

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18340084  
 研究課題名（和文） 強磁性金属の磁化反転に伴う静電的効果の研究  
 研究課題名（英文） Electrostatic effects associated with magnetization reversal in ferromagnetic metals  
 研究代表者  
 島田 宏（SHIMADA HIROSHI）  
 電気通信大学 電気通信学部 准教授  
 研究社番号：60216067

研究成果の概要： 強磁性細線を中央電極とし、非磁性金属をソース、ドレイン電極としてもつ単一電子トランジスタを作製し、その低磁場での磁気クーロン特性から、磁化反転にともなう単一電子レベルでの磁気・電気結合効果の存在を明らかにした。また、磁化反転時に発生する磁壁に伴うことが予想される電気2重層検出用素子、強磁性単一電子トランジスタで発生する異常磁気バルブ効果への高次トンネル過程の寄与を峻別するための素子、磁化反転の帯電効果による抑制を観測するための素子を作製した。さらに、磁場駆動の単一電子能動素子として、強磁性単一電子箱を試作した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	6,700,000円	2,010,000円	8,710,000円
平成19年度	2,400,000円	720,000円	3,120,000円
平成20年度	1,800,000円	540,000円	2,340,000円
年度			
年度			
総計	10,900,000円	3,270,000円	14,170,000円

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：メゾスコピック系・局在、強磁性単一電子素子

#### 1. 研究開始当初の背景

1990年代に電子線描画技術等の微細加工技術が強磁性体の研究にも導入され、微小な強磁性体に関する新たな知見が得られるようになった。研究代表者等は、1990年代後半に強磁性金属を電極材料とする単一電子素子を作製し、磁気クーロン振動や異常磁気バルブ効果といった強磁性トンネル効果と単一電子帯電効果の複合した新奇な磁気・電気結合効果を見出した。その結果、強磁性金属の磁化反転やそれに関わる磁壁には、静電的な性質が付随することが予想された。それ

らが、実験的に確認できれば、微小強磁性金属の性質として、新たな側面を明らかにすることになり、今後のスピントロニック・デバイスの開発にも有用な知見をもたらすことが期待された。

#### 2. 研究の目的

本研究では、特に単磁区をもつ微細な強磁性金属の磁化反転過程には、静電的な効果を伴うことを実験的に明示し、その結果を踏まえて、強磁性細線の磁化反転を利用した磁場駆動の単一電子能動素子の実現が可能で

あることを例証することを目的とした。

### 3. 研究の方法

まず、初年度から2年度にかけて、強磁性単一電子素子を作製するための要素技術として、プラズマ酸化プロセス用のゲルマニウム製蒸着マスク・プロセスの導入、重ね電子線描画技術の導入、強磁性細線での磁壁トラップの確認、エレクトロマイグレーション法によるナノギャップの作製法の導入、またそれを用いた微小単一電子トランジスタ作製法の確立等を行った。

これらを用いて、2年度から3年度には、1個のみ強磁性細線を電極としてもつ単一電子トランジスタ (SET) を作製し、低磁場での磁気クーロン振動の観測から磁化反転に伴う単一電子レベルでの磁気・電気結合効果を調べた。次に、強磁性細線が磁化反転する際に発生する単一磁壁の両側の静電位変化を観測し、磁化反転に際して磁壁に電気2重層が伴うことを検証する素子を作製した。また、平行して、強磁性 SET で見られる異常磁気バルブ効果の発生メカニズムを調べるため、Ge マスクと3方向蒸着を用いて (強磁性) / (強磁性) / (非磁性) の電極構成をもつ SET を作製した。さらに、磁化反転の帯電効果による抑制を調べるため、ナノギャップを用い強磁性金属微粒子を中央電極とする極微小 SET を作製した。それらの特性を調べた。磁場駆動の能動素子の例として、強磁性単一電子箱の試作も行った。

### 4. 研究成果

(1) 強磁性細線を中央電極とする強磁性単一電子トランジスタ (SET) の磁気クーロン振動と強磁性細線の磁化反転

これまで作製例のある強磁性単一電子トランジスタは、(強磁性) / (強磁性) / (強磁性) あるいは、Al / (強磁性) / Al という電極構成をもち、単一の強磁性金属の低磁場での振る舞いを観測することができていなかった。一方、磁化反転過程の観測には、まさにそのような低磁場領域での観測が必要であった。

そこで、本研究では、Cr/Co/Cr の電極構成を持ち、トンネル障壁を  $\text{Al}_2\text{O}_3$  とした SET を作製し、低磁場領域の磁気クーロン振動を観測し、Co 電極の磁化反転に伴う変化を調べた。

図2はその測定結果であり、Co 電極の保磁力と考えられる 2 kOe 付近で磁気クーロン振動の等位相線の傾きが極性を変えることが分かる。これは、磁場と磁化の相対的な方向に依存して、強磁性電極の Fermi エネルギーの磁場による変化の方向が異なることを意味しており、磁気クーロン振動の理論モデルを検証する結果である。また、磁化と磁場の向きがそろっている強磁場での等位相線の

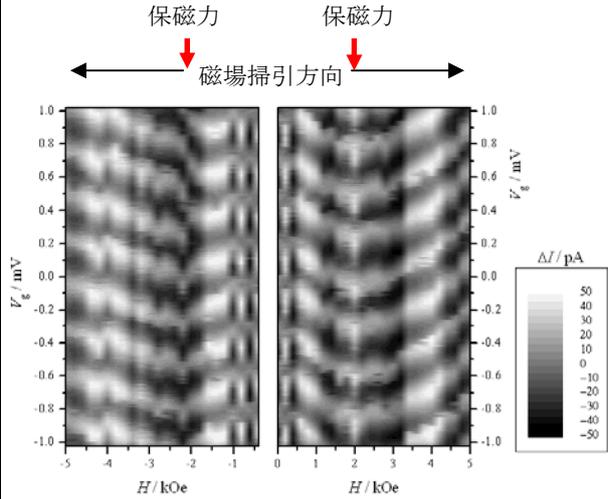


図1 Cr / Co / Cr-SET の磁気クーロン振動。V=7mV, T=100 mK

傾きは、Co 電極の全スピン偏極が負であることを示しており、これまでの理論・実験の結果と一致する。以上の結果は、理論的に予測した強磁性金属の磁化反転に伴う単一電子レベルでの磁気・電気結合効果の存在を実証する結果である。

(2) 磁壁に伴う電気2重層検出用素子

電子線描画装置を用いて 100nm 程度の位置ずれでの重ね描画技術を導入した。これを用いて、磁壁トラップ用のくびれをもつ線幅 200 nm 程度の Co 細線を試料とし、その上に  $\text{SiO}$  膜を堆積させて絶縁をとり、くびれの両側に静電位変化検出用の Cr 製単一電子トランジスタの中央電極を静電容量的に結合した素子を試作した。(図2)

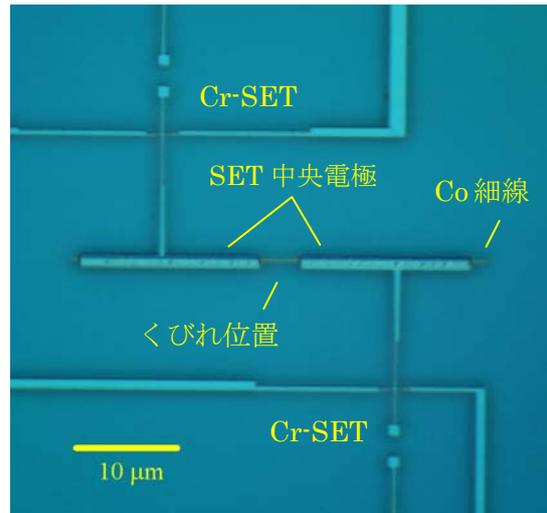


図2 磁壁に伴う電気2重層を検出するための、くびれをもつCo細線とそれに静電容量で結合したCr-SET

磁壁トラップへの磁壁のピン留めを  $H=500 \pm 100$  Oe で確認した。発生する静電位差  $\Delta\phi$  は、 $|P| \mu_B g/e \approx 10 \mu\text{V}/\text{kOe}$  程度であり、保

磁力を 500 Oe とすると、5  $\mu$ V 程度が予想される。ただし、 $P$  は Co のスピン偏極、 $\mu_B$  は Bohr 磁子、 $g$  は Landé の  $g$  因子である。単一電子トランジスタと Co 細線との結合容量は 7 fF 程度と見積もられ、予想される静電位差による SET での誘起電荷は  $\delta q \sim 0.2e$  となった。設計した素子デザインで、電気 2 重層の発生を充分観測可能であることが見込まれる。

本研究期間の終了時点で、Cr-SET の動作が磁場中で安定せず、磁壁両側の静電位の変化を確認するまでには至っていない。今後、是非測定を成功させ、磁壁に伴う静電的効果を定量的に実証する所存である。

### (3) 異常磁気バルブ効果強磁性/強磁性/非磁性 SET

保磁力の異なる 2 種の強磁性金属を電極材料とする (強磁性 1) / (強磁性 2) / (強磁性 1) の電極構成の単一電子トランジスタでは、いわゆる強磁性トンネル接合で見られる磁気バルブ効果が、理論限界を超えて増大することが Ni/Co/Ni-SET などについて実験的に示されている。その発生機構については、高次トンネル過程を考慮した様々な理論モデルが提案されているが、定量的な一致が得られず、高次トンネル過程以外にその原因を求める取り組みも行われている。

高次トンネル過程は、単一電子トランジスタの 2 個のトンネル接合をほぼ同時に電子がトンネルする 2 次の共トンネル過程を最低次の過程とする様々なトンネル過程である。2 次の過程の場合、それぞれの強磁性トンネル接合の磁気抵抗が 2 次のべきでトンネル電流に寄与することになり、磁気抵抗が増倍されると考えられる。

本研究では、この現象について、高次トンネル過程の寄与を峻別するために、(強磁性 1) / (強磁性 2) / (非磁性) という電極構成の素子の作製を試みた。このような素子では、2 次の共トンネル過程には、接合のトンネル磁気抵抗が 1 次しか寄与しないため、高次トンネル過程がこの現象の起因であるな

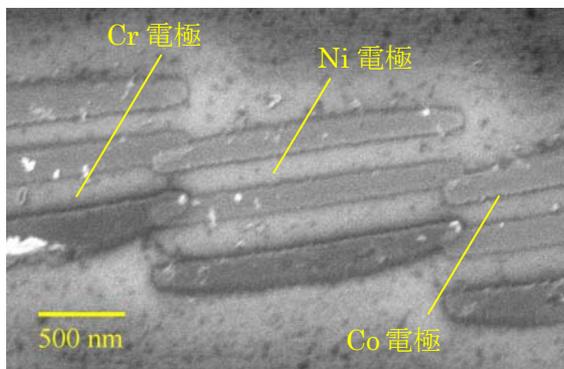


図 3 強磁性トンネル接合を 1 個もつ強磁性 SET. 電極材料は Cr / Ni / Co.

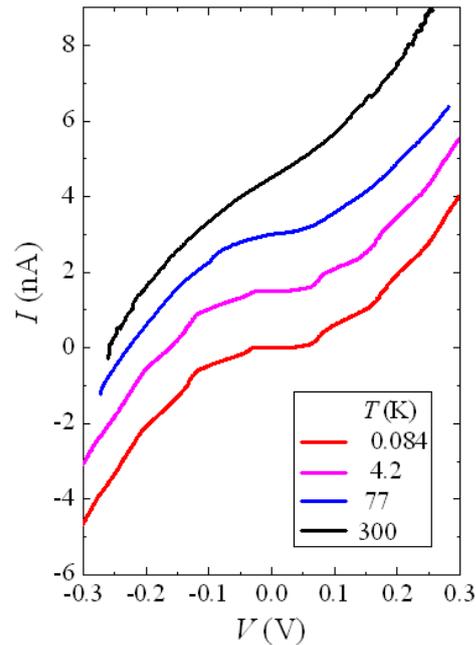


図 4 ナノギャップを用いた Au / Co / Au 極微小 SET の電流・電圧特性の温度変化

ら、この種の素子では異常磁気バルブ効果はほとんど現れないはずである。

素子は、Ge 薄膜マスクを用い強磁性金属のプラズマ酸化プロセスによるトンネル障壁の作製を導入して作製した。図 3 は Co/Ni/Cr の電極構成をもつ単一電子トランジスタの試作例である。

### (4) ナノギャップを用いた極微小強磁性 SET

(1) で示したように、磁化反転には単一電子レベルでの磁気・電気結合効果が伴う。そこで、強磁性金属で出来た中央電極を小さくし、磁化反転時における磁気的エネルギーの変化量  $E_M$  を小さくすると共に、中央電極のもつ静電容量を小さくして帯電エネルギー  $E_c$  を大きくする場合、

$$E_M \sim E_c$$

では、帯電効果により磁化反転が抑制される可能性がある。たとえば、直径 10 nm 厚さ 0.5 nm の円盤状の Co を考えると、保磁力を 1 kOe と仮定すると、 $E_M \leq 70 \text{ meV} \approx 800 \text{ K}$  が得られる。一方直径 10 nm の微粒子を中央電極とする SET でこの電極のもつ帯電エネルギーは 300-700 K という報告がある。そこで、このような効果の検出を目指して、ナノギャップ中に 10 nm 程度の直径をもつ強磁性金属微粒子を落として、これによって極微小単一電子トランジスタを作製することを試みた。

基板上に金細線を作製し、これにエレクトロマイグレーション法で 10 nm 程度の亀裂を作り、Co を薄く蒸着することによって作製した。基板は、表面に 300 nm の厚みをもつ酸化膜をもつ高ドーピング Si 基板を用い、低温でも導電性を保つ基板自体をゲート電極とし

た。図4はそうにして作製したAu/Co/Auの電極構成をもつ極微小単一電子トランジスタの電流-電圧特性の温度変化の測定結果である。

室温ですでに帯電効果による非線形伝導が起こっていることがわかる。4.2 K以下では、いわゆるクーロン階段が観測された。クーロン階段の測定結果に理論曲線をフィットすることによって、 $E_c \sim 230$  Kが得られた。ほぼ意図した素子が出来ていることが分かる。

開発した作製プロセスでは、導電性基板とソースあるいはドレイン電極とのリークが避けられず、トランジスタのゲート特性を得るには至らなかった。今後プロセス改善を図り、当初の目的である磁化反転のクーロン閉塞の観測を目指す所存である。

## 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 2件)

- ① Y. Mizugaki, H. Hakii, M. Moriya, K. Usami, T. Kobayashi, and H. Shimada, Tunnel Magnetoresistance in Ferromagnet-Superconductor-Ferromagnet Single-Electron Transistors with Different Lead Spacings up to 50  $\mu\text{m}$ , Japanese Journal of Applied Physics, vol. 46, L901-L903, 2007. 査読有り
- ② H. Shimada, S. Hanadou, H. Kido, T. Kawai, and Y. Mizugaki, Current Doublers Based on the Quantum Current-Mirror Effect, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 47, 8131-8136, 2008. 査読有り

[その他]

本研究に関連した修士論文

[電気通信大学大学院 電気通信学研究科  
量子・物質工学専攻]

(平成18年度)

石本英彦、単一電子トランジスタを用いた  
微小強磁性金属の物性研究

(平成19年度)

片貝彰夫、微小強磁性トンネル接合の作製  
と磁気伝導特性

鳴海唯、ナノギャップを用いた微小単一電  
子トランジスタの研究

(平成20年度)

熊谷俊、強磁性細線中の磁壁のもつ静電的  
性質の研究

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

島田 宏 (SHIMADA HIROSHI)

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号：60216067