Effect of Thermal Fluctuations of Magnetization on Perpendicular Exchange Anisotropy in Mn-Ir / [Co / Pt]_n Multilayers

H. Takahashi*, M. Tsunoda, and M. Takahashi

Dept. of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-05, Aoba-yama, Sendai 980-8579, Japan

The dependence of perpendicular exchange anisotropy on the thickness of the ferromagnetic (FM) layer in Mn-Ir / [Co/Pt]_n multilayers was investigated. The dependencies on temperature of saturation magnetization, M_s , in [Co / Pt]_n multilayers having Co and Pt layers of various thicknesses were examined. The rate of decrease of M_s against temperature was large for thin-Co (< 1 nm) or thick-Pt layers (> 1 nm), which indicates that thermal fluctuations in magnetization were significant. The unidirectional anisotropy constant, J_K , was reduced with the decreasing thickness of the interfacial Co layer in contact with the Mn-Ir layer. This suggested that perpendicular exchange bias was degraded by thermal fluctuations in FM magnetization during thermal annealing. The dependencies of J_K on the thicknesses of the Pt layer and inner Co layer could be also described by the thermal fluctuations in the magnetization of the FM layer.

Key words: exchange anisotropy, perpendicular magnetic anisotropy, multilayer, temperature dependence, thin film

Mn-Ir / [Co / Pt]_n 積層膜における磁化の熱揺らぎが垂直交換磁気異方性に与える影響

高橋宏和*・角田匡清・高橋研

東北大学大学院工学研究科電子工学専攻, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 (〒980-8579)

1. はじめに

反強磁性 (AF) / 垂直磁化強磁性 (FM) 積層膜に生じる垂直交換磁気異方性 (PEA) は垂直磁化方式のスピントランジスタへの応用が可能である。このスピントランジスタ構造を適用した垂直磁化方式のスピントランジスタメモリ (Spin-RAM) は、保磁力差型の Spin-RAM と比較して熱擾乱や外部磁界への耐性に優れるため、その実用化が期待されている。PEA の報告は CoO ¹⁾, Cr_2O_3 ²⁾, FeMn ³⁾, $\gamma\text{-Mn-Ir}$ ⁴⁻⁵⁾ 等の AF 材料でなされているが、これらの中でも $\gamma\text{-Mn-Ir}$ は (i) 交換磁気異方性の大きさを表す一方向磁気異方性定数 J_K が 0.2 erg/cm^2 と大きい⁵⁾, (ii) 交換磁気異方性が消失する温度であるブロッキング温度 T_B が 200°C 以上と高いために室温で安定に動作する素子に適用可能, (iii) 金属であるので磁化反転に電流を必要とする Spin-RAM に適用可能、等の利点を有しており、Spin-RAM への実用化に最も近い AF 材料であると言える。また、FM 層に関しては、垂直磁気異方性の大きな Co / Pt 多層膜が多くの場合に用いられている^{1), 4-5)}。このような Mn-Ir / [Co / Pt]_n 積層膜は他の AF 材料を用いた系と比較して高い特性を示すものの、Spin-RAM への実用化には更に大きな J_K の誘導が必要とされる。

AF 層に Mn-Ir を、FM 層に Co / Pt 多層膜を用いた交換結合膜においては、多層膜中の Co 及び Pt 膜厚によって J_K が変化するという結果が報告されている⁴⁻⁵⁾。 J_K の Co 膜厚依存性に注目すると、特に Co 膜厚が 0.6 nm 以下の極薄領域で J_K が顕著に減少することが Sort ら⁴⁾によって示された。Sort らは、Co / Pt 多層膜の Co 膜厚低減に伴いキュリー温度が低下することから、 T_B における磁化の熱揺らぎが J_K の減少の原因であるとしている。一

方で J_K の Pt 膜厚依存性は十分に説明されておらず、Pt 膜厚による J_K の変化が Co の場合と同様に熱揺らぎを主要因としているのか、それとも垂直磁気異方性やその他の磁気特性変化を要因としているのかは明らかになっていない。また、AF / FM 界面への極薄 Pt 層挿入によって J_K が増大する⁴⁾、界面の FM 組成を Co から $\text{Co}_{65}\text{Fe}_{35}$ に変えることで J_K が増大する⁵⁾、等の報告から、PEA が界面状態に敏感であることが示唆される。従って、同じ Co であっても界面の Co 層の磁化が熱擾乱で揺らいでいる場合と多層膜内部の Co 層の磁化が熱擾乱で揺らいでいる場合とでは J_K に与える影響が異なると考えられるが、この点に関しては十分な調査が行われていない。そこで本研究では Co / Pt 多層膜の磁化の熱擾乱が PEA に与える影響を明らかにすることを目的として以下の検討を行った。まず Co / Pt 多層膜の Co, Pt 膜厚を変化させ、飽和磁化 M_s の温度依存性を系統的に調査した。その上で Mn-Ir / [Co / Pt]_n 積層膜における J_K の界面 Co 膜厚および多層膜内部の Co, Pt 膜厚依存性を調査し、熱擾乱が J_K に与える影響の検討を行った。

2. 実験方法

試料は熱酸化膜付き Si 基板上に RF / DC マグネトロンスパッタリング法で成膜した。Co / Pt 多層膜の磁気特性評価には sub. / under-layer (UL) / [Co(d_{Co}) / Pt(d_{Pt})]₅ / Co(d_{Co}) / capping-layer (CL) ($d_{\text{Co}} = 0.4 - 1.0 \text{ nm}$, $d_{\text{Pt}} = 0.6 - 5 \text{ nm}$) を用い、垂直交換磁気異方性の Co 膜厚依存性の評価には sub. / UL / Mn₇₆Ir₂₄(5 nm) / Co($d_{\text{Co}}^{\text{int}}$) / Pt(1 nm) / [Co($d_{\text{Co}}^{\text{int}}$) / Pt(1 nm)]₄ / CL ($d_{\text{Co}}^{\text{int}} = 0.4 - 1.4 \text{ nm}$, $d_{\text{Co}}^{\text{int}} = 0.4 - 1.0 \text{ nm}$) を用いた。UL, CL はそれぞれ Ta (10 nm) / Pt (10 nm), Ru (5 nm) である。スパッタ装置の到達圧力は $3 \times 10^{-9} \text{ Torr}$ 以下であった。成膜用のプロセスガスにはウルトラクリーン Ar (9N) を用い、Co, Pt の

* (独) 日本学術振興会特別研究員 DC1

成膜ガス圧は 0.4 mTorr とした。Co, Pt の成膜レートはそれぞれ 0.025 nm/sec, 0.011 nm/sec であった。垂直交換磁気異方性を誘導するため、Mn-Ir を含む試料は、別途測定したブロッキング温度 $T_B = 200^\circ\text{C}$ で 1 時間、3 kOe の垂直磁場中で熱処理を施した後、同じ磁場中で室温まで冷却した。磁化曲線の測定には振動試料型磁力計を用いた。磁化曲線は室温 (RT) から 300°C までの各温度 T において測定を行った。 J_K は $J_K = M_s d_f H_K$ の式を用い、RT で測定した膜面垂直方向の磁化曲線から算出した。ただし、 M_s : 飽和磁化、 d_f : Co, Pt 膜厚の総和 (UL の Pt は除く)、 H_K : ヒステリシスのシフト磁界である。

3. 実験結果

3.1 Co / Pt 多層膜の磁気特性の Co, Pt 膜厚依存性

Fig. 1 に、室温における $[\text{Co}(d_{\text{Co}})/\text{Pt}(1.0\text{ nm})]_9/\text{Co}(d_{\text{Co}})$ 多層膜の異方性磁界 H_K および単位面積当たりの飽和磁化 $M_s d_f$ の Co 層膜厚 (d_{Co}) 依存性を示す。 H_K は面内方向の磁化曲線の飽和磁界として算出した。尚、いずれの d_{Co} の場合においても膜面垂直方向の角形比が面内方向のそれより大きく、多層膜試料が垂直磁気異方性を有することが確認された。Fig. 1 より、 $M_s d_f$ は Co 膜厚の増加に伴い一次関数的に増加している。このことから、Co/Pt 多層膜においてほとんどの磁化が Co 層に誘起されており、Co 層の飽和磁化の大きさは $d_{\text{Co}} = 0.4 - 1.0\text{ nm}$ の範囲では大きくは変化しないことがわかった。また、Fig. 1 より、 $d_{\text{Co}} \leq 0.6\text{ nm}$ の範囲では $H_K > 10\text{ kOe}$ と大きいが、 $d_{\text{Co}} > 0.6\text{ nm}$ では Co 膜厚の増加に伴い H_K は直線的に減少した。 $d_{\text{Co}} > 0.6\text{ nm}$ における減少は Co / Pt 多層膜の垂直磁気異方性が界面で誘起されているというモデルで説明が可能である。図には示していないが、保磁力 H_c は d_{Co} の増加に伴って 600 Oe ($d_{\text{Co}} = 0.4\text{ nm}$) から 100 Oe ($d_{\text{Co}} = 1.0\text{ nm}$) まで単調に減少した。

Fig.2 (a)に室温で測定された $[\text{Co}(0.4\text{ nm})/\text{Pt}(d_{\text{Pt}})]_9/\text{Co}(0.4\text{ nm})$ 多層膜の膜面垂直方向の磁化曲線を、Fig. 2 (b) に H_K , $M_s d_f$

Fig. 1 Magnetic anisotropy field, H_K , and areal saturation magnetization, $M_s d_f$, in $[\text{Co}(d_{\text{Co}})/\text{Pt}(1.0\text{ nm})]_9/\text{Co}(d_{\text{Co}})$ multilayers as a function of thickness of Co layer, d_{Co} . Lines are visual guides. Measurements were carried out at room temperature.

の Pt 層膜厚 (d_{Pt}) 依存性を示す。Fig. 2 (a) より、いずれの d_{Pt} においても角形比が 1 に近く、垂直磁気異方性を有することがわかる。 H_K は、 $1\text{ nm} \leq d_{\text{Pt}} \leq 2\text{ nm}$ の範囲で 600 Oe ($d_{\text{Pt}} = 1\text{ nm}$) から 850 Oe ($d_{\text{Pt}} = 2\text{ nm}$) まで増加するが、更に Pt 膜厚が厚くなると 200 Oe ($d_{\text{Pt}} = 5\text{ nm}$) まで減少した。また、 $d_{\text{Pt}} = 5\text{ nm}$ の場合には他の場合と異なり、零磁場付近で磁化の 10 % 程度が反転し、 H_K 付近で他の 90 % が反転する階段状の磁化曲線となった。 H_K , $M_s d_f$ に関しては、Fig. 2 (b) より、主に $1\text{ nm} \leq d_{\text{Pt}} \leq 2\text{ nm}$ の範囲で変化が生じることがわかる。 H_K は d_{Pt} が 1 nm から 2 nm まで厚くなることで増大したが、 $M_s d_f$ は逆に減少した。以上の結果において、 $d_{\text{Pt}} \leq 2\text{ nm}$ の領域で H_K と H_c の変化が対応していることから、Pt 膜厚の変化により界面磁気異方性の大きさが変化し、その結果として H_K が変化したものと考えられる。また、以下のように各 Co 層間の磁化の結合状態を考慮することで $d_{\text{Pt}} \geq 2\text{ nm}$ における磁気特性変化についても説明が可能である。Co/Pt 多層膜中において界面数原子層の Pt は分極し、磁気モーメント

Fig. 2 (a) Magnetization loops for $[\text{Co}(0.4\text{ nm})/\text{Pt}(d_{\text{Pt}})]_9/\text{Co}(0.4\text{ nm})$ multilayers with various thicknesses of Pt layer, d_{Pt} . (b) Magnetic anisotropy field, H_K , and areal saturation magnetization, $M_s d_f$, in multilayers as a function of d_{Pt} . Lines in (b) are visual guides. Measurements were carried out at room temperature.

を持つ⁶⁾。Pt 膜厚が薄い場合には 2 つの Co 層が Pt の磁気モーメントを介した交換結合によって強磁的に結合するが、Pt 膜厚の増加に伴い層間の交換結合は指数関数的に減少する。十分に Pt が厚い場合にも各 Co 層は試料面端部にのみ生じる双極子磁界によって結合するが、この双極子相互作用は交換相互作用に比べて弱く、各 Co 層の磁化はほぼ孤立した振る舞いをすると考えられる。従って、 $d_{\text{Pt}} = 5 \text{ nm}$ において Co 層間には双極子相互作用のみが働くため、Pt 層に挟まれておらず垂直異方性の弱い最表面側の Co 層が他の Co 層よりも低磁場で反転し、Fig. 2 (a) のような階段状の磁化曲線になったと考えられる。また、このときには最上部の Co 層が反転した際に他の Co 層端部に双極子磁界が逆方向に印加されるため、核生成が促されて H_c が小さくなったと考えられる。以下で詳しく述べるが、Pt 膜厚の増加による Co 層の磁気的孤立化でキュリー温度が低下するため、Fig. 2 (b) において d_{Pt} が厚い場合に M_{sdF} が減少したと理解できる。

Fig. 3 (a, b) にそれぞれ $[\text{Co}(d_{\text{Co}})/\text{Pt}(1 \text{ nm})]_9/\text{Co}(d_{\text{Co}})$, $[\text{Co}(0.4 \text{ nm})/\text{Pt}(d_{\text{Pt}})]_9/\text{Co}(0.4 \text{ nm})$ 多層膜の M_{sdF} の温度特性を示す。

Fig. 3 Dependence of areal saturation magnetization on temperature for (a) $[\text{Co}(d_{\text{Co}})/\text{Pt}(1 \text{ nm})]_9/\text{Co}(d_{\text{Co}})$ multilayers and (b) $[\text{Co}(0.4 \text{ nm})/\text{Pt}(d_{\text{Pt}})]_9/\text{Co}(0.4 \text{ nm})$ multilayers corresponding to various thicknesses of Co layer, d_{Co} , and of Pt layer, d_{Pt} . Vertical axes are normalized by areal saturation magnetization measured at RT.

す。Fig. 3 の M_{sdF} は室温の M_{sdF} で規格化した。また、参考として sub./UL/Co(20 nm)/CL の規格化 M_{sdF} の温度特性も合わせて示した。Fig. 3 (a) より、Co 膜厚が薄いほど M_{sdF} の測定温度に対する減衰率が大きいことがわかる。特に $d_{\text{Co}} = 0.4, 0.6 \text{ nm}$ で減衰率が大きく異なり、 $d_{\text{Co}} < 0.6 \text{ nm}$ では磁化の熱揺らぎが非常に大きいことが明らかとなった。Co / Pt 多層膜において fcc-Co は (111) 配向し、面間隔は約 0.20 nm である。つまり、 $d_{\text{Co}} < 0.6 \text{ nm}$ において Co 層はほとんど界面原子のみで構成されている。界面原子は隣接する FM 原子が少ないために交換結合エネルギーによる有効磁場が小さく、磁化の熱揺らぎが大きくなったのだと考えられる。次に Fig. 3 (b) をみると、Pt 膜厚が厚いほど磁化の熱揺らぎが大きくなることわかる。特に d_{Pt} が 1 nm と 2 nm の間で磁化の温度に対する減衰率が大きく変化している。Pt 膜厚によって磁化の熱揺らぎの大きさが変化したことから、Co 層間の交換結合の強さが磁化の熱揺らぎに影響を与えるという可能性が示唆された。 $d_{\text{Pt}} > 1 \text{ nm}$ における磁化の熱揺らぎの増加は Co 層間の交換結合の減少によるものだと考えられる。

3.2 垂直交換磁気異方性の界面 Co 層および多層膜中 Co 層膜厚依存性

Mn-Ir (5 nm) / Co ($d_{\text{Co}}^{\text{int}}$) / Pt (d_{Pt}) / $[\text{Co}(0.4 \text{ nm})/\text{Pt}(d_{\text{Pt}})]_4$ 積層膜の室温における代表的な磁化曲線を Fig. 4 (a) に、 J_K の界面 Co 膜厚 ($d_{\text{Co}}^{\text{int}}$) 依存性を Fig. 4 (b) にそれぞれ示す。ただし $d_{\text{Pt}} = 1.0, 2.0 \text{ nm}$ とし、それぞれの場合について J_K を算出した。また、Fig. 4 (b) には参考として sub./UL/Mn-Ir (5 nm) / Co (4 nm) / CL 面内交換結合膜の J_K も合わせて示した。Fig. 4 (a) より、 $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$ および d_{Pt} が H_{ex} や H_c に影響を与えることがみてとれる。また、 $d_{\text{Co}}^{\text{int}} = 1.2 \text{ nm}$, $d_{\text{Pt}} = 2.0 \text{ nm}$ の場合のみ角形比が 0.8 と小さく、垂直磁気異方性が他の場合と比較して小さいことがわかる。Fig. 4 (b) より、界面 Co 層膜厚を増加させることで J_K は 0.01 erg/cm^2 以下から 0.1 erg/cm^2 以上まで大きく変化した。 $d_{\text{Pt}} = 1.0 \text{ nm}$ の場合には J_K が $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$ の増加に伴い単調に増大するという傾向が得られた。 J_K は $d_{\text{Pt}} \geq 1 \text{ nm}$ で飽和し、その値は面内交換結合膜の場合の 80% 程度であった。 $d_{\text{Pt}} = 2.0 \text{ nm}$ の場合には $d_{\text{Pt}} = 1.0 \text{ nm}$ の場合と傾向が異なり、 $d_{\text{Co}}^{\text{int}} \leq 1.0 \text{ nm}$ の領域においては $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$ の増加に伴い J_K も増大したが、更に膜厚が厚くなると逆に J_K は減少した。また、 $d_{\text{Pt}} = 2.0 \text{ nm}$ の場合には、 $d_{\text{Pt}} = 1.0 \text{ nm}$ の場合と比較して、同じ $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$ における J_K が小さかった。

Fig. 5 には、Mn-Ir (5 nm) / Co ($d_{\text{Co}}^{\text{int}} = 0.6, 1.2 \text{ nm}$) / Pt (1.0 nm) / $[\text{Co}(d_{\text{Co}}^{\text{mlt}})/\text{Pt}(1.0 \text{ nm})]_4$ 積層膜の室温における J_K の多層膜中 Co 膜厚 $d_{\text{Co}}^{\text{mlt}}$ 依存性を示す。Fig. 5 より、 J_K は多層膜中の Co 膜厚が変化しても 10% 程度の範囲でしか変化していない。Fig. 4, 5 の結果を合わせて考えると、垂直交換結合膜における J_K は界面の FM 層の構造に非常に敏感であることがわかった。

Fig. 4 (a) Perpendicular magnetization loops of Mn-Ir/Co ($d_{\text{Co}}^{\text{int}}$)/Pt (d_{Pt})/[Co(0.4 nm)/Pt (d_{Pt})]₄ multilayers, (b) unidirectional anisotropy constant, J_K , as a function of thickness of interfacial Co layer, $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$. In (b), dashed line plots J_K in Mn-Ir/Co (4.0 nm) in-plane exchange biased film.

4. 考察

Fig. 4 (b), Fig. 5 で得られた J_K の $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$, d_{Pt} 依存性は Co / Pt 多層膜における磁気特性の温度依存性から説明が可能である。まず $d_{\text{Pt}} = 1.0$ nm の場合について考える。Fig. 3(a) より, 5nm の Mn-Ir のブロッキング温度 $T_B = 200$ °C における磁化の減少率は, $d_{\text{Co}} = 0.4 - 0.6$ nm の間で顕著に変化し, $d_{\text{Co}} = 1$ nm 以上では殆ど変化しない。この傾向は Fig. 4(b) における J_K の $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$ 依存性とよく一致しており, T_B における磁化の熱揺らぎの大きさと J_K との間に負の相関が存在することが判る。この相関関係は定性的には次のように理解される。そもそも T_B とは, AF 層の結晶磁気異方性エネルギーと熱エネルギーが釣り合う温度であると考えられる⁷⁾。 T_B において外部磁界により FM 層の磁化を一方に揃えると, AF - FM スピン間の交換結合によって AF 層のスピン構造が系の全エネルギーを最安定とするように変化する。このスピン構造は T_B 以下まで冷却することで凍結され, FM 層の磁化が熱処理磁界の方向にあるときにエネルギーが極小になるような一

Fig. 5 Unidirectional anisotropy constant, J_K , as a function of thickness of inner Co layer, $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$, in Mn-Ir/Co ($d_{\text{Co}}^{\text{int}} = 0.6$ and 1.2 nm)/Pt (1 nm)/[Co ($d_{\text{Co}}^{\text{int}}$)/Pt (1 nm)]₄ multilayers. Measurements were performed at RT. Lines are visual guides.

方向磁気異方性が誘導される。従って, T_B において FM 層の磁気モーメントが熱磁界により時間的に揺らいでいる場合には AF 層のスピン構造を最安定な状態に変化させることができず, J_K が減少すると考えられる。これを踏まえて Fig. 4 (b), Fig. 5 の結果について考察する。Fig. 6 に, Mn-Ir (5 nm) / Co ($d_{\text{Co}}^{\text{int}}$) / Pt (d_{Pt}) / [Co (0.4 nm) / Pt (d_{Pt})]_n 積層膜における磁場中熱処理時のスピン構造のモデル図を示す。ただし, 膜面垂直方向に磁場 $H < 4\pi M_s$ が印加され, 試料はブロッキング温度にあると考えている。図中の矢印が磁気モーメントを表し, Co 層のみ熱揺らぎを考慮して描いてある。原子間に直接交換相互作用が働く場合にはグレーの太線で, 双極子相互作用が働く場合には細い破線で原子間を結んである。まず, $d_{\text{Pt}} \leq 1.0$ nm の場合 (a,b) について考える。Fig. 3(a) より, Co / Pt 多層膜の磁化の熱揺らぎは Co 層膜厚の低下に伴い大きくなる。従って, Mn-Ir に接する界面の Co 層が $d_{\text{Co}}^{\text{int}} = 0.4$ nm と薄い場合には, 熱擾乱によって各 Co 層の磁気モーメントが Fig. 6(a) の様に大きく揺らぎ, 界面の Co 層磁化の熱揺らぎを原因として J_K が小さくなると考えられる。界面の Co 層が厚くなるに従って Fig. 6(b) のように界面 Co 層における磁化の熱揺らぎが小さくなるため, J_K が $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$ の増大に従い大きくなったと考えられる。ただし, 界面の Co 層は片面しか Pt 層と接していないため, 垂直磁気異方性が多層膜中の Co 層と比較して小さく, 厚くなりすぎると反磁界によって磁化が面内に倒れてしまうと考えられる。 $d_{\text{Pt}} = 1$ nm においては界面の Co 層と, 垂直磁気異方性の大きな多層膜 1 層目の Co 層とが直接交換相互作用によって結合しているため, Fig. 4 において $d_{\text{Co}}^{\text{int}} = 1.4$ nm の厚い領域まで高い J_K を保つことができたのだと考えられる。 $d_{\text{Pt}} \geq 2.0$ nm においては, 3.1 で述べたように各 Co 層は双極子相互作用でのみ結合されている。従って, $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$ が薄い場合 (Fig. 6c) には磁化の熱揺らぎの増加を原因として d_{Pt} が薄い場合よりも J_K が小さくなったと考えられる。また, $d_{\text{Co}}^{\text{int}}$ が厚い場合には, 小さな垂直磁気異方性と弱い Co 層間の結合を原因として Fig. 6(d) のように界面 Co 層の磁化が倒れてしまい,

Fig. 6 Model of spin structure in Mn-Ir/Co ($d_{\text{Co}}^{\text{int}}$)/Pt (d_{Pt})/[Co (0.4 nm)/Pt (d_{Pt})] multilayers with various thicknesses of interfacial Co layer and Pt layers. Blocking temperature and external magnetic field, $H < 4\pi M_s$, were applied to upper direction. Angles and magnitudes of magnetic moments are represented by the slopes and lengths of arrows. Magnetic moments that are coupled by direct exchange interaction are connected by gray thick lines and dipole interaction by dashed thin lines. Arched arrows represent amplitude of spin fluctuations by thermal activation. Thermal fluctuations in Pt and Mn-Ir layers are not included.

垂直方向に大きな交換磁気異方性を誘導することができない。Fig. 4 (b) において $d_{\text{Pt}} = 2 \text{ nm}$ の場合の J_K が $d_{\text{Co}}^{\text{int}} > 1 \text{ nm}$ で減少するのはこのためであると考えられる。実際に磁化が面内方向から傾いて面内成分を持つことは Fig. 4 (a) の磁化曲線において $d_{\text{Co}}^{\text{int}} = 1.2 \text{ nm}$, $d_{\text{Pt}} = 2.0 \text{ nm}$ の場合の角形比が小さいことから見て取れる。

以上の結果から、高い PEA を有する垂直交換結合膜の設計指針が次のように与えられる。(1) AF 層と接する界面 FM 層の膜厚を厚くし、熱処理時の磁化の熱揺らぎを抑制する。(2) 多層膜中の非磁性層膜厚を薄くすることで界面 FM 層と多層膜中の FM 層を交換相互作用で強く結合する。これによって界面 FM 層が面内に倒れること、並びに界面 FM 層磁化が熱擾乱で揺らぐことが抑制される。上記の指針は界面 FM 層材料を変えた場合にも有効である。実際に我々は界面の Co を $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ に変更した Mn-Ir (5 nm) / $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ ($d_{\text{FM}}^{\text{int}}$) / Pt (1 nm) / [Co (0.6 nm) / Pt (1 nm)]₄ 積層膜において $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ の膜厚 $d_{\text{FM}}^{\text{int}}$ の増加に伴い J_K が増大すること並びに、 $d_{\text{FM}}^{\text{int}} = 1.2 \text{ nm}$ において 0.40 erg/cm^2 という大きな J_K が得られることを確認している⁸⁾。これは室温において報告された中で最大の J_K であり、本研究で得られた指針が垂直交換結合膜の設計に有用であることがわかる。

5. まとめ

Mn-Ir / [Co / Pt]_n 積層膜における垂直交換磁気異方性の Co, Pt 層膜厚依存性を理解することを目的として、[Co / Pt]_n 積層膜における磁化の熱揺らぎと Mn-Ir / [Co / Pt]_n 積層膜の垂直一方向磁気異方性定数 J_K の Co, Pt 層膜厚依存性を調査した。[Co / Pt]_n 積層膜における飽和磁化の温度特性を測定した結果、Co 膜厚の低下および Pt 膜厚の増加によって磁化の熱揺らぎが増大することが明らかになった。 J_K は界面の Co 層膜厚の増加に伴い大きく増大したが、多層膜内部の Co 層膜厚の変化には鈍感であった。本実験結果は、熱処理時における Mn-Ir と接する Co 層の磁化の熱揺らぎが交換磁気異方性を減少させるというモデルで説明可能であった。

References

- 1) P. Kappenberger, S. Martin, Y. Pellmont, H. J. Hug, J. B. Kortright, O. Hellwig and Eric E. Fullerton: *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 267202 (2003).
- 2) Y. Shiratsuchi, T. Fujita, H. Oikawa, H. Noutomi, and R. Nakatani: *Appl. Phys. Expr.*, **3**, 113001 (2010).
- 3) L. Sun, S. M. Zhou, P. C. Searson, and C. L. Chien: *J. Appl. Phys.*, **93**, 6841 (2003).
- 4) J. Sort, V. Baltz, F. Garcia, B. Rodmacq, and B. Dieny: *Phys. Rev. B*, **71**, 054411 (2005).
- 5) Y. F. Liu, J. W. Cai, and S. L. He: *J. Phys. D*, **42**, 115002 (2009).
- 6) N. Nakajima, T. Koide, T. Shidara, H. Miyauchi, H. Kawabe, H. Fukutani, A. Fujimori, K. Iio, T. Katayama, and Y. Suzuki: *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, **78**, 271 (1996).
- 7) E. Fulcomer and S. H. Charap: *J. Appl. Phys.*, **43**, 4190 (1972).
- 8) H. Takahashi, M. Tsunoda, and M. Takahashi: *Dig. Intermag 2012*, Vancouver, 2012, HC-12; proceedings paper is accepted to *IEEE Trans. Magn.*

2012年3月1日受理, 2012年7月19日採録