

## 강자성 공명법을 이용한 CoFe/MnIr 박막의 교환 결합 에너지 분석

김동영\*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

(2012년 11월 25일 받음, 2012년 12월 10일 최종수정본 받음, 2012년 12월 10일 게재확정)

본 연구에서는 CoFe/MnIr 이중층 구조의 계면에 존재하는 비상보성 반강자성(AF) 스핀들에 의한 교환 결합 에너지 특성을 강자성 공명(FMR) 측정법을 이용하여 분석하였다. MnIr의 두께가  $t_{AF}=0, 3$  및  $10$  nm 재료를 열처리한 후 이들 재료의 FMR 신호를 측정하였으며,  $t_{AF}=0$  nm 재료를 기준으로 하여  $t_{AF}=3$  및  $10$  nm 재료의 교환 바이어스 자기장( $H_{ex}$ )과 회전 이방성 자기장( $H_{ra}$ )을 도출하였다.  $300$  °C에서 열처리한 재료의 경우,  $H_{ex}$ 과  $H_{ra}$ 의 합은 MnIr의 임계 두께에 무관하게 동일한 값을 보이는데, 이는 비상보성 AF 스핀들이 모두 한 방향으로 정렬 되었음을 의미한다. 이들 결과로부터 비상보성 AF 스핀들 중에서 일부는 CoFe/MnIr의 계면에 고정되어  $H_{ex}$ 로 발현되어 나타나고, 나머지 부분은 자기장의 방향에 따라서 회전하므로  $H_{ra}$ 로 발현되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 교환 결합 에너지는 교환 바이어스 에너지 및 회전 이방성 에너지의 합으로 표현될 수 있음을 보였다.

**주제어** : 교환 바이어스 자기장, 회전 이방성 자기장, 교환 결합 에너지, 강자성공명

### I. 서 론

강자성(F)층과 반강자성층(AF)으로 구성된 재료에서 자화 곡선의 편이(shift) 현상을 나타내는 교환바이어스(exchange bias) 자기장을  $H_{ex}$ 로 표현하며, 이러한 교환 바이어스 특성은 하드디스크 헤드의 핵심 소자로 활용되는 스핀 밸브형 거대 자기저항 또는 터널링 자기저항 재료의 한쪽 강자성층의 자화를 고정 시킴으로써 자기저항비를 안정화 시키기 위하여 사용되고 있다[1-3]. 또한 스마트폰에서 3축 자기장 센서로 사용되고 있는 홀 소자의 존슨 노이즈(Johnson noise) 특성을 개선하기 위하여 자기저항 소자의 활용을 고려하고 있으며, 이러한 자기저항 소자의 출력 신호에 기여하는 자기저항의 이력 특성을 제거하기 위하여 교환 바이어스 특성을 갖는 F/AF 소재가 이용되고 있다[4, 5]. 따라서 차세대 하드디스크의 헤드 및 고감도 자기장 센서의 신호 안정화를 위하여 교환 바이어스 자기장의 메커니즘 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

교환 바이어스 현상은 표면이 산화된 Co/CoO 미립자에서 처음으로 발견되었다[6]. 즉 Co 입자를 산화시킬 경우, 내부에는 강자성체인 Co가 존재하고 외각에는 반강자성 특성을 갖는 CoO가 생성된다. 이때 CoO와 Co의 계면 특성인 교환 결합(exchange coupling) 특성에 의하여 자화 곡선이 한쪽으로 이동되는 교환 바이어스(exchange bias) 특성이 나타난다

[7]. 이러한 교환 바이어스 특성은 F/AF 박막층의 계면에 존재하는 비상보성(uncompensated) AF 스핀에 의하여 일어나는 것으로 알려져 있으며, AF 재료로 MnIr을 사용할 경우 가장 우수한 교환 결합 특성을 보인다[8, 9]. 이들 F/AF 재료를 사용하여 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 특성을 측정하여 교환 바이어스 특성을 분석할 경우 회전 각도에 무관한 비등방성 특성을 갖는 새로운 이방성 특성이 관측되고 있으며, 이러한 이방성 특성을 회전 이방성(rotatable anisotropy) 특성이라고 한다[10-12]. 그러나 이러한 새로운 회전 이방성 특성과 F/AF층 계면에서 일어나는 교환 결합 특성과의 관계는 아직까지 명확히 규명되지 않고 있다.

본 연구에서는 교환 결합 특성이 우수한 CoFe/MnIr 박막 재료의 열처리 온도에 따른 FMR 특성을 측정하여 교환 바이어스 자기장( $H_{ex}$ )과 회전 이방성 자기장( $H_{ra}$ )을 도출하였다. 이들 결과로부터 F/AF 계면에 존재하는 비상보성 AF 스핀에 의한 교환 결합 특성을 분석하였다.

### II. 실험방법

강자성/반강자성 이중층에서 교환 결합력 특성이 우수한  $Co_{70}Fe_{30}/Mn_{75}Ir_{25}$  재료는 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 증착하였다. 이때 CoFe 박막의 두께는 FMR 측정 장치의 측정 범위를 고려하여  $50$  nm로 고정하였으며, MnIr 박막의 두께는  $t_{AF}=0, 3$  및  $10$  nm 재료를 제작하였다. 이들 재료들은 열산화막이 있는 Si 기판 위에 MnIr의 결정 성장을 증진시키기 위하여 하부층(under layer)으로 Ta( $5$  nm)/Cu( $20$

nm)를 증착하였으며, 산화 방지를 위한 보호층(capping layer)으로 Ta(5 nm)를 증착하였다. 모든 재료는 교환 결합 특성을 분석하기 위하여 진공( $\sim 10^{-6}$  torr) 하에서 1.0 kOe의 자기장을 인가하면서  $T_a = 100, 200, 250, 300, 350$  및  $400^\circ\text{C}$ 에서 1 시간 동안 진공 자장 열처리를 수행하였다.

이들 열처리한 재료의 자화 곡선은 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 사용하여 측정하였으며, 평면에서 (in-plane) 자기장의 각도에 따른 강자성 공명 자기장( $H_{res}$ )은 FMR 측정 장치인 Bruker Xep를 사용하여 9.89 GHz(X-band)의 주파수에서 측정하였다. FMR 측정 결과로부터 CoFe/MnIr 재료의  $H_{ex}$ 과  $H_{ra}$ 를 도출하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

교환 결합 특성을 갖는 CoFe/MnIr 재료는 반강자성체인 MnIr의 두께에 따라서 교환 바이어스 특성이 변화된다. 반강자성체인 MnIr의 두께가 임계 두께 이하에서는 교환 바이어스 특성이 나타나지 않고 보자력이 증가하는 형태를 보이며, 임계 두께 이상에서는 반강자성체가 고정되어 교환 바이어스 특성이 나타난다[13]. 이러한 임계 두께가 MnIr의 경우 약

$t_c = 4$  nm임을 이미 확인하였다[14]. 따라서 본 연구에서는 반강자성층의 두께 변화에 따른 교환 결합 특성을 분석하기 위하여 MnIr의 두께가 임계 두께 이하인  $t_{AF} = 3$  nm 재료와 임계 두께 이상인  $t_{AF} = 10$  nm 재료를 이용하였다. MnIr의 두께가 0 nm( $t_{AF} = 0$  nm)인 재료는 강자성체인 CoFe 재료이며 반강자성체에 의한 교환 결합 특성을 비교할 때 기준으로 삼기 위하여 제조하였다. Fig. 1은 CoFe/MnIr 구조에서 MnIr의 두께가  $t_{AF} = 0, 3$  및  $10$  nm 재료를  $300^\circ\text{C}$ 에서 1시간 동안 진공 열처리를 수행한 재료의 자화 곡선 특성을 보인다. Fig. 1(a)에서  $t_{AF} = 0$  nm 재료(CoFe 단일 박막)의 자화 곡선은 교환 바이어스 특성이 나타나지 않고, 강자성체에서 보이는  $H = 0$ 을 기준으로 대칭적인 모양의 이력 특성을 보인다. 즉, 단일 박막 CoFe은 보자력이  $H_c = 17.5$  Oe이며, 포화자화량이  $M_s = 1680$  emu/cc인 강자성 재료이다. Fig. 1(b)에서 교환 결합 특성을 갖는  $t_{AF} = 3$  nm 재료의 자화 곡선은 거의 대칭적인 모양의 이력 특성을 보이며, 보자력은  $H_c = 66.4$  Oe이고 교환 바이어스 자기장은  $H_{ex} = 9.4$  Oe로 나타났다.  $t_{AF} = 3$  nm 재료는  $t_{AF} = 0$  nm 재료에 비하여 보자력이 상당히 증가하였으며, 교환 바이어스 자기장이 약하게 나타나고 있다. 이러한 보자력 증가는 교환 결합 특성을 갖는 F/AF 재료에서 AF 재료의 두께가 임계 두께 이하가 되면서 F층의 자화 반전을 따라서 AF층이 함께 반전하면서 생기는 이력 특성으로 해석된다. Fig. 1(c)에서 보인 것과 같이 교환 결합 특성을 갖는  $t_{AF} = 10$  nm 재료의 자화 곡선은 한쪽으로 이동한 전형적인 교환 바이어스 특성을 나타내는 모양의 이력 특성을 보인다. 즉,  $t_{AF} = 10$  nm 재료에서 교환 바이어스 자기장은  $H_{ex} = 76.1$  Oe로 확연히 나타나지만 뿐만 아니라 보자력도  $H_c = 24.7$  Oe로  $t_{AF} = 0$  nm 재료에 비하여 증가된 특성을 보인다. 이렇듯 교환 바이어스 자기장이 보자력보다 커 교환 바이어스 특성이 확연히 나타나는 재료는 AF층의 두께가 임계 두께이상에서 나타나며, 이러한 재료가 하드디스크 헤드에서 사용되는 스핀 밸브형 거대 자기저항 또는 터널링 자기저항 소재의 고정층에 이용된다.

Fig. 1의 자화 곡선 결과로부터 보자력 증가 및 교환 바이어스 자기장 모두가 F/AF 재료의 계면에서 일어나는 교환 결합 특성과 관계가 있음을 알 수 있다. 그러나 자화 곡선으로부터 구한 보자력 및 교환 바이어스 특성은 자화 곡선을 반복하여 측정할 때 감소하는 training 효과 특성을 보인다[15]. 반복적인 자화 반전 과정 동안 AF층의 특성이 새로운 안정한 상태로 전이되고 있음을 알 수 있다. 따라서 보자력은 F/AF 재료의 자구 특성, 측정 시간 및 측정 횟수 등의 다양한 조건에 따라서 다르게 나타날 수 있다. 이러한 단점을 배제하고 재료의 교환 결합 특성에 의한 자기 이방성 특성을 분석하기 위하여 각도에 따른 FMR 특성을 측정하였다.

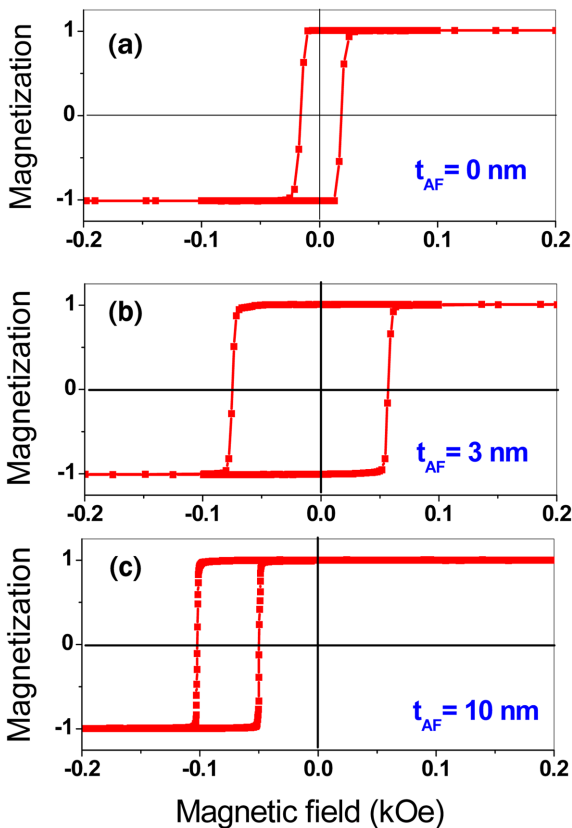


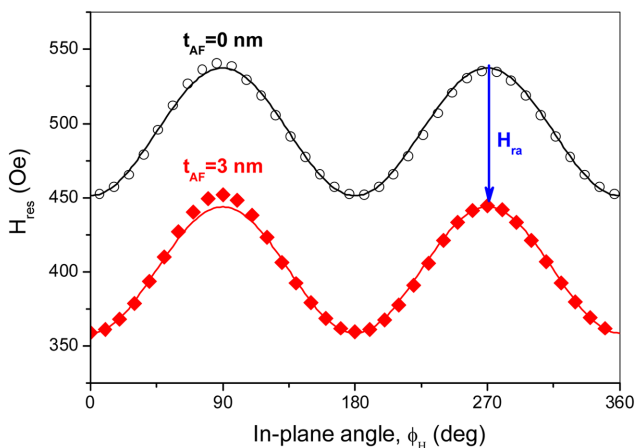
Fig. 1. (Color online) M-H loops in  $300^\circ\text{C}$  annealed CoFe(50 nm)/MnIr( $t_{AF}$ ) with  $t_{AF} =$  (a) 0, (b) 3, and (c) 10 nm.

F/AF 이중층에서 교환 결합 특성에 의한 자기 이방성 특성은 강자성 공명 자기장을( $H_{res}$ ) 이용하여 분석되고 있으며, 평면에서 측정된  $H_{res}$ 는 강자성층의  $4\pi M_s$ 가 재료의 유효 이방성 자기장( $H_{eff}$ ) 보다 매우 클 경우 다음과 같이 간단하게 표현된다[16, 17].

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

여기서  $\gamma = 1.92 \times 10^7$  rad/sec-Oe는 자기 스핀의 자이로 계수 (gyro magnetic factor)이며[18],  $\phi_H$ 는 평면에서 자화 용이축 으로부터 측정된 인가 자기장의 방향을 나타낸다. 식(1)에서  $H_K$ 는 강자성층으로 사용한 CoFe의 일축이방성 특성을 나타내며,  $H_{ex}$ 는 교환 바이어스 자기장에 의한 일방 이방성 특성을 나타낸다. 한편  $H_{ra}$ 는 자기장의 방향에 무관한 회전 이방성 자기장을 나타낸다. 이러한 이방성 특성들은  $H_{res}$ 의 크기를 줄이는 방향으로 작용하므로 FMR 신호의 측정 범위를 고려하여 CoFe의 두께를 50 nm로 고정 하였다. CoFe/MnIr 박막에서  $H_{eff}$ 는 박막재료에 작용하는 모든 종류의 이방성 자기장 즉  $H_{ra}$ ,  $H_{ex}$  및  $H_K$  등을 포함한다. 또한 Fig. 1(a)의 자화 곡선 측정 결과로부터 구한 CoFe의 포화자화량은  $M_s = 1680$  emu/cm<sup>3</sup>이므로  $4\pi M_s$ 는 2.1 T이며, 자화 곡선으로부터 얻은  $H_c$  및  $H_{ex}$ 의 크기는 100 Oe 이하이다. 따라서 본 연구에서 쓰인 CoFe/MnIr 박막재료는  $4\pi M_s \gg H_{eff}$ 의 조건을 만족하므로 식(1)을 사용하여 교환 결합 특성에 의한 자기 이방성 특성을 분석하는 것이 가능하다. 따라서 FMR 측정 결과와 식(1)을 이용하여 계산한 결과를 통하여 CoFe/MnIr 박막의  $H_{ra}$ ,  $H_{ex}$  및  $H_K$ 를 추출할 수 있다.

Fig. 2는  $t_{AF} = 0$  및 3 nm 재료의 각도에 따른  $H_{res}$  특성을 보이며, 실선은 식(1)을 이용하여 계산한 결과이다.  $t_{AF} = 0$

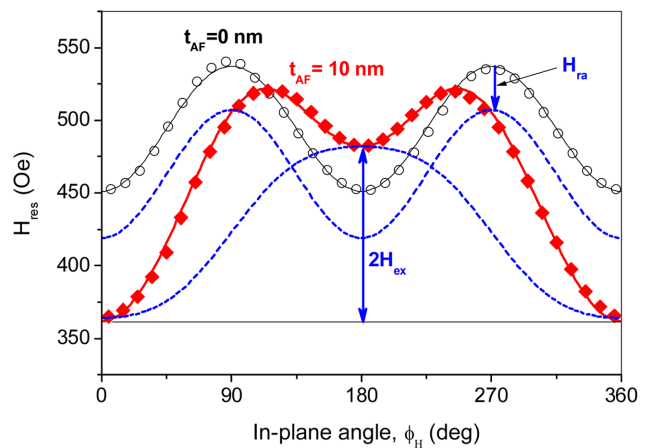


**Fig. 2.** (Color online)  $H_{res}$  with in-plane angle in 300 °C annealed CoFe(50 nm)/MnIr( $t_{AF}$ ) with  $t_{AF} = 0$  and 3 nm. The lines are calculated by Eq. (1).

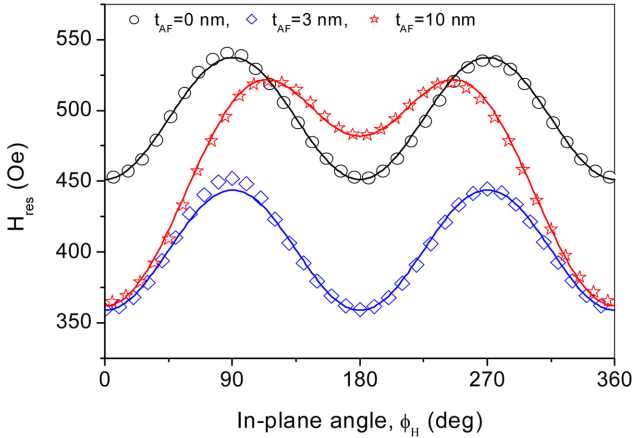
nm 재료에 대한  $H_{res}$ 의 각도 의존성은 전형적인 일축 이방성 특성만 보이며, 계산을 통하여 구한 CoFe 재료의 일축 이방성 자기장은  $H_K = 42$  Oe이다. 한편  $t_{AF} = 3$  nm 재료도 일축 이방성 특성 만을 보이고 있으며, 이때의 일축 이방성 자기장은 CoFe과 동일한  $H_K = 42$  Oe의 값을 유지하면서 낮은 자기장 쪽으로 이동되어 나타난다. FMR로 측정된 이러한 자기장을 회전 이방성 자기장(rotatable anisotropy field,  $H_{ra}$ )로 정의한다.  $t_{AF} = 3$  nm 재료는 교환 바이어스 자기장인  $H_{ex}$ 는 나타나지 않고  $H_{ra} = 92$  Oe만 나타낸다. 즉 임계 두께 이하의 F/AF 재료에서는 교환 결합 특성에 의하여 회전 이방성 특성이 나타남을 알 수 있다. Fig. 1(b)에서 보인  $t_{AF} = 3$  nm 재료의 자화곡선은  $H_c$ 의 증가 특성을 보이고 있으며, FMR 측정에서는  $H_{ra}$  특성을 보인다. 즉 자화 곡선에서 보이는  $H_c$  증가는 FMR 측정의  $H_{ra}$ 와 관계되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은  $t_{AF} = 0$  및 10 nm 재료의 각도에 따른  $H_{res}$  특성을 보인다. 실선은 식(1)을 이용하여 계산한 결과이며, 점선은 계산을 통하여 CoFe/MnIr 박막의  $H_{ra}$ ,  $H_{ex}$  및  $H_K$ 를 추출한 결과를 보인다. FMR 측정으로부터 얻은  $t_{AF} = 10$  nm 재료의  $H_{ex} = 63$  Oe이고  $H_{ra} = 30$  Oe이다.  $t_{AF} = 10$  nm 재료는 CoFe의 일축 이방성 자기장  $H_K$  뿐만 아니라 일방 이방성 특성인  $H_{ex}$ 와 회전 이방성 특성인  $H_{ra}$ 가 혼합된 형태의 이방성 특성을 보인다.

CoFe/MnIr재료의 각도에 따른 FMR 측정 결과로부터 MnIr이 임계 두께 이하에서는 회전 이방성 자기장만 나타나고, 임계두께 이상에서는 교환 바이어스 자기장과 회전 이방성 자기장이 함께 나타난다. Fig. 4는  $t_{AF} = 0, 3$  및 10 nm 재료의 각도에 따른  $H_{res}$  특성을 함께 표시하였다. 이때 자기장의 회전 각도가  $\phi_H = 0^\circ$ 과  $360^\circ$ 에서  $t_{AF} = 3$  및 10 nm 재료



**Fig. 3.** (Color online)  $H_{res}$  with in-plane angle in 300 °C annealed CoFe(50 nm)/MnIr( $t_{AF}$ ) with  $t_{AF} = 0$  and 10 nm. The lines are calculated by Eq. (1). The dotted lines are corresponding to the exchange bias field effect and rotatable anisotropy effect.



**Fig. 4.** (Color online)  $H_{res}$  with in-plane angle in 300 °C annealed CoFe(50 nm)/MnIr( $t_{AF}$ ) with  $t_{AF}$  = 0, 3 and 10 nm. The lines are calculated by Eq. (1).

의  $H_{res}$  값이 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 F/AF 계면에 존재하는 비상보성 AF에 의한 교환 결합 특성이 이들 두 재료에 동일하게 작용하고 있음을 나타낸다. 즉, 임계 두께 이하( $t_{AF}$  = 3 nm)에서 나타나는 회전 이방성 자기장인  $H_{ra}$  = 92 Oe는 임계 두께 이상( $t_{AF}$  = 10 nm)에서 나타나는 교환 바이어스 자기장인  $H_{ex}$  = 63 Oe과 회전이방성 자기장인  $H_{ra}$  = 30 Oe의 합과 거의 같은 값을 알 수 있다.

이러한 결과는 임계 두께 이하에서 나타나는 회전 이방성 자기장뿐만 아니라 임계두께 이상에서 나타나는 교환 바이어스 자기장과 회전 이방성 자기장 등은 F/AF 재료의 계면에 존재하는 비상보성 AF에 의한 교환 결합 특성에 기인하며, AF의 두께에 상관없이 교환 결합 특성은 동일하게 작용하고 있음을 의미한다. 따라서 F/AF재료의 교환 결합 특성에 의한 교환 결합 자기장인  $H_{coupling}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H_{ex} + H_{ra} = H_{coupling} = \text{Constant} \quad (2)$$

F/AF 재료의 계면에서 비상보성 AF에 의한 교환 결합력은 AF의 두께에 따라서 교환 바이어스 자기장과 회전 이방성 자기장들 등의 서로 다른 이방성 자기장 형태로 발현되어 나타날 수 있음을 알 수 있다. 교환 결합 특성을 갖는 재료의 교환 바이어스 자기장인  $H_{ex}$ 와 일방 이방성을 갖는 교환 바이어스 에너지인  $J_k$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다[14].

$$H_{ex} = \frac{J_k}{t_F M_s} \quad (3)$$

여기서  $t_F$ 는 강자성층의 두께이다. 한편 동일한 방법으로 교환 결합 특성을 갖는 재료의 회전 이방성 자기장인  $H_{ra}$ 와 회전이방성 에너지인  $J_{ra}$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

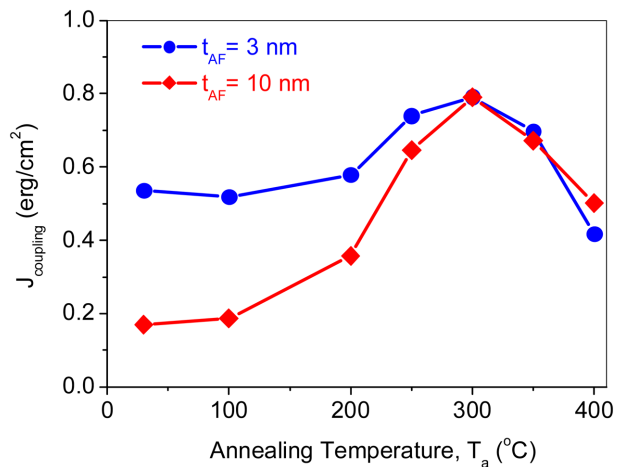
$$H_{ra} = \frac{J_{ra}}{t_F M_s} \quad (4)$$

각도에 따른 FMR 실험 결과로부터 F/AF 재료에 대한 교환 결합력 에너지인  $J_{coupling}$ 은 식(3)과 (4)로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$J_{coupling} = J_k + J_{ra} \quad (5)$$

AF층이 임계 두께 이하인  $t_{AF}$  = 3 nm 재료의 FMR 측정에서는  $H_{ex}$ 는 없고  $H_{ra}$ 만 나타나므로 CoFe의 일축 이방성 특성인  $H_K$ 의 성분을 제외할 경우  $H_{ra} = J_{ra}/t_F M_s = J_{coupling}/t_F M_s$ 로 표현된다. 이러한 회전 이방성 자기장은 F/AF 계면에서 발생된 교환 결합력 에너지인  $J_{coupling}$ 에 의한 효과이며  $J_{ra}$ 가  $J_{coupling}$ 이 된다. 이때  $H_{ra}$ 가 자기장 각도에 따라서 일정하게 나타나는 이유는 주파수에 따른 AF층의 특성 변화로 설명된다. 즉, 교환 결합 에너지로 결합된 F/AF에서 임계 두께 이하의 AF층을 갖는 경우, FMR 측정시 사용하는 느린 속도로 회전하는 초저주파수의 자기장 방향에 따라 F 및 AF 두 층이 함께 회전하게 되며, FMR에서 사용하는 9.89 GHz의 초고주파수에서는 AF층이 고정되는 특성 때문에 회전 이방성 자기장이 나타나게 된다. 한편 임계두께 이상의 재료에서는  $H_{ex}$ 와  $H_{ra}$ 의 합으로부터 F/AF층의 교환 결합 에너지 측정이 가능하다. 그러나 F/AF계면에 존재하는 비상보성 AF 스핀은 초기 재료의 증착 과정에서 모든 스핀이 한쪽 방향으로 정렬되지 못하고 일부는 반대 방향으로 정렬 되어  $H_{ex}$ 를 감소시키는 역할을 할 수 있다. 이러한 경우 식(5)를 이용하여 교환 결합 에너지를 구하는 것은 타당하지 않다. 이러한 특성을 검증하기 위하여 열처리 온도에 따른  $J_{coupling}$  특성을 식(5)를 이용하여 분석하였다.

Fig. 5는 열처리 온도에 따라  $t_{AF}$  = 3 및 10 nm 재료의



**Fig. 5.** (Color online) Annealing temperature dependence of  $J_{coupling}$  in CoFe(50 nm)/MnIr( $t_{AF}$ ) with  $t_{AF}$  = 3 and 10 nm.

$J_{coupling}$  특성을 보인다.  $T_a < 300$  °C의 재료에서는 두 재료의  $J_{coupling}$ 가 서로 다른 값을 보이며,  $T_a > 300$  °C에서는 두 재료의  $J_{coupling}$ 가 거의 같은 값을 보인다. 이러한 차이는 비상보성 AF 스핀의 정열 정도에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 즉 임계두께 이상의 두께를 갖는  $t_{AF} = 10$  nm 재료의 경우  $T_a < 300$  °C에서는 초기 AF 스핀의 정열 정도가 낮아  $H_{ex}$  값이 작게 나타나며, 열처리 온도가 증가하면서 AF 스핀의 정열 정도가 높아지면서  $t_{AF} = 3$  nm 재료의  $J_{coupling}$  값으로 접근한다.  $T_a > 300$  °C에서는 AF 스핀의 정열이 한쪽 방향으로 정열 되면서  $t_{AF} = 3$  및 10 nm 재료의 경우 거의 동일한  $J_{coupling}$  값을 보이게 된다. 따라서 Fig. 4에서 보인 것과 같이 300 °C에서 열처리한 재료의 경우 거의 같은  $J_{coupling}$  값을 보이게 된다. 따라서 CoFe/MnIr 재료의 경우 300 °C 이상으로 열처리할 경우 FMR 측정 결과로부터 도출한  $J_{ex}$  및  $J_{ra}$ 를 식(5)에 적용하여 교환 결합 에너지를 산출할 수 있다. Fig. 5에서 CoFe/MnIr 재료의 교환 결합 에너지는 300 °C에서 열처리한 경우 최대가 되며, 식(5)를 이용하여 구한 최대 교환 결합 에너지는  $J_{coupling} = 0.77$  erg/cm<sup>2</sup>이다. 열처리 온도가 300 °C 이상에서  $J_{coupling}$ 은 감소하는 특성을 보이는데 이는 고온에서 Mn의 확산(diffusion)에 의하여 AF층의 이방성 특성이 감소하기 때문이다[19]. 따라서 열처리 온도 및 열처리 시간을 조절할 경우 계면에 존재하는 AF 스핀의 정열 정도를 증가시키고, AF층을 안정화 시켜 하드디스크 헤드의 고정층에서 요구하는  $H_{ex}$  특성을 향상 시킬 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 CoFe/MnIr 이중층 구조에서 계면에서 존재하는 비상보성 반강자성 스핀에 의한 교환 결합 에너지 특성을 강자성 공명 측정법을 이용하여 분석하였다. MnIr의 두께가  $t_{AF} = 0, 3, 10$  nm 재료를 열처리한 후, 평면에서 자기장의 각도에 따른 강자성 공명 신호로부터 교환 바이어스 자기장과 회전 이방성 자기장을 도출하였다. 특히 300 °C 이상에서 열처리한 재료의 경우, 교환 바이어스 자기장과 회전 이방성 자기장의 합은 반강자성체인 MnIr의 임계 두께에 무관하게 동일한 값을 보이는데, 이는 비상보성 반강자성 스핀들이 모두 한 방향으로 정열 되었음을 의미한다. 따라서 비상보성 반강자성 스핀들 중에서 일부는 CoFe/MnIr의 계면에 고정되어 교환 바이어스 자기장의 형태로 발현되어 나타나고, 나머지 부분은 자기장의 방향에 따라서 회전하므로 회전 이방성 자기장의 형태로 발현되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 CoFe/MnIr의 계면에서 나타나는 교환 결합 자기장은 교환 바이어스 자기장과 회전이방성 자기장의 합으로 표현될 수 있으며, 교환 결합 에너지는 이들 자기장의 합으로부터 구할

수 있음을 보였다. 즉, 교환 결합 에너지( $J_{coupling}$ )는 교환 바이어스 에너지( $J_k$ )와 회전 이방성 에너지( $J_{ra}$ )의 합으로  $J_{coupling} = J_k + J_{ra}$ 로 표현될 수 있으며, 이러한 결과를 이용하여 CoFe/MnIr의 최대 교환 결합 에너지  $J_{coupling} = 0.77$  erg/cm<sup>2</sup>임을 알 수 있었다. 따라서 열처리 온도 및 열처리 시간을 조절할 경우 계면에 존재하는 반강자성 스핀의 정열 정도를 증가시키고, 고정된 비상보성 반강자성 스핀의 양을 증가 시켜 하드디스크 헤드의 고정층에서 요구하는  $H_{ex}$  특성을 향상 시킬 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0002874).

#### 참고문헌

- [1] G. Binash, P. Grunberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, Phys. Rev. B **39**, 2489 (1989).
- [2] S. S. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S. H. Yang, Nat. Mater. **3**, 862 (2004).
- [3] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, Nat. Mater. **3**, 868 (2004).
- [4] T. Q. Hung, S. Oh, B. Sinha, J. R. Jeong, D. Y. Kim, and C. G. Kim, J. Appl. Phys. **107**, 09E715 (2010).
- [5] T. Q. Hung, S. Oh, S. Anandakumar, J. R. Jeong, D. Y. Kim, and C. G. Kim, IEEE Trans. Magn. **45**, 4518 (2009).
- [6] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev. **102**, 1413 (1956).
- [7] W. H. Meiklejohn, J. Appl. Phys. **33**, 1328 (1962).
- [8] K. I. Imakita, M. Tsunoda, and M. Takahashi, Appl. Phys. Lett. **85**, 3182 (2004).
- [9] M. Tsunoda, T. Sato, T. Hashimoto, and M. Takahashi, Appl. Phys. Lett. **84**, 5222 (2004).
- [10] R. D. McMichael, M. D. Stiles, P. J. Chen, and W. F. Egelhoff, Phys. Rev. B **58**, 8605 (1998).
- [11] J. Geshev, L. G. Pereira, and J. E. Schmidt, Phys. Rev. B **66**, 134432 (2002).
- [12] L. Wee, R. L. Stamps, L. Malkinski, and Z. Celinski, Phys. Rev. B **69**, 134426 (2004).
- [13] M. Ali, C. H. Marrows, M. Al-Jawad, B. J. Hickey, A. Misra, U. Nowak, and K. D. Usadel, Phys. Rev. B **68**, 214420 (2003).
- [14] T. Sato, M. Tsunoda, and M. Takahashi, J. Appl. Phys. **95**, 7513 (2004).
- [15] D. Y. Kim, S. S. Yoon, C. G. Kim, M. Tsunoda, and M. Takahashi, IEEE Trans. Magn. **45**, 3865 (2009).
- [16] S. Yuan, K. Xu, L. Yu, S. X. Cao, C. Jing, and J. C. Zhang, J. Appl. Phys. **101**, 113915 (2007).

- [17] S. Yuan, B. Kang, L. Yu, S. Cao, and X. Zhao, J. Appl. Phys. **105**, 063902 (2009).  
[18] S. Chikazumi, Physics of Magnetism, Wiley, New York (1964)

- p. 51.  
[19] J. H. Lee, H. D. Jeong, C. S. Yoon, C. K. Kim, B. G. Park, and T. D. Lee, J. Appl. Phys. **91**, 1431 (2002).

## Analysis of Exchange Coupling Energy by Ferromagnetic Resonance Method in CoFe/MnIr Bilayers

Dong Young Kim\*

*Department of Physics, Andong National University, Andong 760-749, Korea*

(Received 25 November 2012, Received in final form 10 December 2012, Accepted 10 December 2012)

We measure the ferromagnetic resonance signals in order to analyze the exchange coupling energy due to the uncompensated antiferromagnetic spins in exchange coupled CoFe/MnIr bilayers. The exchange bias fields ( $H_{ex}$ ) and rotatable anisotropy fields ( $H_{ra}$ ) are obtained from the ferromagnetic resonance fields measured with in-plane angle in thermal annealed samples with  $t_{AF} = 0, 3,$  and 10 nm. The sum of the  $H_{ex}$  and  $H_{ra}$  do not depend on the MnIr thickness, which means that all the uncompensated AF spins are aligned to one direction in 300 °C annealed samples. Therefore, the uncompensated AF spins are divided into two different parts. One parts are fixed at the interface between CoFe/MnIr bilayers and induces the  $H_{ex}$ , other parts are rotatable with magnetic field and induces the  $H_{ra}$ . Finally, the exchange coupling energy can be expressed by the sum of the exchange bias energy and rotatable anisotropy energy.

**Keywords :** exchange bias field, rotatable anisotropy field, exchange coupling energy, ferromagnetic resonance