

Rotatable Anisotropy Field in Exchange Coupled CoFe/MnIr(2.5 nm) Thin Films

Seok Soo Yoon and Dong Young Kim*

Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

(Received 9 June 2017, Received in final form 13 June 2017, Accepted 14 June 2017)

The rotatable anisotropy effect was observed in the ferromagnetic resonance measurement in exchange coupled ferromagnetic/antiferromagnetic thin films and it was due to rotation of antiferromagnetic layer by the exchange coupling energy. We analyzed the CoFe thickness dependence of rotatable anisotropy field and ferromagnetic resonance linewidth in exchange coupled CoFe(t_F)/MnIr(2.5 nm) thin films. The rotatable anisotropy field was inversely proportional to the CoFe thickness and it was well fitted by the rotatable anisotropy energy of 0.96 erg/cm². The ferromagnetic resonance linewidth were linearly proportional to the rotatable anisotropy field in $t_F < 50$ nm, while it was more dominated by the eddy current effect in $t_F > 50$ nm.

Keywords: rotatable anisotropy, linewidth, exchange coupling, critical thickness, eddy current

교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr(2.5 nm) 박막의 회전 이방성 자기장 특성

윤석수 · 김동영*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2017년 6월 9일 받음, 2017년 6월 13일 최종수정본 받음, 2017년 6월 14일 게재확정)

회전 이방성 효과는 교환 결합력을 갖는 강자성/반강자성 박막의 강자성 공명 측정에서 나타나는 현상으로 교환 결합력 에너지에 의한 반강자성층의 회전에 기인한다. 본 연구에서는 CoFe(t_F)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료에서 CoFe의 두께에 따른 회전 이방성 자기장과 강자성 공명 선폭 특성을 분석하였다. 회전 이방성 자기장은 t_F 에 반비례하는 두께 의존성을 보였으며, 이들 결과는 회전 이방성 에너지가 0.96 erg/cm²인 조건을 만족하였다. 강자성 공명 선폭은 $t_F < 50$ nm에서 회전 이방성 자기장의 세기에 비례하는 특성을 보였으며, $t_F > 50$ nm에서 와전류에 의한 특성이 두드러지게 나타났다.

주제어 : 회전 이방성, 강자성 공명 선폭, 교환결합 에너지, 임계 두께, 와전류

I. 서 론

거대 자기저항 또는 터널링 자기저항 소자는 출력 신호를 안정화 시키기 위하여 교환 결합력(exchange coupling)을 갖는 강자성(F)/반강자성(AF) 박막을 고정층으로 사용한다[1-5]. F/AF 박막에서 나타나는 교환 바이어스(exchange bias), 보자력의 증가[6], 회전 이방성(rotatable anisotropy)[7-9], training 효과[10, 11] 등 다양한 현상은 AF층이 F층에 미치는 영향으로 해석되고 있다. F/AF 박막은 계면에 존재하는 비상보성 AF 스핀에 의하여 F와 AF를 결합시키는 교환 결합력 에너지 J_c 를 가지며, 일축 이방성 에너지 K_{AF} 를 갖는 AF층은 J_c

의 영향을 받으며, AF층의 면적당 에너지는 $K_{AF}t_{AF}$ 이다. $K_{AF}t_{AF} > J_c$ 인 경우, 한쪽 방향으로 고정된 AF층은 교환 바이어스 현상을 야기한다. 한편, $K_{AF}t_{AF} < J_c$ 인 경우, AF층은 J_c 에 의하여 회전 이방성 현상을 야기하며, AF층의 이방성 에너지 K_{AF} 는 보자력을 증가시킨다. 이렇듯 F/AF 박막에서 나타나는 다양한 현상은 AF층의 두께에 의존하며, $K_{AF}t_{AF} = J_c$ 인 조건을 만족하는 AF층의 임계 두께 t_c 를 경계로 AF층의 고정 또는 회전 특성이 나타난다.

거대 자기저항 또는 터널링 자기저항 소자의 고정층에 사용되는 교환 바이어스 현상은 한쪽 방향으로 고정된 AF층의 계면에 존재하는 비상보성 AF 스핀에 의하여 자화 곡선이 한쪽 방향으로 이동되어 나타난다[12, 13]. 교환 바이어스는 한쪽 방향으로 치우친 AF 스핀의 영향에 기인하므로 일방 이방성(unidirectional anisotropy, J_k) 특성을 보이며, 다음과

같이 구한다[14, 15].

$$J_k = H_{ex} M_s t_F \quad (1)$$

여기서 H_{ex} 는 교환 바이어스 자기장이고, M_s 및 t_F 는 각각 F층의 포화 자화량 및 두께이다.

AF층의 두께가 임계 두께 이하에서는 보자력 증가 및 회전 이방성 현상이 나타난다. 보자력 증가는 AF층의 반전에 의한 영향으로 해석되고 있으며[6], 회전 이방성은 F층과 AF층이 자기장 방향에 따라서 함께 회전하는 특성에 기인한다. 회전 이방성은 자기저항 소자에 사용되는 고정층의 역할을 방해하는 요소로 작용할 뿐만 아니라 고가의 강자성 공명 측정에서만 관측되므로 이들에 대한 특성 분석은 아직까지도 미진하다.

교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막에서 반강자성체인 MnIr의 임계 두께는 약 3.0 nm이므로[16], 본 연구에서는 회전 이방성 특성 분석을 위하여 MnIr의 두께를 임계 두께 이하인 2.5 nm로 고정한 CoFe/MnIr(2.5 nm) 재료를 제작하였다. 강자성 공명 신호를 측정하여 CoFe층의 두께에 따른 회전 이방성 자기장 및 강자성 공명 선폭 변화를 분석하였다.

II. 실험 방법

교환 결합력을 갖는 CoFe(t_F nm)/MnIr(2.5 nm) 박막은 Si 기판 위에 DC 마그네트론 스퍼터 방법을 사용하여 증착하였다. 회전 이방성 자기장 특성 분석을 위하여 MnIr의 두께는 2.5 nm로 고정하였으며, CoFe의 두께는 $t_F = 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80$ 및 100 nm로 변경하였다. CoFe/MnIr 박막의 하부층으로는 Ta(5 nm)/Cu(10 nm)를 사용하였으며, 시편의 산화를 방지하기 위한 상부층으로 Ta(5 nm)를 증착하였다. 제조된 CoFe/MnIr 박막은 3 kOe의 자기장을 인가한 후, 300 °C의 고온에서 1시간 동안 진공 자기장 열처리(10^{-6} torr)를 하였다.

열처리된 박막의 자기장 각도에 따른 강자성 공명 신호는 9.89 GHz(X-band)의 주파수에서 운용되는 Bruker Xepr를 사용하여 측정하였다. 각도 의존성을 분석하기 위하여 수평면(in-plane)에서 자기장 방향(θ_H)을 0에서 360°까지 10°씩 증가시킨 후 자기장에 따른 강자성 공명 신호를 측정하였다. 강자성 공명 신호로부터 강자성 공명 자기장 H_{res} 와 강자성 공명 선폭 ΔH_{pp} 를 각각 도출하였다. H_{res} 의 각도 의존성으로부터 일축 이방성(uniaxial anisotropy) 자기장 H_k 및 회전 이방성 자기장 H_{ra} 등 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막의 이방성 특성 분석에 활용하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 장치는 마이크

로파 대역의 주파수를 갖는 교류 자기장 에너지와 강자성 재료의 스핀 에너지가 공명을 일으킬 때, 흡수되는 마이크로파 에너지를 측정한다. 강자성체에서 마이크로파가 최대 흡수되는 직류 자기장을 강자성 공명 자기장 H_{res} 이라 하며, 각도에 따른 H_{res} 를 측정하여 강자성 재료의 이방성 에너지를 분석한다. 또한 강자성 공명 신호의 선폭 ΔH_{pp} 를 측정하여 스핀의 감쇠 특성, 강자성체 내부의 자성 특성을 분석한다[17-20]. 본 연구에서는 FMR 측정 장치를 이용하여 CoFe(t_F)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료의 각도에 따른 강자성 공명 신호를 측정하였으며, 강자성체인 CoFe의 두께에 따른 회전 이방성 자기장과 강자성 공명 선폭 특성을 분석하였다. 반강자성체인 MnIr(2.5 nm)에 의한 회전 이방성 특성을 분석하기 위하여 CoFe(50 nm) 단일 박막을 기준 재료로 사용하였다.

Fig. 1은 기준 재료로 사용한 CoFe(50 nm) 단일 박막과 CoFe(50)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료 각각에서 측정한 강자성 공명 자기장 H_{res} 의 각도 의존성을 나타낸 것이다. 포화 자화량이 1690 emu/cm³인 CoFe 박막 재료는 형상 이방성 자기장($4\pi M_s$)이 일축 이방성 자기장 H_k , 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 및 회전 이방성 자기장 H_{ra} 등의 유효 이방성 자기장 보다 매우 크므로 H_{res} 는 다음과 같이 간단한 근사식으로 표현된다[17].

$$H_{res} = \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 \frac{1}{4\pi M_s} - H_k \cos 2\theta_H - H_{ex} \cos \theta_H - H_{ra} \quad (2)$$

여기서 γ 는 자기 스핀의 자이로 계수(gyromagnetic factor)이고, $\omega (= 2\pi f)$ 는 마이크로파의 각주파수이며, θ_H 는 박막 재료의 수평면에서 자화 용이축으로부터 측정된 자기장의 방향이다.

Fig. 1에서 보인 실선은 CoFe(50 nm) 단일 박막과 CoFe(50)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료 각각에서 측정한 H_{res} 의 각

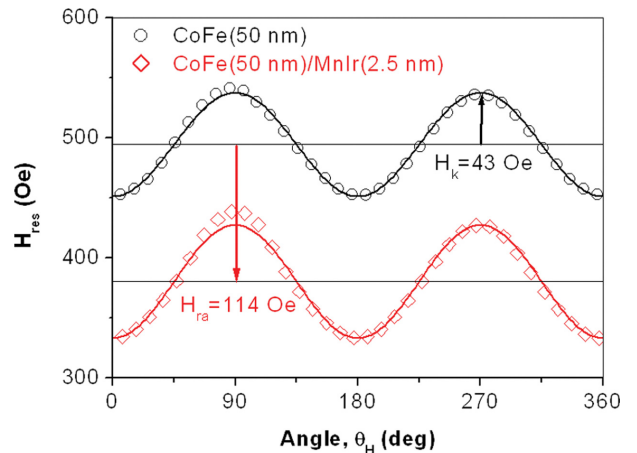


Fig. 1. (Color online) Angular dependence of ferromagnetic resonance field (H_{res}) of CoFe(50 nm) and CoFe(50 nm)/MnIr(2.5 nm) thin films. The solid lines were fitted by Eq. (2).

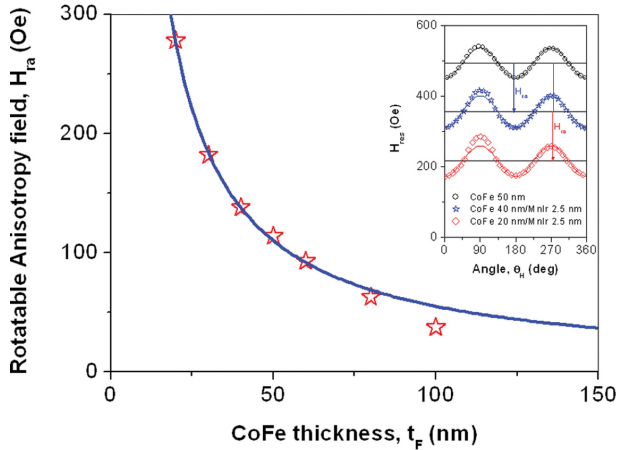


Fig. 2. (Color online) CoFe thickness dependence of rotatable anisotropy field (H_{ra}). The solid line was fitted by Eq. (4). The insert figure showed the angular dependence of ferromagnetic resonance field (H_{res}) of CoFe(50 nm), CoFe(40 nm)/MnIr(2.5 nm) and CoFe(20 nm)/MnIr(2.5 nm) thin films.

도 의존성을 식(2)를 사용하여 계산한 결과이다. 이들 계산 결과로부터 기준 재료로 사용한 CoFe(50 nm) 단일 박막과 교환 결합력을 갖는 CoFe(50)/MnIr(2.5 nm) 재료의 이방성 자기장 특성을 도출하였다. CoFe(50 nm) 단일 박막은 일축 이방성 특성을 보이며, $H_k = 43$ Oe를 얻었다. 한편, CoFe(50)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료는 $H_k = 47$ Oe, $H_{ex} = 0$ Oe 및 $H_{ra} = 114$ Oe의 값을 얻었다. 따라서 임계 두께 이하의 반강자성층을 갖는 CoFe(50)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료에서는 고정되지 않은 비상보성 AF 스핀들만 존재하며, 이들 스핀들이 자기장 방향으로 회전하는 특성에 의해 회전 이방성 자기장 H_{ra} 만 나타났음을 알 수 있다.

Fig. 2는 CoFe의 두께에 따른 회전 이방성 자기장 H_{ra} 의 변화 특성을 보인 것이다. Fig. 2에 삽입한 그림은 CoFe의 두께에 따른 H_{ra} 의 변화 특성을 보이기 위하여 CoFe(50 nm), CoFe(40)/MnIr(2.5 nm) 및 CoFe(20)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료 각각에서 측정된 강자성 공명 자기장 H_{res} 의 각도 의존성을 나타낸 것이다. 회전 이방성 자기장 H_{ra} 는 CoFe의 두께에 따라 감소하는 특성을 보였다. 이러한 감소 특성은 식(1)에 보인 교환 바이어스 자기장과 동일한 경향이며, 회전 이방성 자기장을 유발하는 회전 이방성 에너지(rotatable anisotropy energy, J_{ra})는 식(1)과 유사하게 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$J_{ra} = H_{ra} M_s t_F \quad (3)$$

CoFe(50)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료에서 측정된 $H_{ra} = 114$ Oe의 값을 식(3)에 대입하여 회전 이방성 에너지 $J_{ra} = 0.96$ erg/cm²의 값을 얻었다. 식(3)으로부터 강자성체의 두께에 따

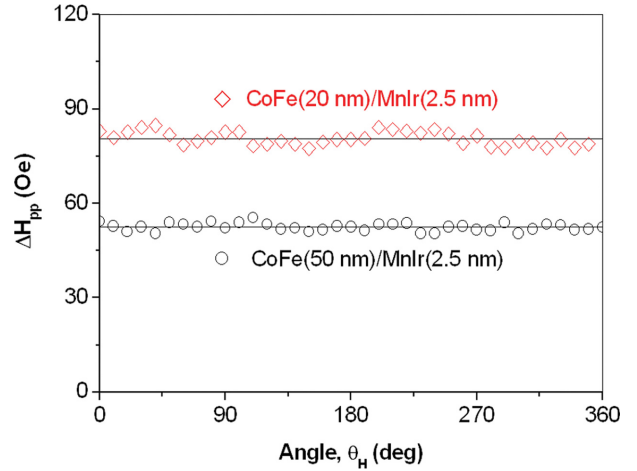


Fig. 3. (Color online) Angular dependence of ferromagnetic resonance linewidth (ΔH_{pp}) of CoFe(50 nm)/MnIr(2.5 nm) and CoFe(20 nm)/MnIr(2.5 nm) thin films.

른 회전 이방성 자기장 H_{ra} 는 다음과 같이 표현된다.

$$H_{ra} = \frac{J_{ra}}{M_s t_F} \quad (4)$$

Fig. 2의 실선은 식(4)를 이용하여 CoFe의 두께에 따른 H_{ra} 를 계산한 결과이며, 계산 결과는 측정 결과와 일치함을 볼 수 있었다. 이들 결과로부터 H_{ra} 는 CoFe의 두께에 반비례하는 특성을 갖고 있음을 알 수 있었다. 여기서 식(4)를 이용하여 H_{ra} 를 계산하기 위하여 $J_{ra} = 0.96$ erg/cm²의 값을 사용하였다.

Fig. 3은 CoFe(50)/MnIr(2.5 nm) 및 CoFe(20)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료 각각에서 측정된 강자성 공명 선폭 ΔH_{pp} 의 각도 의존성을 나타낸 것이다. $t_F = 20$ nm와 $t_F = 50$ nm 재료의 ΔH_{pp} 는 각도에 따라 거의 일정한 값을 보였으며, 각도에 따라 일정한 값을 갖는 회전 이방성 자기장은 각도에 따른 ΔH_{pp} 에 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있었다. 그러나, 회전 이방성 자기장이 큰 $t_F = 20$ nm 재료에서는 회전 이방성 자기장이 작은 $t_F = 50$ nm 재료에서 보다 ΔH_{pp} 가 증가하였다. 본 연구에서는 회전 이방성 자기장이 강자성 공명 선폭 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 4는 회전 이방성 자기장에 따른 ΔH_{pp} 의 변화 특성을 보인 것이다. ΔH_{pp} 는 회전 이방성 자기장의 세기에 비례하는 특성을 보였으며, 이러한 결과로부터 CoFe(t_F)/MnIr(2.5 nm) 재료의 ΔH_{pp} 는 CoFe의 두께에 반비례함을 알 수 있었다.

$$\Delta H_{pp}^{ra} \propto H_{ra} \propto \frac{1}{t_F} \quad (5)$$

한편, Fig. 4에서 보인 것과 같이 회전 이방성 자기장이

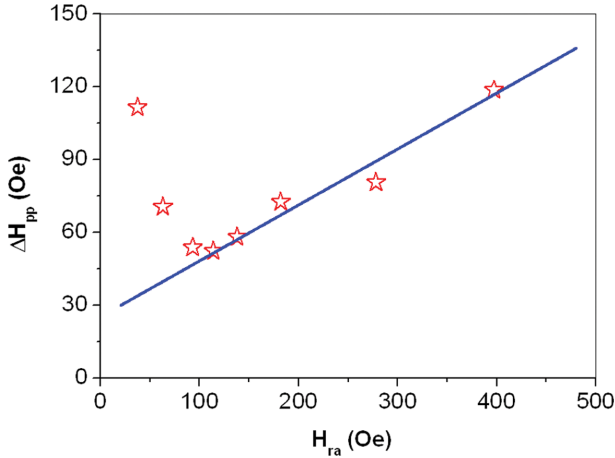


Fig. 4. (Color online) Linear relationship between ferromagnetic resonance linewidth (ΔH_{pp}) and rotatable anisotropy field (H_{ra}) in CoFe/MnIr(2.5 nm) bilayers.

작은(t_F 가 두꺼운) 재료에서는 식(5)의 영향을 따르지 않고 오히려 선폭이 증가하는 특성을 보였다. 즉, 강자성층의 두께가 증가함에 따라서 회전 이방성 자기장은 감소하였지만 강자성 공명 선폭의 증가 특성은 더욱 두드러지게 나타났다. 강자성층의 두께에 따른 강자성 공명 선폭의 증가 특성은 금속의 두께가 증가함에 따라 두드러지게 나타나는 와전류(eddy current, ec)에 의한 영향으로 분석되고 있다[21, 22].

$$\Delta H_{pp}^{ec} = \frac{8\pi^2 M_s \omega^2}{3c^2 \rho} t_F^2 \quad (6)$$

여기서 c 는 진공에서 빛의 속력이며, ρ 는 금속성 강자성층의 비저항이다. 식(6)에서 보인 것과 같이 와전류에 의한 강자성 공명 선폭 증가는 t_F^2 에 비례한다. 따라서 CoFe(t_F)/MnIr(2.5 nm) 재료에서 CoFe의 두께에 따른 ΔH_{pp} 는 회전 이방성 자기장에 의한 영향과 두께에 의존하는 와전류에 의한 영향을 모두 고려하여야 한다.

$$\Delta H_{pp} = \Delta H_{pp}^{ra} + \Delta H_{pp}^{ec} \quad (7)$$

Fig. 5는 CoFe의 두께에 따른 ΔH_{pp} 의 측정 결과와 식(5), (6) 및 (7)을 이용하여 분석한 결과를 보인 것이다. 붉은 점선은 회전 이방성 자기장에 의한 영향으로 식(5)을 사용하여 계산한 결과이며, 점선은 와전류에 의한 영향으로 식(6)을 사용하여 계산한 결과이다. 실선은 두 가지 영향을 모두 고려하여 식(7)을 이용하여 계산한 결과로, ΔH_{pp} 의 측정 결과와 일치함을 알 수 있었다. 이들 분석 결과로부터 CoFe(t_F)/MnIr(2.5 nm) 재료의 ΔH_{pp} 는 회전 이방성 자기장의 크기에 비례하는 특성을 갖고 있으며, 강자성체의 두께가 증가함에 따라 와전류에 의한 특성이 두드러지게 나타남을 알 수 있었

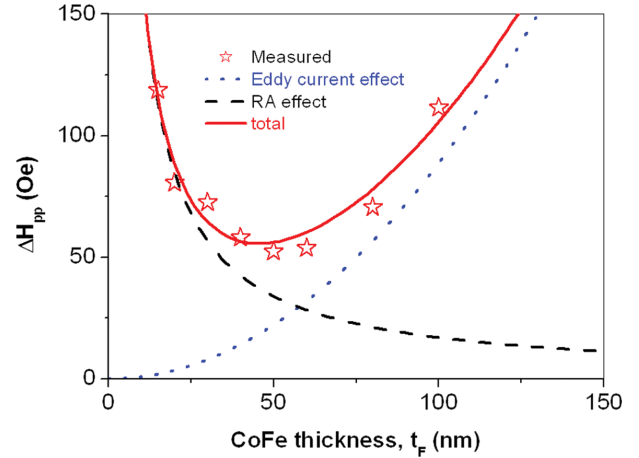


Fig. 5. (Color online) CoFe thickness dependence of ferromagnetic resonance linewidth (ΔH_{pp}). The solid line was fitted by Eq. (7). The dash and dot lines were calculated by Eqs. (5) and (6) for rotatable anisotropy field and eddy current effect, respectively.

다. 따라서 CoFe(t_F)/MnIr(2.5 nm) 재료에서 CoFe의 두께에 따른 ΔH_{pp} 는 회전 이방성 자기장에 의한 영향과 두께에 의존하는 와전류에 의한 영향을 모두 고려하여야 함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

교환 결합력을 갖는 강자성(F)/반강자성(AF) 박막에서 임계 두께 이하의 AF층은 F층의 자화 방향과 반대 방향으로 정렬되어 F층의 방향에 따라 회전하는 회전 이방성 특성을 보인다. 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막 재료에서 MnIr의 임계 두께는 약 3.0 nm이므로 회전 이방성 특성을 분석하기 위하여 MnIr의 두께를 임계 두께 이하인 2.5 nm로 고정된 CoFe/MnIr(2.5 nm) 재료를 제작하였다. 자기장 각도에 따른 강자성 공명 신호를 측정하여 CoFe의 두께에 따른 회전 이방성 자기장(H_{ra})과 강자성 공명 선폭(ΔH_{pp}) 특성을 분석하였다.

CoFe/MnIr(2.5 nm) 박막 재료의 회전 이방성 자기장을 측정하기 위하여 CoFe(50 nm)의 강자성 공명 자기장을 기준 신호로 사용하였다. CoFe(50 nm)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료의 회전 이방성 자기장 $H_{ra} = 114$ Oe로 측정되었으며, 이는 회전 이방성 에너지가 0.96 erg/cm²에 해당하는 값으로 계산되었다. CoFe(t_F)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료에서 측정된 H_{ra} 는 CoFe의 두께에 반비례하는 특성을 보였으며, 이는 F/AF 계면에서 고정되지 않은 비상보성 AF 스핀의 영향에 의한 특성임을 알 수 있었다.

CoFe(t_F)/MnIr(2.5 nm) 박막 재료에서 CoFe의 두께에 따른 강자성 공명 선폭(ΔH_{pp})을 측정하였다. CoFe의 두께가 50 nm 이하의 재료에서 측정된 ΔH_{pp} 는 CoFe의 두께에 따라 감

소하는 특성을 보였으며, 이는 CoFe의 두께에 반비례하는 회전 이방성 자기장과 비례하는 특성을 보였다. CoFe의 두께가 50 nm 이상의 재료에서 측정된 ΔH_{PP} 는 CoFe의 두께에 따라 증가하는 특성을 보였으며, 이는 금속 재료의 두께 제곱에 비례하는 와전류에 의한 강자성 공명 선평 증가 특성으로 해석되었다.

이들 결과로부터 반강자성층이 임계 두께 이하인 F/AF 박막에서 나타나는 회전 이방성 특성은 F/AF 계면에 존재하는 고정되지 않은 비상보성 AF 스핀에 의한 계면 효과임을 알 수 있었으며, 회전 이방성 자기장의 증가는 강자성 공명 선평의 증가 원인으로 작용하고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] E. Berkowitz and K. Takano, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 552 (1999).
- [2] M. Kiwi, *J. Magn. Magn. Mater.* **234**, 584 (2001).
- [3] G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, *Phys. Rev. B* **39**, 2489 (1989).
- [4] S. S. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S. H. Yang, *Nature Mater.* **3**, 862 (2004).
- [5] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, *Nature Mater.* **3** 868 (2004).
- [6] D. Y. Kim and S. S. Yoon, *J. Kor. Magn. Soc.* **24**, 140 (2014).
- [7] R. D. McMichael, M. D. Stiles, P. J. Chen, and W. F. Egelhoff, *Phys. Rev. B* **58**, 8605 (1998).
- [8] J. Geshev, L. G. Pereira, and J. E. Schmidt, *Phys. Rev. B* **66**, 134432 (2002).
- [9] L. Wee, R. L. Stamps, L. Malkinski, and Z. Celinski, *Phys. Rev. B* **69**, 134426 (2004).
- [10] C. Binek, S. Polisetty, X. He, and A. Berger, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 067201 (2006).
- [11] D. Y. Kim, S. S. Yoon, C. G. Kim, M. Tsunoda, and M. Takahashi, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 3865, (2009).
- [12] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, *Phys. Rev.* **102**, 1413 (1956).
- [13] W. H. Meiklejohn, *J. Appl. Phys.* **33**, 1328 (1962).
- [14] T. Sato, M. Tsunoda, and M. Takahashi, *J. Appl. Phys.* **95**, 7513 (2004).
- [15] M. Tsunoda, Y. Tsuchiya, T. Hashimoto, and M. Takahashi, *J. Appl. Phys.* **87**, 4375 (2000).
- [16] D. Y. Kim and S. S. Yoon, *J. Kor. Magn. Soc.* **24**, 140 (2014).
- [17] S. Yuan, K. Yu, L. M. Yu, S. X. Cao, C. Jing, and J. C. Zhang, *J. Appl. Phys.* **101**, 113915 (2007).
- [18] D. Y. Kim, *Sae Mulli* **58**, 308 (2009).
- [19] D. Y. Kim and S. S. Yoon, *J. Kor. Magn. Soc.* **23**, 37 (2013).
- [20] S. Misukami, Y. Ando, and T. Miyazaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 580 (2001).
- [21] C. E. Patton, C. H. Wilts, and F. B. Humphrey, *J. Appl. Phys.* **38**, 1358 (1967).
- [22] P. Krivosik, N. Mo, S. Kalarickal, and C. E. Patton, *J. Appl. Phys.* **101**, 083901 (2007).