

[CoFe/Pt/CoFe]/IrMn 다층박막의 수직자기 이방성 각도에 따른 상호교환결합력 특성

이상석

상지대학교 한방의료공학과, 강원도 원주시, 220-702

최종구

상지대학교 한방의학연구소, 강원도 원주시, 220-702

황도근

상지대학교 응용물리전자학과, 강원도 원주시, 220-702

이장로*

숙명여자대학교 물리학과, 서울 용산구 청파동, 140-742

(2008년 9월 29일 받음, 2008년 10월 30일 최종수정본 받음, 2008년 11월 5일 게재확정)

[CoFe/Pt/CoFe]/IrMn 다층박막에 대하여 반강자성체 IrMn층 두께 의존성 및 열적안정성, 수평으로 전환하는 각도에 의존하는 수직자기 이방성 특성을 관찰하였다. IrMn층을 통해 유도된 강자성체/비자성체/강자성체 구조인 [CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)/CoFe(10 Å)]/IrMn 다층박막은 IrMn 두께 7 Å부터 상호교환결합력이 형성되었고, 열처리 온도 250 °C까지 열적안정성을 유지하였다. 수직자기 이방성 [CoFe/Pt/CoFe]/IrMn 다층박막에서 바닥 CoFe층과 Pt층을 사이에 두고 반강자성체인 IrMn층에 의해 고정되어 있는 상부 CoFe층간의 상호교환결합력은 이방성 측정 각도가 0°, 60°일 때 각각 1,000 Oe, 1,500 Oe로, 90°일 때 ∞ Oe로 나타났다.

주제어 : 상호교환결합력, 수직자기 이방성, 비자성체 Pt층, 반강자성체 IrMn층, [CoFe/Pt/CoFe]/IrMn 다층박막

I. 서 론

수평자기 이방성 Fe/Cr 다층구조와 반강자성체/강자성체/Cu/강자성체 스핀밸브 구조에서 각각 Cr층 두께와 Cu층 두께에 따라 진동하는 자기저항특성이 RKKY(Ruderman-Kittel-Kasuya-Yoshida) 모델로 설명이 가능하다[1, 2]. 수직자기 이방성 Co/Ru 및 Ni/Cu 초격자 다층박막 구조에서도 두 강자성체 층 사이의 상호교환결합력(interlayer exchange coupling; IEC)은 비자성 금속층의 두께에 의존하여 주기적으로 진동하는 특성이 있다. 즉, 사잇층인 금속층과 달리 반강자성체 NiO층이나 절연체 MgO층일 때, 단원자층 주기로 두께가 증가할수록 상호교환결합력 크기는 단계적으로 감소하여 수직자기 이방성 다층박막 구조에서도 RKKY 진동과 비슷한 현상이 있음을 보고하였다[3, 4].

한편, NiO/Pt 박막을 버퍼층으로 하여 [CoFe/Pt(t_{Pt})/CoFe]/IrMn 다층박막의 수직자기 이방성에 관한 연구 결과에 의하면, CoFe층과 반강자성체인 IrMn층에 의해 고정되어 있는 CoFe층 사이의 상호교환결합력이 Pt층 두께에 따라 진동하는 것을 관찰하였다[5, 6]. 그 진동주기는 대략 Pt의 두 단원자 층에 해당한다. 비자성체인 Pt층 두께에 의존하는 상호교환결합력의 진동

현상은 IrMn층을 통해서 유도된 강자성체/비자성체/강자성체의 구조적인 특성과 관계가 있다. 한편 [Pt/CoFe]₄/NiO(t_{NiO})/[CoFe/Pt]₄ 다층박막 구조에 대하여 수직자기 이방성은 반강자성체 NiO 두께가 4~5 Å인 두 단원자 층에 해당하는 두께에서 주기적 특성이 보였다. 즉, 실온에서 4~5 Å의 주기를 가지고 있는 NiO 두께의 함수로서 결합하고 있는 반강자성체와 강자성체 사이에 진동하는 상호교환결합력이 실온에서 뚜렷하게 나타난 현상이었다[7, 8].

수직자기 이방성 다층박막은 수직면상에서 등방성을 가지므로 수평면상으로 변화시키는 각도 이방성 특성이 존재할 수 있다[9, 10]. 더욱이 초격자 박막의 강자성체 층 두께가 증가함에 따라 수평자기 이방성 특성이 나타나게 된다. 본 연구에서는 자화용이축을 수직면으로 한 glass/buffer/CoFe/Pt/CoFe/IrMn/cap 다층박막 구조에 대해 IrMn층 두께에 따른 수직자기 이방성 특성과 열적 안정성을 조사하였다. 그리고 비정상 홀-전압(Hall-voltage) 측정시 인가된 외부자기장이 수평으로 바뀌는 과정에서 두 강자성체간의 상호교환결합력에 대한 각도 이방성 효과를 관찰하였다.

II. 실험 방법

Buffer/CoFe/Pt/CoFe/IrMn/cap 다층박막을 3×10^{-6} Torr인 초

*Tel: (02) 710-9404, E-mail: jrrhee@sm.ac.kr

고진공 증착 시스템을 이용하여 유리(Corning 7059) 기판 위에 마그네트론 스퍼터링 방법으로 상온에서 증착하였다. 증착시 일축 방향 이방성 자기장은 인가하지 않았다. Pt, CoFe, IrMn의 독립적인 3인치-타겟들을 증착시 플라즈마의 상호간섭이나 타겟성분들 간의 혼재를 방지하기 위해 스테인레스 분리판을 두었다. Pt, CoFe, IrMn 박막들의 증착율은 각각 2.1, 2.2, 1.3 Å/s 이었다. 증착시 0.2 mm 두께의 스테인레스 그림자 마스크를 이용하여 폭 10 mm 길이 30 mm의 4-단자 정방 십자형 박막시료의 크기를 제작하였다. 모든 시료의 CoFe/Pt/CoFe 3층박막의 두께는 CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)/CoFe(10 Å)로 하였으며, 수직 자기이방성 상호교환결합력이 가장 좋은 최적의 buffer층과 cap층의 박막구조와 두께는 각각 NiO(30 Å)/Pt(8 Å)과 Pt(16 Å)로 정하였다. 여기서 buffer층에 속한 반강자성체 NiO층이 강자성체 CoFe층에 미치는 교환결합력의 영향은 Pt층이 존재함으로써 표면에서 차단된 것으로 보여진다.

시료의 자기이력곡선은 박막 면에 수직으로 외부자기장을 인가해 십자형 박막전극 4-단자법으로 전류와 전압을 측정된 비정상 홀-전압 크기(extraordinary Hall-voltage amplitude; EHA) 곡선으로부터 얻었다. 곤란측 자기이력곡선은 외부자기장을 박막 면에 수평 방향으로 인가하여 얻었다. [CoFe/Pt/CoFe]/IrMn 다층박막의 상호교환결합력이 존재하는 반강자성체 IrMn층 두께를 조사하기 위해 CoFe/Pt/CoFe 3층구조 각층의 두께를 고정시키고 IrMn층 두께를 달리하면서 포화되는 상호교환결합력 크기 변화를 조사하였다.

Buffer/CoFe/Pt/CoFe/IrMn/cap 다층박막의 열적안정성을 조사하기 위하여 작업진공도 5×10^{-6} Torr 챔버에서 진공열처리를 적용하였다. 열처리시 외부자기장이 없는 상태에서 히터인 할로겐 램프와 시료 장착용 Cu 블록을 이용하여 도달한 열처리 온도 최대값은 300 °C이었고, 상승과 하강 온도 비율은 각각 2 °C/min와 1 °C/min로 정하였다. 모든 시료는 열처리 최종온도에서 1 hr를 머무르게 하였다. 각도 이방성효과를 조사하기 위해 측정시 인가하는 외부자기장 방향인 면의 수직방향을 0°로 정하였고, 박막면의 수평방향을 90°로 정하였다. 그 외 사잇 각도는 수직방향을 기준으로하여 30°, 45°, 60°로 하였다. 기준 시료들의 홀-전압법으로 측정된 자기이력곡선은 초전도양자간섭소자(superconducting quantum interference device; SQUID) 자력계와 표면자기광학 Kerr 효과(surface magneto Kerr effect; SMOKE)로 측정된 자기이력곡선과 비교하였다.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 Glass/[buffer : NiO(30 Å)/Pt(8 Å)]/[CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)/CoFe(10 Å)]/IrMn(t_{IrMn} Å)/[Cap : Pt(16 Å)] 다층박막에 대하여 반강자성체 IrMn층 두께 의존성을 조사한 그림이다. [CoFe/Pt/CoFe]/IrMn 다층박막에서 IrMn층 두께가 0 Å일 때, 서로 샌드위치구조를 이루고 있는 비자성체인 Pt층을 사이를 두어 강자

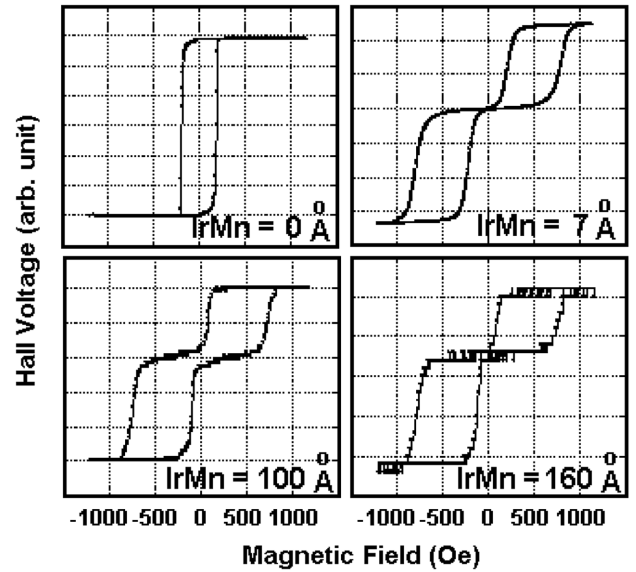


Fig. 1. Antiferromagnetic IrMn layer thickness dependence of Hall-voltage curves for Glass/[buffer : NiO(30 Å)/Pt(8 Å)]/[CoFe (10 Å)/Pt(8 Å)/CoFe 10 Å]/IrMn(t_{IrMn} = 0 Å, 7 Å, 100 Å, and 160 Å)/[cap : Pt(16 Å)] multilayers.

성체인 상·하부 CoFe층들 간의 상호교환결합력이 전혀 일어나지 않았다. 즉, 보지력만 160 Oe인 일반적인 수직자기 이방성 특성을 보여 주었다. 하지만, IrMn 층의 두께의 영향을 받는 7 Å부터 160 Å까지 두 CoFe층간 발생한 상호교환결합력 크기가 1,000 Oe로 비슷한 값을 유지하였다. 더욱이 본 연구진의 실험 결과에 의하면 [Pt/CoFe]_N의 층수와 관계없이 [CoFe/Pt/CoFe]₂과 [CoFe/Pt/CoFe]₃ 다층박막 구조에서도 상호교환결합력이 일

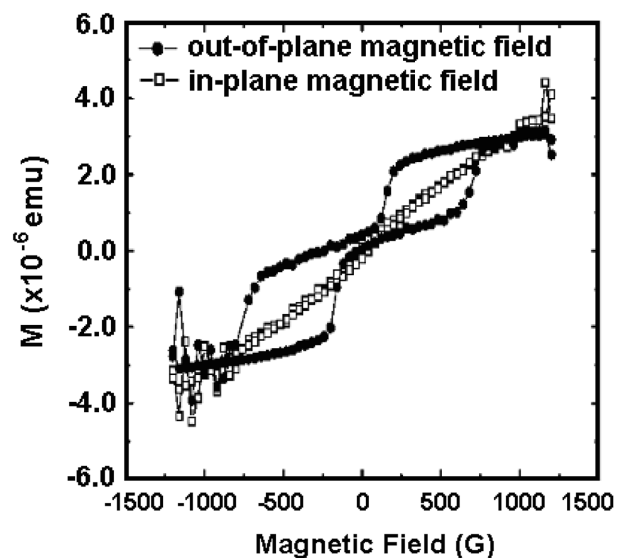


Fig. 2. The SQUID magnetometer curves according to in-plane and out-of-plane magnetic field for [CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)/CoFe(10 Å)]/IrMn(100 Å) multilayers.

어는 최소 IrMn층 두께 이상으로 증가하더라도 거의 1,000 Oe로 같은 크기의 상호교환결합력을 가지고 있음을 확인하였다 [11]. 이러한 결과는 반강자성체 IrMn층과 강자성체 CoFe층간의 수평 형상자기이방성 교환결합력에 기인한 수직자기 이방성 효과로 상호교환결합력이 형성된 것으로 생각된다.

Fig. 2는 수직자기 이방성을 가진 [CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)/CoFe(10 Å)]/IrMn(100 Å) 다층박막에 대하여 SQUID 자력계로 측정된 자기이력곡선이다. 수평과 수직면상에서 측정된 자기이력곡선이 각각 뚜렷하게 비교 되었다. CoFe(10 Å)의 수직자성에 대한 포화자화 값은 약 2.5×10^{-6} emu이었다. 외부자기장 $\pm 1,000$ Oe- $\pm 1,500$ Oe 부근에 노이즈형 emu 값들의 요동이 보였다. 그 이유는 시작점과 전환점에서 시료의 안정화를 위하여 머무르면서 측정된 노이즈형 데이터들이 존재하였기 때문이다. 또한 수평과 수직면상에서 측정된 자기이력곡선에서는 1,000 Oe의 상호교환결합 크기를 유지하면서 선형적으로 기울어진 형태를 보였다. 이러한 현상은 SQUID 측정시 유리 기판과 buffer층 및 cap층에서 나오는 상자성체적인 자기 물성적 특성이 더하여졌기 때문이다. 비정상 홀-전압 곡선과 SQUID 곡선을 비교할 때, 상호교환결합력 및 보자력 크기와 포화자화 값들은 거의 일치함을 알 수 있다. 수직자기 이방성 특성을 측정하는 물리량과 측정 방법이 서로 다르지만, 다른 두 개의 M-H 곡선들을 통해서 상호교환결합력을 띤 수직자기 이방성 다층박막임을 확인하였다.

Fig. 3은 [CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)CoFe(10 Å)]/(IrMn (100 Å)

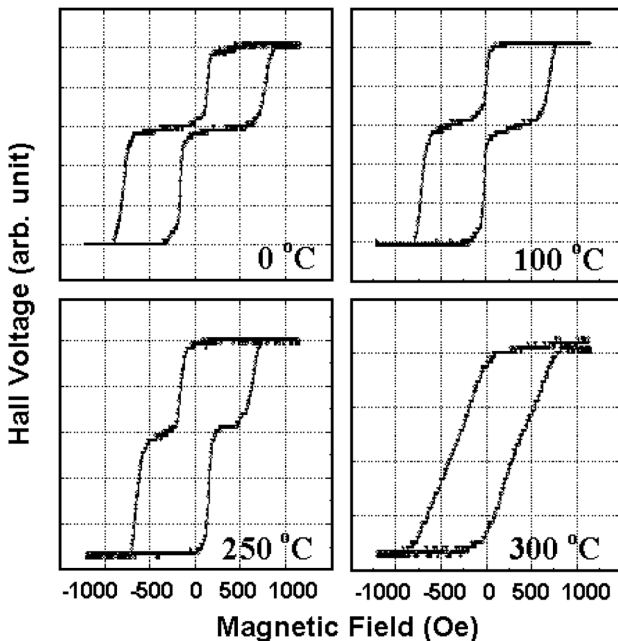


Fig. 3. Annealing temperature dependence of Hall-voltage curves for Glass/buffer/[CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)/CoFe(10 Å)]/IrMn(100 Å)/cap multilayers. Annealing temperatures are room, 100 °C, 250 °C, and 300 °C, respectively.

다층박막에 대하여 5×10^{-6} Torr 진공챔버 내에서 열처리한 온도 의존성을 보여주고 있다. 진공 열처리 시 인가한 외부 자기장 없이 상승과 하강 온도 비율은 각각 2 °C/min와 1 °C/min로 다르지만, 열처리하는 시료가 최종온도에 도달했을 때는 1hr를 머무르게 하였다. 100 °C에서 열처리한 상호교환결합력의 크기는 열처리 전 상온에서의 크기보다 작은 800 Oe로 줄어들었다. 또한 열처리 온도 150 °C에서 비교적 안정된 수직자기 이방성을 유지하지만, 100 °C보다 더 줄어든 650 Oe의 상호교환결합력을 나타내었다. 250 °C부터는 상호교환결합력이 500 Oe으로 줄어들면서, 300 °C에서는 전혀 상호교환결합력을 가지고 있지 않은 수직자기와 수평자기 이방성이 혼합된 상태임을 보였다. 이러한 결과는 온도 상승에 따라 CoFe/Pt 계면에서의 원자간 섞임보다도 IrMn층과 CoFe층간 계면에서 Mn 원자들의 빠른 확산에 따른 성분비 차이로 인해 반강자성체 특성이 둔화하여 수직자기 이방성 다층박막으로서 상호교환결합력이 상쇄된 것으로 생각된다[12, 13].

Fig. 4는 [CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)CoFe(10 Å)]/(IrMn (100 Å) 다층박막에 대하여 측정 각도 의존성을 보여주고 있다. 이는 0°에

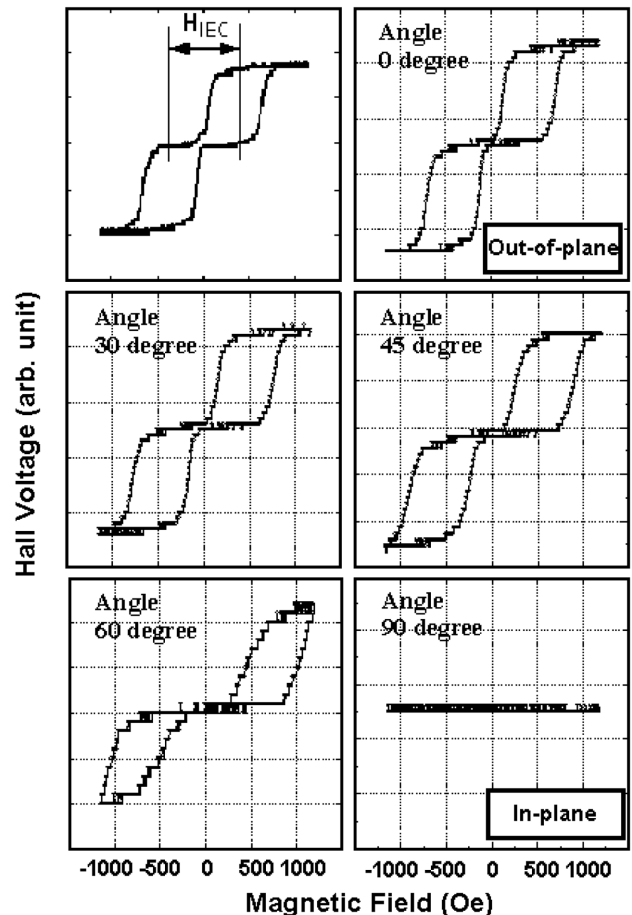


Fig. 4. Hall-voltage curves measured at 0°, 30°, 45°, 60°, 90° for Glass/buffer/[CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)/CoFe(10 Å)]/IrMn(100 Å)/cap multilayers with perpendicular magnetic anisotropy.

서 뿐만 아니라 30°와 45°에서도 변함없이 수직자기 이방성을 가지고 있으며 상호교환결합력은 1,000 Oe 근방의 값을 유지하고 있었다. 60°에서 상호교환결합력이 대략 1,500 Oe으로 증가하다가 90°에서 무한대로 커져 수직자기 이방성을 띄지 않고 수평자성만을 보이고 있다. 본 연구진의 실험결과 보고에 의하면 본 시료의 다층박막 구조에서는 강자성체 CoFe층간의 상호교환결합력의 크기가 진동하는 현상을 나타내며 이것은 얇은 Pt 층 두께 간격의 맞은편에 두 강자성체 층 사이에서 얻은 상호교환결합력의 유일한 속성으로 보였다[5]. 이러한 결과는 [CoFe/Pt/CoFe/IrMn] 다층박막이 수직자기 이방성 각도에 의존하는 상호교환결합력 특성을 갖기 때문에 일어나는 현상으로 생각된다.

Z. Y. Liu 그룹과 Bruno 그룹들은 Pt층 단위격자 구조에서 $2d \approx 4 \text{ \AA}$ ($d = 1.96 \text{ \AA}$ 는 (111) 면 사이 거리) 각 금속층 두께에 대하여 절연체 간격의 순서대로 반강자성체로 자화한 수직면이 존재하는 결과를 보고하였다[3, 4]. 그러므로 Pt 두께에 따라 상호교환결합력이 진동하는 현상은 IrMn층을 통하여 순서대로 유도된 반강자성체와 관계가 있다. 그러나 수평형상자기 이방성의 경우, 이러한 결과는 반강자성체 결합매체에서 얻어진 크기와 전형적인 특징들과는 다르다. 이것은 Co/Ru/Co 다층박막에서 실험적으로 나타난 긴 주기 $Ru(t_{Ru} \text{ \AA}) = 11 \text{ \AA}$ 결과로서 결합제기가 $Ru(t_{Ru} \text{ \AA})$ 에 감소하는 RKKY 결합에 의해 일어나기 때문이다. 그러므로 이 결과는 Pt층을 가진 IrMn을 통해 유도된 [CoFe/Pt/CoFe] 다층박막에 대하여 나타난 고유한 상호교환결합력의 진동 특성으로 존재하는 것이다. 즉, 각도에 의존하는 수직자기 이방성 특성에서 나타난 결과이며, 수직형상자기 교환 바이어스 시스템의 중요한 특징임을 보여준 하나의 실례라고 할 수 있다.

IV. 결 론

[CoFe/Pt/CoFe]/IrMn 다층박막에 대하여 반강자성체 IrMn층 두께 의존성 및 열적 안정성, 그리고 수평으로 전환하는 각도 의존성을 갖는 수직 자기이방성 특성을 관찰하였다. 본 연구에서 [CoFe(10 \AA)/Pt(8 \AA)/CoFe(10 \AA)]/IrMn은 IrMn 두께가 7 \AA 부터 비교적 안정된 상호교환결합력을 보이며 250 °C까지 열적 안정성을 유지하였다. IrMn 층을 통해 유도된 강자성체/비자성체/강자성체의 구조적인 특성에 관계가 있음을 알 수 있었다.

또한 수직자기 이방성을 가진 [CoFe/Pt/CoFe]/IrMn 다층박막에서 CoFe층과 반강자성체인 IrMn층에 의해 고정되어 있는 CoFe층 사이의 상호교환결합력이 Pt층 두께에 따라 진동하는 것은 각도 이방성 효과에 기인한 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-313-C00241).

참고문헌

- [1] D. T. Margulies, M. E. Schabes, W. McChesney, and E. E. Fullerton, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 91 (2002).
- [2] S. S. P. Parkin, N. More, and K. P. Roche, *Phys. Rev. Lett.*, **64**, 2304 (1990).
- [3] Z. Y. Liu and S. Adenwalla, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 37207 (2003).
- [4] P. Bruno and Chappert, *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 1602 (1991).
- [5] J. G. Choi, S. S. Lee, D. G. Hwang, and S. W. Kim, *Sae Mulli (The Kor. Phys. Soc.)*, **50**, 334 (2005).
- [6] S. S. Lee, J. G. Choi, S. W. Kim, D. G. Hwang, and J. R. Rhee, *J. Magnetism (The Kor. Mag. Soc.)*, **10**, 44 (2005).
- [7] S. W. Kim, J. Y. Lee, S. S. Lee, E. J. Hahn, and D. G. Hwang, *J. Magnetism (The Kor. Mag. Soc.)*, **9**, 121 (2005).
- [8] S. S. Lee, J. R. Rhee, J. G. Choi, S. W. Kim, D. G. Hwang, Y. S. Hong, and M. S. Yoo, *Phys. Stat. Sol. (c)*, **1**, 3560 (2004).
- [9] J. Heo, H. S. Kim, J. H. Choi, and K. A. Lee, *J. Kor. Mag. Soc.*, **18**, 98 (2008).
- [10] K. S. Lee, K. J. Lee, M. H. Jung, and K. Shin, *J. Kor. Mag. Soc.*, **18**, 94 (2008).
- [11] S. S. Lee, J. G. Choi, S. W. Kim, J. R. Rhee, and D. G. Hwang, *J. Magn. Magn. Mater.*, **304**, e91 (2006).
- [12] S. S. Lee, B. K. Kim, J. Y. Lee, D. G. Hwang, S. W. Kim, M. Y. Kim, J. Y. Hwang, and J. R. Rhee, *J. Appl. Phys.*, **95**, 7525 (2004).
- [13] S. W. Kim, J. K. Kim, J. H. Kim, B. K. Kim, S. S. Lee, D. G. Hwang, and J. R. Rhee, *J. Appl. Phys.*, **93**, 6602 (2003).

Anisotropy Angle Dependence of Interlayer Exchange Coupling of Perpendicular Magnetic [CoFe/Pt/CoFe]/IrMn Multilayers

Sang-Suk Lee

Dept. of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University, Wonju, Gangwondo 220-702, Korea

Jong-Gu Choi

Oriental Medicine Institute, Sangji University, Wonju, Gangwondo 220-702, Korea

Do-Guwn Hwang

Dept. of Applied Physics and Electronics, Sangji University, Wonju, Gangwondo 220-702, Korea

Jang-Roh Rhee*

Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Korea

(Received 29 September 2008, Received in final form 30 October 2008, Accepted 5 November 2008)

Dependence of interlayer exchange coupling on antiferromagnetic IrMn thickness, thermal stability, and parallel anisotropy angle in perpendicular anisotropy [CoFe/Pt/CoFe]/IrMn multilayers was investigated. The magnetic property of [CoFe(10 Å)/Pt(8 Å)/CoFe(10 Å)] induced by antiferromagnetic ordering of IrMn layer was maintained a stable perpendicular anisotropy up to 250°C and from 7 Å to 160 Å of IrMn thickness. The value of interlayer exchange coupling of [CoFe/Pt/CoFe]/IrMn multilayers with perpendicular anisotropy increased to 1.5 times at anisotropy angle of 60° more than of 0°. On the other side, the interlayer exchange coupling at anisotropy angle of 90° was ∞ Oe, it was likely diverted to a parallel shape magnetization.

Keywords : interlayer exchange coupling (IEC), perpendicular magnetic anisotropy, nonmagnetic metallic Pt layer, antiferromagnetic IrMn layer, [CoFe/Pt/CoFe]/IrMn multilayers