

修士学位論文要約（平成29年3月）

CoFeB-MgO 磁気トンネル接合における電気的手法 を用いた高速磁化反転

大島 直樹

指導教員：大野 英男 教授

High-speed magnetization switching by electrical means in CoFeB-MgO magnetic tunnel junction

Naoki OHSIMA

Supervisor: Hideo OHNO

Magnetic tunnel junctions (MTJs) are attracting much attention for non-volatile memory applications. Spin-transfer-torque (STT)-induced switching in the MTJs is one of important phenomena for the applications. The MTJs need to operate in high frequency up to GHz range in some applications, therefore, the switching properties by STT in the high frequency range needs to be clarified. In this work, high-speed switching properties of CoFeB-MgO MTJs with perpendicular easy axis (p-MTJs) in ns regime, which are now de-facto standard in the applications, are studied. Circular MTJs with a diameter D ranging from 40 to 82 nm are fabricated. Magnetization switching probability P_{sw} is evaluated from 100-time trials by the STT via applying voltage pulses with duration τ_p from 1 ns to 5 ns. From the results, τ_p dependence of the switching current I_C defined as the current where the switching probability P_{sw} reaches 0.5 is evaluated. In all the measured MTJs, I_C increases in proportion to τ_p^{-1} . To gain insight into the results, the experimental results are further analyzed by analytical formula. The increase of I_C in proportion to τ_p^{-1} is in agreement with the expected dependence based on macrospin model. Based on the analytical formula, the ST efficiency is evaluated from the slope of I_C vs. τ_p^{-1} . The evaluated ST efficiency is higher than the expected value using spin polarization estimated from TMR ratio.

1. はじめに

集積回路は、現代の高度情報化社会を支える基盤技術である。集積回路は、これまでメモリの高性能化と共に性能向上が実現されてきたが、最近になりメモリの静的消費電力の増大によりその性能向上が難しくなっている。メモリの静的消費電力の増大は、メモリが揮発性であることに起因しているため、この問題を解決する技術として磁性体の不揮発性を利用した不揮発性メモリが注目されている。絶縁層を2枚の強磁性体(記録層と参照層)で挟んだ構造を有する垂直磁化容易磁気トンネル接合(p-MTJ)¹⁾は、不揮発性を有すると共に、大容量化・高速動作が可能であり、また高い書き換え耐性を有するために、不揮発メモリへの応用が期待されている。p-MTJの書き込み方式には、スピン移行トルク(Spin-transfer-torque)を用いた電流誘起磁化反転が用いられる。MTJを用いたメモリ応用では、一部の応用ではGHz帯での高速動作が求められる。そのため、電流誘起磁化反転による高速スイッチング特性について理解を深めることは重要である。本研究では、CoFeB-MgO 垂直磁化容易磁気トンネル接合におけるナノ秒領域の高速スイッチング動作特性に

ついて調べた。

2. 実験方法

サファイア基板上に基板側から Ta(5)/Pt(5)/[Co(0.4)/Pt(0.4)]₆/Co(0.4)/Ru(0.44)₂/[Co(0.4)/Pt(0.4)]₆/Co(0.4)/Ta(0.3)/CoFeB(1.0)/MgO/CoFeB(1.6)/Ta(5)/Ru(5)を dc/rf マグネトロンスパッタリング法によって成膜した。括弧内の数字は各層の設計膜厚であり、単位は nm である。成膜した積層膜を電子線リソグラフィと Ar イオンミリングを用いて、コプレーナ導波路のシグナルライン上に接合サイズ40-82 nmのMTJ素子を作製した。素子作製後、試料を真空中で膜面垂直方向に0.4Tの磁界を印加しながら、300°Cで1時間の熱処理を行った。MTJ素子の抵抗面積積は10 $\Omega\mu\text{m}^2$ であり、トンネル磁気抵抗比はおよそ100%程度である。スイッチング特性を評価するための測定系は、参考文献2と同じものを用いた。スイッチング特性の測定では、はじめに磁化状態を初期化した後、パルス電圧をMTJに印加し、その後MTJの抵抗を測定した。以上の測定を各パルス電圧値で100回繰り返し、磁化状態が反転した回数をカウントすることで、スイッチング確率の印加電流依存性を評価した。

3. スイッチング電流のパルス幅依存性

図1にパルス幅 $\tau_p = 1 \text{ ns} - 5 \text{ ns}$ の領域におけるスイッチング電流 I_c のパルス幅の逆数依存性を示す。 I_c は、スイッチング確率が 0.5 となるときの電流値として定義した。 I_c は τ_p^{-1} に対して線形に増加していることがわかる。これは一斉磁化反転を前提にした次式(1)²⁾から予想される振る舞いと一致している。

$$I_c^{P(AP)}(\tau_p) = [eM_S V \{ \ln(4\Delta/\ln 2) \} / (2\mu_0 \mu_B g_{P(AP)})] \tau_p^{-1} + I_{c0}^{P(AP)} \quad (1)$$

ここで、 e は電子の素電荷量、 M_S は記録層の自発磁化、 V は記録層体積、 Δ は熱安定性、 μ_0 は真空中の透磁率、 μ_B はボーア磁子、 $g_{P(AP)}$ はそれぞれ平行状態(P)と反平行状態(AP)のスピンの移行効率(ST efficiency)である。また、 $I_{c0}^{P(AP)}$ は P to AP (AP to P) スイッチングにおける閾値電流である。図1で示した実験結果に対して線形フィットし、その切片から $I_{c0}^{P(AP)}$ を求め、傾きから $g_{P(AP)}$ を評価した。ここで傾き (τ_p^{-1} の係数)の中には Δ ならびに M_S が含まれているが、 Δ はパルス磁界を用いたスイッチング確率測定から評価し、 M_S は同じ積層構造のブランケット膜の磁化曲線を振動試料型磁力計により評価することで評価した。図2には、 $I_{c0}^{P(AP)}$ ならびに $g_{P(AP)}$ の接合面積依存性を示す。 $I_{c0}^{P(AP)}$ は接合面積 S に対してほぼ線形に増加する。これは、反転させる磁気モーメントの量が増加するためであり、理論予測と一致する。次に、 $g_{P(AP)}$ について見ると、 S に対してほぼ一定値を示すことが分かる。 $g_{P(AP)}$ は次式(2)で表される。⁴⁾

$$g = P / \{ 1 + P^2 \cos^2 \theta \} \quad (2)$$

θ は記録層と参照層の磁化の相対角度であり、 P はスピン分極率である。また、スピン分極率 P は、Julliere モデルを用いるとトンネル磁気抵抗比と次式(3)のような関係となる。⁵⁾

$$\text{TMR ratio} = 2P^2 / (1 - P^2) \quad (3)$$

今回用いた素子では、抵抗-磁界曲線から評価したトンネル磁気抵抗比は接合サイズに対してほぼ一定値であるため、スピン分極率はほぼ同じであると考えられる。よって、 $g_{P(AP)}$ が接合面積に対してほぼ一定値を示す結果とは矛盾していない。

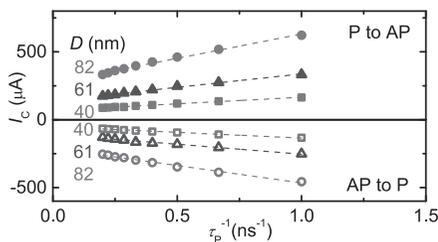


図1 CoFeB-MgO 垂直磁化容易磁気トンネル接合のスイッチング電流とパルス幅の逆数の関係。

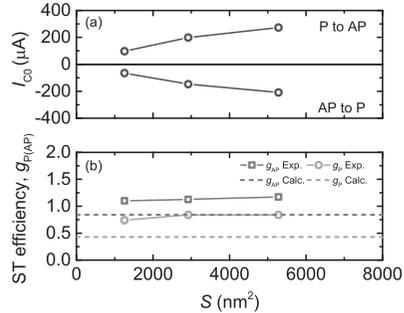


図2 (a)閾値電流、(b)スピン移行効率の接合面積依存性。(b)にはトンネル磁気抵抗比と式(2)、(3)を用いて計算した値も点線で示した。

次に、式(3)を用いてトンネル磁気抵抗比からスピン分極率を見積もり、その値と式(2)を用いて計算した $g_{P(AP)}$ の値を実験結果と比較した。図2(b)には、点線で計算した結果を示した。AP to P、及び P to AP 反転の両方で、実験で得られた値は理論値よりも大きな値となった。このような結果が得られた要因として、プロセスダメージに起因した磁化反転機構の変化や記録層内の有効磁界分布の不均一性などが考えられる。プロセスダメージが MTJ 素子のエッジ部に生じ、磁気異方性が減少した領域が形成されると、エッジ部から反転が始まり、反転に要する電流と時間が減少することが報告されている⁶⁾。以上のようなマイクロマグネティックな効果がナノ秒領域の高速スイッチング特性に関係していると考えられる。

4. まとめ

パルス幅 5 ns 以下のナノ秒領域において、接合サイズ 40-82 nm を有する CoFeB-MgO 垂直磁化容易磁気トンネル接合のスイッチング特性を評価した。スイッチング電流は、パルス幅の逆数に比例して増加した。パルス幅の逆数とスイッチング電流の関係から評価したスピン移行効率は、理論予測よりも大きな値を示した。大きなスピン移行効率が得られた要因としては、マイクロマグネティックな効果が関係しているものと考えられる。

文献

- 1) S. Ikeda *et al.*, Nat. Mater. **9**, 721 (2010).
- 2) N. Ohshima *et al.*, AIP Advances **7**, 055927 (2017).
- 3) H. Liu, *et al.*, J. Magn. Magn. Mat. **358-359**, 233-258 (2014).
- 4) J. C. Slonczewski, Phys. Rev. B. **71**, 024411 (2005).
- 5) M. Julliere, Phys. Lett. **54A**, 225 (1975).
- 6) K. Song *et al.*, J. Appl. Phys. **118**, 053912 (2015).