

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	安藤 冬希
論文題目	強磁性金属 Co における磁性の電界効果の微視的起源と応用		
(論文内容の要旨)			
<p>典型的な強磁性3d遷移金属であるCoを対象とした磁性の電界効果について行われたものである。ゲート電極/誘電体/強磁性材料というキャパシタ構造を用いることで、外部電界によって強磁性材料中の電子密度を変調し磁性を制御することができる。本論文では、電子密度の変化が磁性に及ぼす影響の機構解明およびその応用可能性の開拓に焦点を当てた研究を行った。</p> <p>まず一つ目の研究課題は、強磁性金属Coにおける「キュリー温度の電界変調の微視的起源」の解明である。キュリー温度は強磁性材料の最も基本的な物理量の一つであり、2011年にCo薄膜におけるキュリー温度の電界変調が報告された。しかし、その変化は電子密度の増減から予想される結果と逆の傾向を示しており、ゆえに物理的機構がこれまで理解されていなかった。本研究では、キュリー温度の電界変調の微視的起源として交換相互作用定数<math>J_{ex}</math>の電界変調に着目し、両者の相関を実験的に明らかにすることを目的とした。Pt/Co/MgO薄膜試料に高誘電層HfO<sub>2</sub>、ゲート電極Cr/Auを積層したキャパシタ構造を作製した。ゲート電圧の印加によってCo/MgO界面に電荷が蓄積される。この試料の低温における磁化の温度依存性を超伝導量子干渉磁束計によって測定し、その結果をブロッホ則でフィッティングすることによって<math>J_{ex}</math>の値を求めた。本研究では、電界印加下で磁化の温度依存性を測定することにより、<math>J_{ex}</math>の電界変調を初めて評価した。また、キュリー温度の電界変調についても、転移点付近の磁化の温度依存性をベキ乗則で解析することによって評価を行った。これらと比較したところ、<math>J_{ex}</math>とキュリー温度の電界変調がほとんど一致することが明らかとなった。この結果を近年行われたPt/Co系のバンドの第一原理計算と照らし合わせると、「電界の印加によってCoの3d軌道の電子数が変化した結果、<math>J_{ex}</math>およびキュリー温度が変化している」と解釈される。以上の考察から、キュリー温度の電界変調の微視的な起源を実験的に明らかにした。</p> <p>2つ目の研究課題は、強磁性金属Coにおける「電極形状を利用した磁区の電界書き込み」の実証である。磁性の電界制御には、ジュール損失がほとんど発生しないために超省電力で磁性を操作できるというメリットがある。従って、電界によって局所的に磁性を制御することを前提とした磁気回路は数多く提案されており、電気的な測定によって確かめられた例もある。本研究では、ゲート電極の形状によって任意の領域の磁性のみを変調し、室温で磁区の書き込みが可能であることを実証する。試料は上記と同様のPt/Co/MgO垂直磁化膜を使用し、フォトリソグラフィ法とArイオンミリングによって細線状に加工した。キャパシタ構造を作製する際に、ゲート電極の形状を網目型に加工した。磁気光学カー効果顕微鏡を使用して、この試料の電界印加下での磁化反転過程を室温で観察した結果、ゲート電極と同形状の磁区を書き込むことができることを実証した。また、電界印加下で異常ホール抵抗測定を行い、磁区の電界書き込みが可能となる理由が、保磁力つまり磁気異方性の電界変調のためであることを示した。</p>			

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、強磁性3d遷移金属であるCoについて、「キュリー温度の電界変調の微視的起源」および「電極形状を利用した磁区の電界書き込み」の2つの内容で構成されている。

「キュリー温度の電界変調の微視的起源」の研究では、Co薄膜の交換相互作用定数 $J_{ex}$ の変化に着目し、キュリー温度の電界変調との比較を行った。低温におけるスピン波近似のもと、磁化の温度依存性の測定・解析することによって $J_{ex}$ の電界変調を評価した。さらに、同一の試料に対して、臨界点近傍での磁化の温度依存性からキュリー温度の電界変調の評価を行った。双方の電界変調率を比較したところ、交換相互作用定数とキュリー温度の電界変調の相関関係を実験的に明らかにした。これは、キュリー温度の電界変調の起源が交換相互作用定数の変化であることを意味している。また、複数の試料についてこの相関関係が再現することを確認している。先行研究である第一原理計算によれば、本研究で観測された $J_{ex}$ の変化は電界によるCoの電子数とp-d軌道混成の変化から説明されている。以上の実験及び理論は、先行研究であるキュリー温度のスレーター・ポーリング曲線と矛盾することなく、キュリー温度の電界変調の微視的な起源を説明しており、強磁性金属における磁性の電界効果のさらなる深い理解をもたらすものである。今後、磁性の電界効果をデバイス応用上での材料検討に役立つと考えられる。

「電極形状を利用した磁区の電界書き込み」では、磁性の電界変調を利用して任意の磁区構造をパターンニングできることを光学的な観察手法によって実証した。なお、実験は全て室温下にて行われた。本手法は電界によるCoの電子密度の変化を介して磁性を制御しているために、高速かつ省エネルギーで磁区構造を制御できる可能性を提示しており、磁壁レーストラックメモリ、あるいは磁気スキルミオンを利用したメモリへの応用が考えられる。さらに、この磁区構造のパターンニングが保磁力、つまり磁気異方性の電界変調によって生じていることから、任意の位置の磁気異方性を変調できることを意味している。従って、局所的にスピン波の励起周波数を変化させることによって、スピン波の電界効果トランジスタを作製できると考えられる。あるいは、網目構造をスピン波の波長程度の周期に加工すれば、周期的な磁気ポテンシャルの電界変調によってスピン波の伝搬を許容・禁止することができると考えられる。このように、本実験で示した電極形状による磁区の電界書き込みは、近年シミュレーションにより提唱されている電極形状を利用したスピン波素子の電界制御が原理的に実現可能であることを示唆している。以上の実験結果は、将来的な低消費電力磁気記録素子およびスピン波論理回路の設計の一助となるものと考えられる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降