

## Thermally assisted spin transfer torque switching of amorphous GdFeCo for magnetic random access memories

(MRAM応用に向けたアモルファスGdFeCo層の熱アシストスピン注入磁化反  
転の研究)

代 兵

モバイルコンピューティングの普及、データセンターにおける膨大な情報の処理など情報化社会の発展に伴う情報量の幾何級数的な増大に対して、従来の **SRAM**, **DRAM**, フラッシュメモリなどのメモリシステムは、その微細加工技術の限界、エネルギー消費の低減、書き換え回数の制約などの点で多くの技術課題に直面している。これらの課題を解決するひとつの手段として、高密度記録、高速性、低消費電力、ランダムアクセス性、無制限の書き換え回数などの特性を合わせ持つ不揮発メモリの開発が求められている。不揮発メモリとしては、すでにフラッシュメモリが広く利用されているが、書き込み速度が **DRAM** などに比べて大幅に遅い点、書き換え回数に制限がある点、微細化の限界に近づいている点など、ユニバーサルなメモリとして利用を考えた場合、そのパフォーマンスは十分とは言えない。これに対し、他の方式の不揮発メモリとして、相変化メモリ、抵抗変化メモリ、強誘電体メモリ、磁気ランダムアクセスメモリなどが提案され、世界的に精力的な開発が行われている。これらのうち、相変化メモリ、抵抗変化メモリは、スケーラビリティの点で利点があると考えられているが、実用化には至っておらず、強誘電体メモリは、限定的な分野で一部実用化されているものの微細化に問題が残されている。一方、高密度化に適したスピントランスファートルク書き込み型の磁気ランダムアクセスメモリ(**STT-RAM**)は、**DRAM** 並みの高速性、スケーラビリティ、低消費電力、無制限の書き換え回数などの特徴を合わせ持ち、ユニバーサルメモリとして期待が集まっている。**STT-RAM** は、スピンバルブ型磁気トンネル接合においてスピン偏極電流によってストレージ層の磁化方向を制御する技術であり、スケーラビリティに利点があると考えられているが、記録の熱安定性を保持しながら書き込み電流を低減することが大きな課題となっている。記録の熱安定性と書き込み電流の低減はトレードオフの関係にあるため、低集積のデバイスでは両者を同時に満たすことができるものの **DRAM** 並みに高集積したデバイスを実現するためには、大きなブレークスルーが必要である。

本研究では、高密度の **STT-RAM** を実現するための基礎技術として、アモルファス希土類-遷移金属合金層をメモリ層とする熱アシスト型のスピン注入磁化反転技術の開発に取り組んだ。具体的には、メモリ層として、垂直異方性を有するアモルファス **GdFeCo** 層を用い、スピン注入電流により直接 **GdFeCo** 層を磁化反転させるタイプの素子、および、室温における大きな直磁気異方性と低いキュリ

一温度をもつ TbFe 層を GdFeCo 層と交換結合させた 2 層膜をメモリ層として、熱アシスト効果の増強を狙った 2 種類の素子について検討を行った。

第 1 章では、相変化メモリ、MRAM、フラッシュメモリなど、各タイプの不揮発メモリの動作原理とそれぞれの特長、現在の技術課題などについてまとめるとともに、本研究で取り上げる STT-RAM 開発の現状について述べた。また、本研究の背景となる磁気抵抗効果、すなわち、異方性磁気抵抗効果、巨大磁気抵抗効果(GMR)、トンネル磁気抵抗効果(TMR)について概説するとともに、本研究で取り上げる STT-RAM の構造やスピン注入磁化反転の研究例などについて述べた。最後に STT-RAM を実用化するための課題と本研究の目的を示した。

第 2 章では、GdFeCo および TbFe/GdFeCo 交換結合膜を利用したスピン注入素子のスパッタ成膜とその微細加工による作製プロセスについて述べた。本研究で検討した巨大磁気抵抗(GMR)膜は、Si / Ta (10 nm) / CuAl (150 nm) / 固定層 / Cu (3 nm) / メモリ層 / Cu (5 nm) / Ta (5 nm) の膜構成である。ここで固定層としては、Pd/Co 多層膜および TbFeCo 合金膜を、メモリ層としては前述の GdFeCo および TbFe/GdFeCo 交換結合膜を用い、その成膜条件について詳述した。膜法線方向へ電流を流す GMR 素子(CPP-GMR 素子)への加工は、電子線リソグラフィと光リソグラフィ、 $Ar^+$ イオンエッチングを組み合わせて行ったが、これらの原理、作成条件についても本章にまとめた。作成した膜の磁気特性、電気伝導特性の評価方法についても本章にまとめている。

第 3 章では、メモリ層として GdFeCo 単層膜を利用したときのスピン注入特性をまとめた。GMR 構造の GdFeCo 層の磁化曲線より、希土類リッチの組成では、GdFeCo 層と固定層の磁化は平行に結合するのに対し、遷移金属リッチでは、反平行に結合することが見出された。これは Cu 層を介した交換結合によるもので、微小 CPP-GMR 素子における組成判定法として利用できる可能性がある。Gd 組成 21.4~24.1at%、寸法  $120 \times 180 \text{ nm}^2$  の素子において、上述の Cu 層を介した交換結合をキャンセルする外部磁界の印加の下でスピン注入磁化反転が観測され、抵抗変化の値より GdFeCo 層の磁化全体が反転しているの見積もられた。電流を Pd/Co 層から GdFeCo へ流した場合には、GdFeCo 層の磁化方向を Pd/Co 層の磁化方向と平行に、また、逆向きに電流を流した場合には、反平行にするスピン注入磁化反転に特徴的な抵抗変化が確かめられた。磁化反転を起すための臨界電流  $J_c$  は、 $1.6 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$  と見積もられ、この値は、磁気抵抗比が非常に低いこと、および GdFeCo 層が 10nm と比較的厚いことを考慮すると、なかり低い値であることが分かった。また、臨界電流  $J_c$  は、Gd 組成を増すとともに増加することが分かった。この結果は、Gd 組成増加による実効垂直異方性  $K_{\text{eff}}$  の増加で説明できることが分かった。次に、GdFeCo 層のスピン注入磁化反転の臨界電流  $J_c$  の温度依存性を調べ、 $J_c$  が室温から  $70^\circ\text{C}$  までの温度変化に対して、徐々に低下する結果を見出した。温度上昇に対する  $J_c$  の減少は、温度に対して同様に低下する実効垂直異方性  $K_{\text{eff}}$  との相関が強いものと考えられるが  $K_{\text{eff}}$  のみでは  $J_c$  の減少を説明できず、更に別の要因を考える必要があることも分かった。なお、

本章で検討した GdFeCo 膜の  $K_{\text{eff}}$  は、高集積化された STT-RAM に応用するためには、不十分であるため、次章では、より垂直異方性の大きいメモリ層の検討を行った。

第 4 章では、低い臨界電流と高い実効垂直異方性の 2 つの条件を満たすため、高い  $K_{\text{eff}}$  を示す TbFe を GdFeCo 層に交換結合させた 2 層膜をメモリ層として用いる素子の検討を行った。TbFe 層は、室温で大きな垂直異方性を示すが、キュリー温度が GdFeCo 層よりかなり低いため、スピン注入のための電流によるジュール加熱により、先にキュリー温度付近まで加熱される。これにより、GdFeCo 層の磁化反転が容易に起きるようになると期待される。まず、TbFe 層の厚さを 0, 1, 3nm と変えた TbFe/GdFeCo 交換結合膜の  $K_{\text{eff}}$  の温度特性など基礎的な磁気特性を調べた。交換結合膜の  $K_{\text{eff}}$  の温度変化は、TbFe の層厚を増すとともに急峻になることを見出し、スピン注入磁化反転の臨界電流を熱アシスト効果により低減しようとする目的に対して望ましい特性を示すことを確認した。TbFe 層が 1nm の CPP-GMR 素子では、スピン注入磁化反転に起因する電流磁化反転が観測されることが分かった。このメモリ層の  $K_{\text{eff}}$  は、GdFeCo 単層膜の値に比べ 2 倍程度増加しているが、臨界電流の増加は 56% に止まっており、STT-RAM の高密度化に有効な結果が得られた。また、温度を室温から 70°C まで上げたときの臨界電流の減少率は 16% で、GdFeCo 単層膜の場合の 19% とほとんど同じであるが、 $K_{\text{eff}}$  の減少は 30% で、GdFeCo の場合の 7% より大きい。これは、二層膜および熱アシスト型のスピン注入磁化反転を理解するにおいて、 $K_{\text{eff}}$  のみで全てを説明することができないことを意味する。TbFe 層を 5nm に増した場合では、メモリ層の  $K_{\text{eff}}$  が大きくなりすぎてスピン注入による磁化反転が困難となり、ジュール熱による温度上昇に起因した、 $H_{\text{ext}}$  と平行方向への磁化反転のみが観察された。

第 5 章は、本研究のまとめである。本研究でメモリ層として検討した GdFeCo 単層膜、TbFe/GdFeCo 交換結合膜の磁気特性、さらにこれらをメモリ層とした CPP-GMR 素子におけるスピン注入磁化反転、臨界電流密度  $J_c$  のパルス幅依存性、温度依存性など第 3, 4 章で得られた結果をまとめた。特に交換結合二層膜のスピン注入磁化反転では、磁気異方性  $K_{\text{eff}}$  の上昇と比べて小さな  $J_c$  上昇で済むという、熱アシスト型スピン注入磁化反転の応用上重要な結果を得られただけでなく、 $J_c$  が単純に  $K_{\text{eff}}$  の増減だけで説明できず、別の要因を考える必要があるという物理的、工学的に興味深い結果を得た。TbFe/GdFeCo 交換結合膜の層厚比や組成を最適化することで、熱アシスト型スピン注入磁化反転を系統的に理解していく必要があるとともに、そのような研究を通じ、ギガビットクラスの STT-RAM 開発への道が拓けるものと期待される。