

プログラム名：無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現

PM 名：佐橋 政司

プロジェクト名：新規 MRAM 開発のための計算科学支援チーム

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 8 年 度

研究開発課題名：

磁気摩擦係数の界面効果物理

研究開発機関名：

京都工芸繊維大学

研究開発責任者

三浦 良雄

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

1. 界面磁気摩擦の電界効果の材料依存性の解明と大きな電界効果を得るための接合系の提案

強磁性体材料として 3d 遷移金属(Fe,Co,Ni およびその合金)及び、これら強磁性体と絶縁体の界面に大きなスピン軌道相互作用を有する Pt,Pd,Ir,Rh など数原子層挿入した多層膜を取り上げる。また、下地層となる非磁性金属層の依存性も解析する。そして、強磁性体材料によって界面ダンピング定数の電界効果の大きさや符号がどのように変化するか明らかにする。

2. 界面磁気摩擦と界面結晶磁気異方性の電界効果の同時制御へ向けた指針の提案

Ta/CoFeB/MgO(001)系の実験では面内磁化ではダンピングの電界効果は小さく垂直磁化のとき大きな電界効果が得られている。また、磁化ダンピングの電界効果には大きな強磁性層膜厚依存性が報告されている。一方で、実験では結晶磁気異方性の電界効果の膜厚依存性は小さい。このような実験結果を踏まえ、第一原理計算により磁気ダンピングと結晶磁気異方性の強磁性層膜厚依存性を解析することにより、電界効果において支配的となるスピンと軌道の結合効果を見出す。そして、結晶磁気異方性と磁気ダンピングにおいて大きな電界効果を同時に得るための指針を提示する。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

1. 界面磁気摩擦の電界効果の材料依存性の解明と大きな電界効果を得るための接合系の提案

① L1₀-MnGa/MgO(001)を用いた垂直磁気トンネル接合におけるトンネル磁気抵抗効果を明らかにするため、第一原理計算による電気伝導計算及び、結晶磁気異方性と磁気緩和定数の第一原理計算を行い、垂直型 MTJ として有望であることを示した

② Fe/MgO(001)接合に W 層を挿入した Fe/W/MgO(001)界面領域における結晶磁気異方性の電界変調効果を第一原理計算により解析し、776fJ/Vm の大きな電界効果が得られることを示した。

2. 界面磁気摩擦と界面結晶磁気異方性の電界効果の同時制御へ向けた指針の提案

free-standing な Fe 薄膜(1ML-8ML)および Fe/MgO(001)接合界面の磁気緩和定数と結晶磁気異方性の電圧効果を解析し、結晶磁気異方性と磁気緩和定数の電圧変調効果の相関を明らかにした。

2-2 成果

1. 界面磁気摩擦の電界効果の材料依存性の解明と大きな電界効果を得るための接合系の提案

① 実験により B2-CoGa をバッファ層に用いた

B2-CoGa/L1₀-MnGa/MgO(001)の系において垂直磁化膜が得られた。

B2-CoGa の格子定数は 0.285nm であり L1₀-MnGa の 0.275nm より大きい。よって L1₀-MnGa は B2-CoGa 上で面内方向に引っ張り歪を受けている。バンド構造を解析したところ MgO 障壁でのトンネルで重要な Δ_1 状態がハーフメタル的であることが分かった。また、

MnGa/MgO/MnGa (001)の系において TMR 比の第一原理計算を行ったところ 3000%以上の TMR 比が得られた。以上の結果は

B2-CoGa/L1₀-MnGa/MgO(001)の垂直 MTJ では高い TMR 効果が期待できることを示唆している。

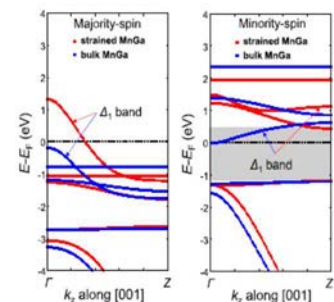


図 1: L1₀-MnGa のバンド分散

② Fe/Wの(001)多層膜では面内格子定数がbcc-Feの0.285nm程度である場合は $1.7 \times 10^7 \text{erg/cc}$ 程度の巨大な垂直磁気異方性が得られることがわかっている。そこでFe/MgO(001)にWを挿入したFe/W/MgO(001)の系に対する結晶磁気異方性と電圧変調効果を解析した。するとW層が2MLの場合は面内の結晶磁気異方性を示すが、1MLと3ML, 4MLのW挿入ではFe/MgO(001)の1.2倍から2.0倍の大きな垂直の結晶磁気異方性エネルギーが得られた。また、Fe/W(3ML)/MgO(001)の結晶磁気異方性の電圧効果を解析したところ、776[fJ/Vm]とFe/MgO(001)界面の102[fJ/Vm]の約7倍の電界変調効果が得られた。Fe/MgO(001)では格子ミスマッチが大きくbcc-Fe格子定数に合わせることは難しいが、Fe/MgAl₂O₄(MAO)(001)界面の場合は両者の格子ミスマッチが小さくbcc-Feの値0.286nm付近に面内格子定数を合わせることが可能である。よって、Fe/W/MAO(001)の系で巨大な結晶磁気異方性とその電圧効果が得られる可能性を示唆している。

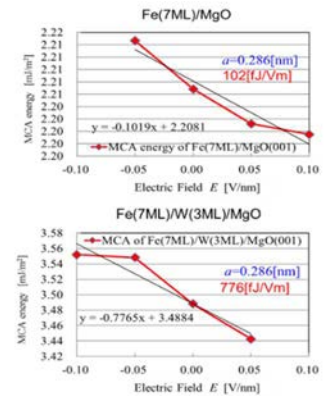


図2: Fe(7ML)/MgO(001)界面とFe(7ML)/W(3ML)/MgO(001)界面の磁気ダンピング定数の電界依存性

2. 界面磁気摩擦 α と界面垂直磁気異方性(PMA)の電界効果の同時制御へ向けた指針の提案

① Free-standingなFe(001)表面の磁気緩和定数 α の電圧効果は正の電圧(表面Fe原子の電子が増大)に対し増加し、垂直磁気異方性(PMA)の電圧効果と逆向きであることが分かった。その電圧依存性は1V/nmの電界に対して7%の変調である。また α の電圧効果をスピントルク演算子のスピン励起項と軌道励起項で分解してみると、軌道励起項が大きく寄与していることがわかった。逆にスピン励起項の α への寄与は軌道励起項の半分以下で電圧依存性はほぼゼロであった。一方、スピン軌道相互作用の2次摂動解析によると軌道励起項はFe表面のPMAを減少させる傾向にある。以上の結果は α とPMAの電圧変化は軌道励起項の寄与が大きい場合必ず逆になる傾向にあり、 α とPMAを電圧で同時に減少させることはできないことを示唆している。

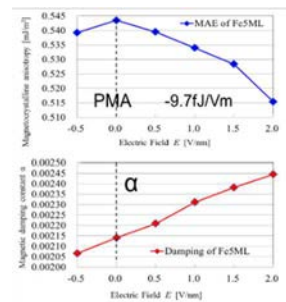


図3: Fe(001)表面の結晶磁気異方性と磁気ダンピング定数の電界依存性

② Fe/MgO(001)界面の α およびその電圧効果は、ともFeの膜厚により異なる結果が得られた。Feの層数が偶数の場合は電圧効果の傾きは正であるがFe層数が奇数の場合は負となった。これらの結果はFe/MgO界面共鳴状態が α の電界効果に大きく影響していることが示唆される。またFe5層の場合は1V/nmの電界に対して20%以上の磁気ダンピングが変調されており、目標とする50%の電圧依存性に近い結果がえられている。Feの膜厚により α とPMAの電圧効果の符号が異なるため、Feの膜厚を制御することにより α とPMAの同時制御が可能であることが明らかになった。

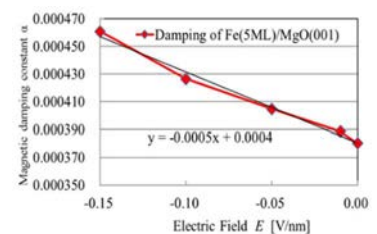


図4: Fe(5ML)/MgO(001)界面の磁気ダンピング定数の電界依存性

2-3 新たな課題など

課題 1 の①に関して B2-CoGa と MnGa および MgO の間には歪が生じており、その結晶磁気異方性の電圧効果において MnGa における歪が重要な役割を果たしている可能性がある。そこで MnGa/MgO 界面の磁気構造・磁気異方性とその電圧変調効果を解析し、歪と電界効果の関連を明らかにする。

3. アウトリーチ活動報告

該当なし