

# 学位論文の要約

題目 強磁性金属薄膜における電界効果

氏名 山田 貴大

## 主論文要旨

電子回路に組み込まれている電界効果トランジスタ(FET)では、半導体の外部電界による電気伝導特性の変化が利用されている。磁性が電子の持つスピンの秩序現象であることから、同様の手法を用いて磁性体の電荷密度を変えれば、磁性も制御できるのではないかと予想される。2000年に Ohno らは、強磁性半導体(In, Mn)Asにおいて強磁性転移温度の電界制御を実現し、磁性の電界制御を世界ではじめて実証した。現在では、電界による磁性の制御が可能な物質は強磁性半導体から強磁性金属へと広がりを見せており、桁違いに低い消費電力で書き込み動作が可能な次世代の磁気デバイスへの応用を目指した研究が盛んに行われている。

本研究も強磁性金属薄膜における磁性の電界制御を主題としている。電界誘起磁化反転の磁気デバイスへの応用への目指す上で、高い磁気相転移温度、熱安定性を有する強磁性金属薄膜は非常に重要な物質である。金属の電子密度は非常に大きく、外部電界の効果はすぐに遮蔽されてしまうものと考えられるが、強磁性金属の膜厚が数原子層になると界面の役割が顕著になるため、外部電界による磁氣的性質の変調が可能になる。これまでに、磁気異方性、磁化、磁気相転移温度等の電界による制御が報告されている。その起源はフェルミ面の電界による位置変化であると考えられている。しかしながら、その機構に関して理論面からの提案は多くなされているが、実験的な事実が明らかに不足しており、その詳細な機構は現状では不明瞭であると言える。

本研究の大きな目的は、実験の側面から強磁性金属薄膜における電界効果の機構を明らかにすることである。さらに、それを前提にして、研究ごとに異なる目的を据えた。磁氣的性質の電界変調に関して系統的な調査を行うこともそのひとつである。具体的には、スピンおよび軌道磁気モーメントの電界による変化を観測し、他のマクロな磁氣的性質(磁気異方性等)との関連性を導き出すことが目的である。また、本分野の大きなテーマでもある、磁化状態の電氣的な制御に関する研究を行った。より具体的には、磁化反転障壁を電界によって制御し、超常磁性状態のコントロールすることが目的である。

## 1. 強磁性金属 Co における電界効果

本研究の目的は、垂直磁気異方性を有する Pt/Co を対象として磁性の電界変化について系統的な調査を行い、各磁氣的性質の電界誘起変化に関連性を導き出すことである。本研究では Ta/Pt 下部電極、HfO<sub>2</sub>/MgO 絶縁層、Co/Pt 強磁性金属層で構成された素子を用いた。作製した素子にゲート電圧を印加すると、Co の磁性に変化が見られる。Co のキュリー温度と垂直磁気異方性は正のゲート電圧を印加した際に増加する。さらに、ゲート電圧の印加による磁気モーメントの変化を調査するために、SPring-8 において磁気円二色性(XMCD)および X 線吸収分光法(XAS)測定を行った。XMCD スペクトルにはゲート電圧の印加による明瞭な変化が見られた。さらに、総和則を用いた解析を行った結果、V<sub>G</sub> の印加によって、軌道磁気モーメントの面内方向成分はほとんど変化しないにもかかわらず、面直成分は明瞭に変化することが明らかになった。また、XAS スペクトルに Co の酸化状態が変化した兆候がまったく見られなかったことから、磁氣的性質の変化は化学反応ではなく主に静電的な電荷蓄積によって生じているものと考えられる。得られた軌道磁気モーメントの変化は磁気異方性の変化と直接関連付けることができる。Co や Fe では、スピン軌道相互作用によって、軌道磁気モーメントの異方性が磁気異方性と関係することが知られている。この関係性に基づくと、軌道磁気モーメントの面直成分が正のゲート電圧で増加するという結果は、正のゲート電圧で磁気異方性が増強するという結果とコンシステントである。

## 2. 強磁性 Pt における電界効果

Pt のような強磁性に近い常磁性金属に強磁性金属を接合させると、接合界面付近に比較的大きな磁気モーメントが誘起されることが知られている。このような強磁性近接効果によって Pt 中に誘起された強磁性を対象に、実験的な側面から強磁性金属薄膜における電界効果の起源解明を目的に研究を行った。合成ガラス基板上に積層された Pd/Co/Pt/MgO 多層膜を電気二重層トランジスタ(EDLT)状に加工し、輸送測定および放射光測定に使用した。実験では、大きな電界を Pt 層に印加するために、固体絶縁体ではなくイオン液体を利用している。本系の磁気異方性は正のゲート電圧を印加時に増加する。さらに、同素子を SPring-8 に持っていき、XMCD および XAS 測定を行った。面直方向に磁化を飽和させたときにのみ、負のゲート電圧を印加することで Pt の L<sub>3</sub> 吸収端において測定した XMCD スペクトルに有意な増強が見られた。これは、Pt の軌道磁気モーメントの垂直成分のみが V<sub>G</sub> の印加によって影響を受けるということの意味している。さらに、XAS においても V<sub>G</sub> の印加によって有意な変化が見られた。また、Pt の酸化状態の変化は非常に小さく、本研究においても変化は静電的な電荷蓄積によってもたらされていると考えられる。さらに、正、負電圧で得ら

れた XAS スペクトルの差分をとり、電子構造の変化に関して考察を行ったところ、強磁性 Pt の電界効果においては 2 つの異なる機構が存在していることが明らかになった。ひとつは、電界を印加によって生じるフェルミ面の位置の変化である。さらに、もうひとつは、電界による軌道混成の変化である。密度汎関数理論に基づいた第一原理計算でも同様の結果が得られたことから、得られた結論は妥当であると考えられる。明らかになったメカニズムは Co や Fe 等の広範囲の強磁性金属における電界効果でも支配的に成り得る。よって、本研究は強磁性金属薄膜における電界効果に関する重要な知見を与えるものであると考えられる。

### 3. 超常磁性の電氣的制御

本研究の目的は、磁化状態の電氣的な制御である。強磁性体が超常磁性状態にあるときにも、その磁化の安定性は系の磁気異方性や飽和磁化に強く依存性している。そのため、それらを電氣的に制御することで超常磁性状態をコントロールすることが可能であると予想される。試料には、GaAs 基板上にスパッタ法によって作製した Ta/Cu/Ni/MgO 多層膜を使用した。Ni 層が超常磁性的な挙動を示す。これは、Ni 層が Cu 層と混ざりがクラスター状になっているためと予想される。素子は Cu/Ni 超常磁性薄膜/イオンフィルム/Pt 箔で構成された電気二重層キャパシタ構造になっている。イオンフィルムにはイオン液体が含まれており、Ni と Pt との間に電位差をつけることで大きな電界を Ni 層に印加することができる。超常磁性状態は緩和時間と測定時間が釣り合うブロッキング温度で評価することができる。本論文ではゼロ磁場冷却磁化曲線のピークを  $T_B$  と定義した。ブロッキング温度はゲート電圧の印加によって非常に大きな変化を示した。よって、静電的な電荷蓄積の他に化学反応も得られた結果に寄与しているものと予想される。ブロッキング温度の変化は磁化反転のエネルギー障壁の高さが変化したことを意味しており、本結果は磁気デバイスでも重要な磁化の安定性を電氣的に制御できることを意味している。