

MnAs 強磁性ナノ微粒子の動的な磁化特性の研究

東京工業大学理工学系研究科電子物理工学専攻

PHAM NAM HAI

要旨

本研究では、MnAs 強磁性ナノ微粒子を含む磁気トンネル接合においてトンネル磁気抵抗効果(TMR)を用いて、MnAs ナノ微粒子の動的な磁化特性を明らかにした。その結果、低温において、MnAs ナノ微粒子の非平均状態から平均状態に遷移するのに、約 410-535 ミリ秒がかかると分かった。また、磁化ヒステレシスにおいても、外部磁場の変化率に応じて、ヒステレシスの残留磁化成分および保磁力も系統的に変化することを観測した。以上の動的な磁化特性をモンテカルロ法によるシミュレーションでよく再現できた。

1. 研究目的

本研究では、MnAs 強磁性ナノ微粒子を含む磁気トンネル接合を作製し、トンネル磁気抵抗効果(TMR)を用いて、従来の技術では観測が難しいミリ秒台の強磁性ナノ微粒子の動的な磁化特性を明らかにする。本研究の手法によって、強磁性ナノ微粒子を用いた超高密度磁気抵抗メモリや単電子スピントランジスタなどのナノスピndeバイスを設計するのに必要な動的な磁化特性を解明することができる。

2. 研究成果

■ トンネル磁気抵抗効果を用いたミリ秒台の動的な磁化特性の観測

図1に本研究で用いた強磁性ナノ微粒子を含む磁気トンネル接合素子の模型図を示す。この素子はトップからMnAs 薄膜 / AlAs 半導体トンネル障壁 / GaAs:MnAs からなる。

MnAs 薄膜の保磁力が大きいので、スピンの参照層として働く。一方、MnAs ナノ微粒子は外部磁場の変化、微粒子間の相互作用、さらに熱励起による影響を受けて、磁化が時間的に変化する。トンネル素子の抵抗は

トンネル磁気抵抗効果によって強磁性ナノ微粒子集団のそれぞれの磁化向きに依存するため、トンネル抵抗の時間軸の変化を観測することによって、強磁性ナノ微粒子集団のミリ秒台の動的な磁化特性の変化を観測できる。

図2に MnAs (20 nm) / GaAs (1 nm) / AlAs (2.2 nm) / GaAs:MnAs (5 nm, Mn 4.8 %) の素子において、MnAs ナノ微粒子の集団が MnAs 上部電極と (a) 平行な磁化状態 (外部磁場 $H = 2$ kG) からの磁化緩和および (b) 反平行状態 (外部磁場 $H = -2$ kG) からの磁化緩和を反映するトンネル電流の時間変化の様子を示す。この図から分かるように、MnAs ナノ微粒子の非平均状態から平均状態に遷移するのに、約 410-535 ミリ秒がかかると分かった。この数値は超伝導量子干渉計(SQUID)を用いた磁化測定に必要な 10 秒程度よりも遥かに高速であることが分かり、本手法の有効性を確認できた。



図1. MnAs 薄膜 / AlAs 半導体トンネル障壁 / GaAs:MnAs からなる磁気トンネル接合。トンネル抵抗の時間軸の変化を見ることによって、強磁性ナノ微粒子のミリ秒台の動的な磁化変化を観測できる。

図3 (a)に同じ素子におけるトンネル磁気抵抗効果を用いて、導出した MnAs ナノ微粒子集団の磁化ヒステシスを示す。この図において、外部磁場の変化率を 0.45 kG/s → 0.92 kG/s → 1.85 kG/s → 2.73 kG/s → 3.59 kG/s と徐々に上げながら、トンネル磁気抵抗を測定した。図3 (a)から分かるように、高速な外部磁場変化において、MnAs ナノ微粒子の磁化緩和が追いつかず、見かける上の残留磁化および保磁力が増大することが分かる。

■ モンテカルロ法を用いたシミュレーションによる数値計算

この磁化特性の変化をモンテカルロ法によるシミュレーションを用いて、検討した。MnAs ナノ微粒子に働く各磁場成分（外部磁場、双極子相互作用、異方性磁場）が強磁性微粒子系のエネルギー一次のように含まれている。

$$H = -K \sum_i V_i \frac{(\vec{m}_i \cdot \vec{e}_i)^2}{|\vec{m}_i|^2} - \sum_{i \neq j} J_{ij} \vec{m}_i \cdot \vec{m}_j - \sum_{i \neq j} \frac{3(\vec{m}_i \cdot \vec{n}_{ij})(\vec{m}_j \cdot \vec{n}_{ij}) - \vec{m}_i \cdot \vec{m}_j}{d_{ij}^3} - \sum_j \vec{H} \cdot \vec{m}_j$$

以上の式には第1項が異方性磁場、第2項が微粒子間の交換相互作用、第3項が双極子相互作用、第4項が外部磁場の成分を表す。図3 (b)にモンテカルロシミュレーションの結果を示す。実験結果を良く再現できたことが分かる。

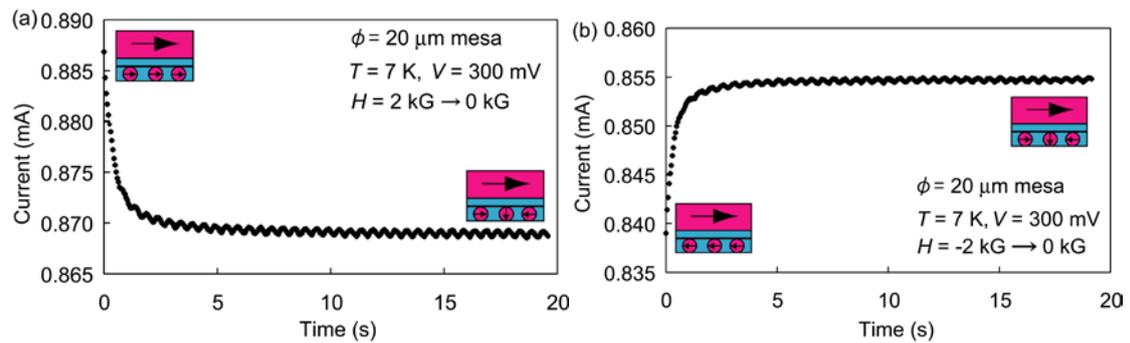


図2. MnAs ナノ微粒子集団が MnAs 上部電極と (a) 平行状態から、(b) 反平行状態からの磁化緩和。

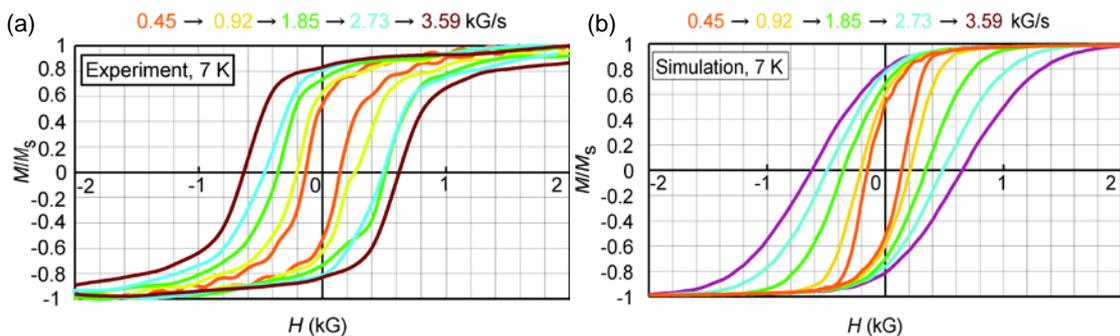


図3 (a) 様々な外部磁場変化率における MnAs ナノ微粒子の磁化ヒステシスの測定結果、(b) モンテカルロシミュレーションによる磁化ヒステシスの計算結果。

3. 本研究に関する論文発表

1. T. Dietl, K. Sato, T. Fukushima, A. Bonanni, M. Jamet, A. Barski, S. Kuroda, M. Tanaka, Pham Nam Hai, H. Katayama-Yoshida, Rev. Mod. Phys., 掲載決定。
2. Pham Nam Hai and Masaaki Tanaka, Phys. Rev. B, 投稿予定。