化している●印（×印）で表示したデータは、電子流方向を Co から CuFe、CuFe から Co へと変化させた時の電気抵抗に対応する。すなわち、Co/CuFe 接合部分で電子流が CuFe から Co に流入するとき（V/I-）には、20 K 付近で通常の近藤合金で観測される電気抵抗の極小が観測される。一方、電子流方向を Co から CuFe に流入させるときには、電気抵抗の極小温度以下において、CuFe 端子間電圧が減少する傾向が観測される。この効果は Co/CuFe 界面において発生したスピン蓄積による効果として理解させる。接合界面の極近傍では CuFe 中の Fe が Co のモーメントとは配列し、その結果、Fe スピンの局在準位の分裂が生じる。このとき電子流方向が Co から CuFe に流入すると、界面付近に生じるスピン蓄積の方向と Fe 局在スピンの方向とが一致し、スピン反転散乱としての近藤散乱が抑制され、低温における電気抵抗の上昇が抑えられる。一方、電子流の方向が CuFe から Co に流入するときには、スピン蓄積の方向が Fe の局在スピンの方向と逆向きとなり、近藤散乱は抑制されることなく、低温で電気抵抗の上昇が現れる。また、スピン注入電流の値を大きくすると、より高温までこの効果が顕著になる傾向が見られる。以上のように、局所電極配置でのスピン注入の効果は定性的に理解させる。

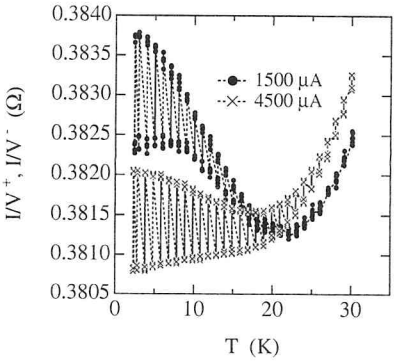

Fig.3 Resistance of a CuFe wire near the Co/CuFe interface for two opposite current directions.

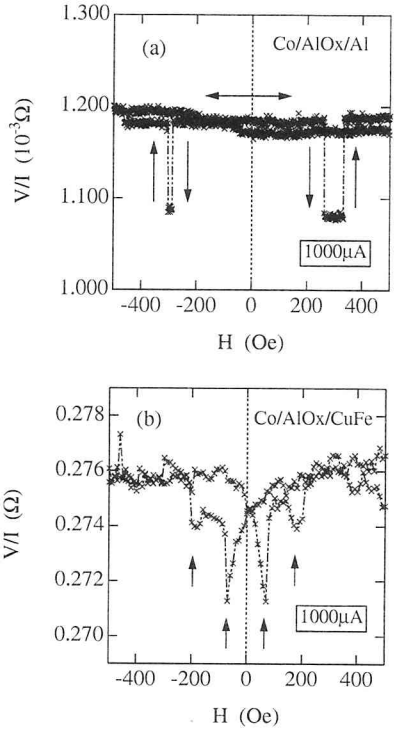

Fig.4 Field dependence of the voltage drop between V+ and V- terminals of non-local spin valve devices with (a) a Co/AlOx/Al junction and (b) a Co/AlOx/CuFe junction.

2．非局所電極配置を持つ強磁性金属／絶縁層／近藤合金スピンバルブにおける起電力の磁場依存性

Fig.2に示す非局所電極配置を持つ二つのスピンバルブ試料（(a)Co/AlOx/Al接合、(b)Co/AlOx/CuFe接合）に対する電圧端子間起電力の磁場依存性をFig.4(a)(b)に示す。図中のI+、I-間に交流電流1000 mAを流した時に非局所電極V+、V-間に発生する電圧変化を計測し、電流値で除した値を磁場に対してプロットしてある。ここで、磁場方向はCo細線軸と平行である。Co/AlOx/Al試料では、±300Oe付近にCo細線の磁化反転に対応した明瞭な起電力のとびが観測される。これは、接合界面付近において発生するスピン蓄積（スピンアップ、スピンダウンに対応する化学ポテンシャルの分裂）の方向とCoの磁気モーメントの方向との相対的関係により、非局所電極間に異なる起電力が発生することにより定性的に理解される。一方、Co/AlOx/CuFe試料においては、Co/AlOx/Al試料のように単純ではなく、正負の磁場領域においてそれぞれ、二つの起電力のとびが観測される。Co/AlOx/CuFe試料においても同様の非局所電極配置を用いていることから、これらのとびがCoの磁気抵抗を計測しているとは考えにくく、スピン蓄積効果と関連した現象を検出していると考えている。その詳細については現在の検討事項であり、今後の研究により明らかにされるものと期待される。

3．円偏光照射時におけるCuFe/GaAs接合試料の電気抵抗変化

膜厚 30 nm の CuFe 薄膜を p-GaAs 基板上に成長した接合薄膜に対して測定した CuFe の電気抵抗の温度依存性を Fig.5(a)に示す。CuFe の電気抵抗の温度変化は基本的に上記の Si 基板上のものと一致しており、近藤効果に特徴的な低温で電気抵抗の上昇を示す。この試料を用いて 5K において電気抵抗を連続測定し、円偏光の照射、非照射を繰り返した結果が Fig.5(b)である（光学遷移の選択則に基づいて GaAs 中に最大スピン偏極率 50%のスピン偏極電子を励起され、CuFe 中に注入されることが期待される）。GaAs

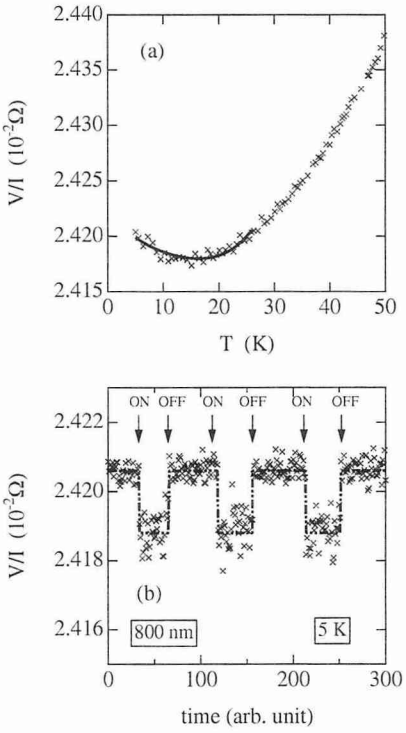

Fig. 5 (a)Resistance of a CuFe thin film as a function of temperature, and (b) changes in the resistance of the CuFe thin film under circular polarized light illumination at 5 K.

上の円偏光を照射すると、電気抵抗が減少し、照射を止めると電気抵抗値はもとの値に瞬時に戻る様子が見て取れる。この結果は、スピン注入により CuFe の近藤効果が抑制された可能性を示唆している。しかしながら、電気抵抗値の変化は非常に小さく、光照射で発熱した結果、試料部の温度が局所的に上昇したため、電気抵抗値が減少した可能性を否定できない。一方、照射光強度を上昇させると、照射時の抵抗の平均値に大きな変化は見られなかったが、その測定毎のばらつきが大きくなる傾向が観測された。その原因については現在のところ未定であるが、スピン注入の効果がある程度影響を及ぼしている可能性が示唆される。

研究発表

口頭発表

1. 谷山智康、山崎陽太郎、Jan Martinek；「近藤状態へのスピン偏極電子の注入とその電気抵抗」、日本物理学会（青森、2004）.

誌上発表

検討中