

MnIr Thickness Dependence of Exchange Coupling Properties in CoFe/MnIr Bilayers

Seok Soo Yoon and Dong Young Kim*

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

(Received 5 October 2019, Received in final form 21 October 2019, Accepted 22 October 2019)

We analyzed MnIr thickness dependence of exchange bias fields (H_{ex}) and rotatable anisotropy fields (H_{ra}) by the ferromagnetic resonance method in 300 °C annealed CoFe/MnIr(t_{AF}) bilayers. The critical thickness of MnIr was $t_c = 3.0$ nm, the H_{ex} as well as H_{ra} was appeared at $t_{AF} > t_c$. It was due to the grain size distribution of the MnIr. The H_{ex} was induced by fixed AF spins of MnIr grains thicker than t_c , while H_{ra} was induced by rotatable AF spins of MnIr grains thinner than t_c . The exchange coupling field $H_{ec} = H_{ra} + H_{ex}$ did not depend on the MnIr thickness at $t_{AF} > t_c$, therefore, we concluded that the exchange coupling energy did not depend on the MnIr thickness at $t_{AF} > t_c$.

Keywords : exchange bias, rotatable anisotropy, exchange coupling, critical thickness, ferromagnetic resonance

CoFe/MnIr 박막에서 MnIr 두께에 따른 교환 결합 특성 분석

윤석수 · 김동영*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2019년 10월 5일 받음, 2019년 10월 21일 최종수정본 받음, 2019년 10월 22일 게재확정)

강자성 공명법을 이용하여 300 °C에서 열처리한 CoFe/MnIr 재료의 MnIr 두께 t_{AF} 에 따른 회전 이방성 자기장 H_{ra} 와 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 를 분석하였다. MnIr의 임계 두께는 $t_c = 3.0$ nm이었으며, $t_{AF} > t_c$ 재료는 H_{ex} 뿐만 아니라 H_{ra} 도 함께 관측되었다. 이는 MnIr 결정립의 크기 분포의 영향으로 t_c 보다 두꺼운 결정립은 AF 스핀을 고정하여 H_{ex} 로 발현되고, t_c 보다 얇은 결정립은 AF 스핀을 회전하여 H_{ra} 로 발현되었다. 그러므로 $t_{AF} > t_c$ 재료에서 교환 결합 자기장 $H_{ec} = H_{ra} + H_{ex}$ 가 t_{AF} 에 따라 일정하게 나타났으며, 교환 결합 에너지는 t_{AF} 에 따라 동일하게 작용함을 알 수 있었다.

주제어 : 교환 바이어스, 회전 이방성, 교환 결합, 임계 두께, 강자성 공명

I. 서 론

강자성(F)과 반강자성(AF) 이중 박막으로 구성된 F/AF 재료는 두 층을 서로 결합 시키는 교환 결합(exchange coupling) 특성을 보인다. 이러한 특성은 두 박막의 계면에 존재하는 고정된 AF 스핀들에 의하여 자화 곡선을 한쪽으로 이동시키는 교환 바이어스(exchange bias) 현상이 나타나게 한다. 이러한 교환 바이어스 현상을 야기하는 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 는 일방 이방성 에너지 J_{ex} , 강자성층의 두께 t_F 와 강자성층의 포화 자화 M_s 와 관련 지어 $H_{ex} = J_{ex}t_F M_s$ 로 표현된다[1]. 이러한 교환 바이어스 현상을 분석하기 위하여 자화 곡선을 이용

한 교환 바이어스 자기장 측정, 토오크(torque) 신호를 이용한 일방(unidirectional) 이방성 에너지 측정[2,3], 강자성 공명(ferromagnetic resonance) 신호를 이용한 일방 이방성 자기장 측정[4-6] 등 다양한 방법이 활용되고 있다.

교환 바이어스 특성은 표면이 산화된 Co/CoO 입자에서 1956년에 Meiklejohn 과 Bean에 의해 처음으로 발견된 이후 [7,8], 상용 제품인 하드디스크 헤드 소자에 대한 응용의 영향으로 교환 결합 특성 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 헤드 소자로 활용되는 스핀 밸브형 거대 자기저항 또는 터널링 자기저항 재료에서 교환 바이어스 자기장은 강자성층의 자화를 고정 시켜 출력 신호를 안정화 시키는 역할을 한다[9-11]. 반강자성체의 종류로는 MnIr이 가장 우수한 교환 바이어스 특성을 보이므로 헤드 재료에서 사용되고 있다 [12,13].

교환 바이어스 현상은 반강자성체의 임계 두께 이상에서 F/AF 계면에 존재하는 비상보성 AF 스핀이 고정되어 나타나는 결과로 분석되고 있다[14]. 한편 임계 두께 이하에서는 AF 스핀이 고정되지 않고 강자성층의 회전에 따라 함께 회전하는 특성으로 자화 곡선의 보자력 증가, 토오크 신호의 회전 손실(rotational loss), 강자성 공명 신호의 회전 이방성(rotatable anisotropy) 특성 등으로 나타나고 있다[2,14].

F/AF 재료의 자기 이방성 에너지 특성을 강자성 공명 방법을 사용하여 분석한 경우 AF의 두께에 따라 일방 이방성 에너지뿐만 아니라 등방성 에너지인 회전 이방성 특성이 관측되었다[4-6]. 이러한 특성은 AF 결정립의 크기 분포와 관련되어 있으며, 이러한 특성을 분석하기 위하여 AF의 두께에 따른 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 및 회전 이방성 자기장 H_{ra} 에 대한 체계적인 분석이 필요하다.

본 연구에서는 300 °C에서 열처리한 CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}) 박막 재료에서 MnIr의 두께 t_{AF} 에 따른 강자성 공명 특성을 측정하여 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 와 회전 이방성 자기장 H_{ra} 를 도출하였으며, 이들 결과로부터 CoFe/MnIr 박막 재료의 교환 결합 특성을 분석하였다.

II. 실험 방법

교환 결합 특성을 갖는 강자성/반강자성 재료로 $Co_{70}Fe_{30}/Mn_{75}Ir_{25}$ 구조를 사용하였다. 이때 강자성 재료인 CoFe 박막의 두께는 50 nm로 고정하였으며, 반강자성 재료인 MnIr 박막의 두께는 $t_{AF}=0, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 7, 10, 15$ 및 20 nm로 제작하였다. 이들 재료들은 산화막이 있는 Si 기판 위에 MnIr의 결정 성장을 증진시키기 위하여 하부층으로 Ta(5 nm)/Cu(20 nm)를 증착 하였으며, 산화 방지를 위한 보호층으로 Ta(5 nm)를 증착 하였다. 모든 재료는 DC 마그네티론 스퍼터링 방법을 사용하여 증착 하였으며, 교환 결합 특성 향상을 위하여 300 °C에서 1시간 동안 진공 자기장 열처리를 수행하였다. 이때 진공도는 $\sim 10^{-6}$ torr이었으며, 인가한 자기장은 3.0 kOe이었다.

강자성 재료인 CoFe의 포화 자화 M_s 는 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 사용하여 자화 용이축에서 측정된 자화 곡선으로부터 결정하였다. 자기장 각도에 따른 강자성 공명 신호는 3 mm × 3 mm 크기의 시편을 사용하여 9.89 GHz(X-band)의 주파수에서 운용되는 Bruker사의 Xepr 장치를 사용하여 측정하였다. 각도 의존성을 분석하기 위하여 수평면(in-plane)에서 자기장 방향(θ_H)을 0에서 350°까지 10°씩 증가시킨 후 자기장에 따른 강자성 공명 신호를 측정하였다. 각도에 따른 H_{res} 측정 결과로부터 CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}) 재료의 일축 이방성 자기장 H_k , 일방 이방성 자기장 H_{ex} 및 회

전 이방성 자기장 H_{ra} 를 각각 도출하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

F/AF에서 F는 포화 자화가 큰 강자성 재료이지만, AF는 자화가 없는 반강자성 재료이다. 따라서 교환 결합력을 갖는 F/AF에서 측정되는 자화 곡선 또는 강자성 공명 신호는 AF의 영향으로 변화된 F의 자성 특성을 반영한다. 따라서 F의 자성 특성은 교환 결합력을 갖는 F/AF의 자성 특성 분석을 위한 기준이 된다. 본 연구에서는 강자성 공명 신호 측정법을 활용한 CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}) 재료의 MnIr의 두께 t_{AF} 에 따른 교환 결합 특성 분석을 위하여 CoFe(50 nm) 재료의 자성 특성을 기준으로 하였다.

Fig. 1(a)와 (b)는 CoFe(50 nm) 재료의 자화 용이축에서 측정된 자화 곡선과 각도에 따른 강자성 공명 자기장 H_{res} 의 특성을 각각 보인 것이다. Fig. 1(a)로부터 CoFe(50 nm) 재료의 자화 곡선은 $H=0$ 을 기준으로 대칭적인 모양의 이력

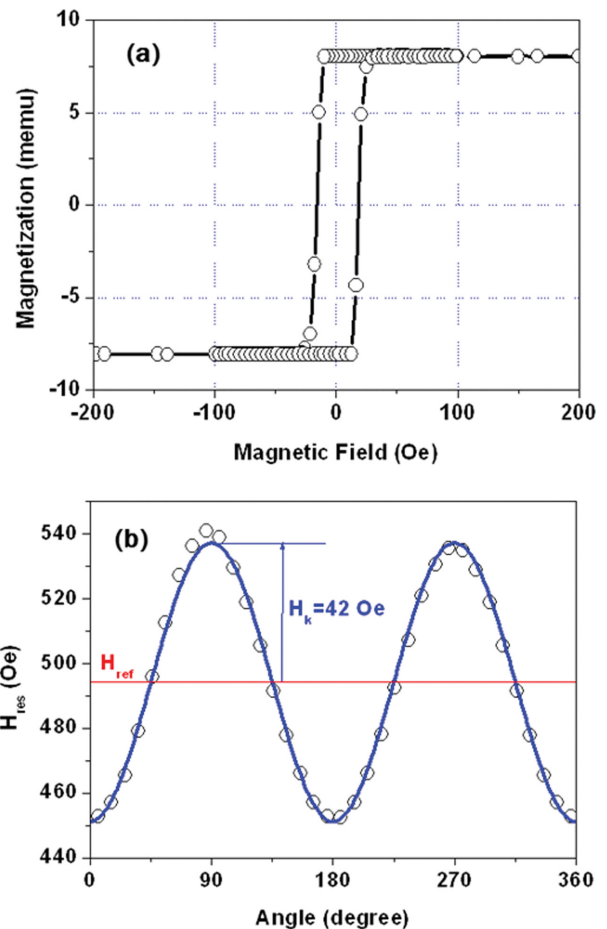


Fig. 1. (Color online) (a) M-H loop and (b) angular dependence of H_{res} in 300 °C annealed CoFe(50 nm) single layer, respectively. The red and blue lines are H_{ref} and H_{res} calculated by Eq. (1), respectively.

특성을 보였으며, CoFe 재료의 보자력 $H_c = 17.1$ Oe이었다. 자화 곡선으로부터 얻은 CoFe(50 nm) 재료의 포화 자화는 $M_s = 1680$ emu/cm³이었다. Fig. 1(b)는 CoFe(50 nm) 재료의 각도에 따른 강자성 공명 자기장 H_{res} 의 특성을 보인 것이다. CoFe(50 nm) 재료는 일축 이방성 특성을 갖는 재료이며, 일축 이방성 자기장은 $H_k = 42$ Oe로 측정 되었다.

각도에 따른 강자성 공명 자기장 H_{res} 는 연자성 박막 재료의 자기 이방성 특성 분석에 이용되고 있으며, CoFe 박막 재료와 같이 $4\pi M_s \gg H_k$ 의 조건을 만족하는 경우 일축 이방성 특성을 갖는 CoFe 재료의 H_{res} 는 다음과 같이 표현된다 [15].

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

여기서 $\gamma = 1.92 \times 10^7$ rad/sec·Oe는 자기 스핀의 자이로 계수 (gyro magnetic factor)이며 [16], θ_H 는 자기장 방향을 나타낸다. Fig. 1(b)에서 청색 실선은 식(1)로 계산한 결과이며, 이로부터 CoFe 재료는 일축 이방성 특성을 갖는 연자성 재료임을 확인하였다. 식(1)의 왼쪽 첫 번째 항은 CoFe 재료의 이방성 특성 분석을 위한 기준 자기장 역할을 하므로 H_{ref} 로 정의하였다. CoFe 재료의 자이로계수 $\gamma = 1.92 \times 10^7$ rad/sec·Oe, 사용 주파수 $f = 9.89$ GHz 및 포화 자화 $M_s = 1680$ emu/cm³에 의하여 계산된 기준 자기장은 $H_{ref} = 494$ Oe이었다. 본 연구에서는 강자성 공명법을 활용한 CoFe/MnIr 재료의 교환 결합 특성 분석을 위한 기준 자기장으로 H_{ref} 를 사용하였으며, 식(1)은 다음과 같이 표현된다.

$$H_{res} = H_{ref} - H_k \cos 2\Phi_H \quad (2)$$

Fig. 1(b)에서 붉은색 실선은 $H_{ref} = 494$ Oe를 직선으로 표시한 것이다. CoFe 재료의 포화 자화 M_s , H_k 및 H_{ref} 는 CoFe/MnIr 재료의 교환 결합 특성 분석을 위한 기준 자성 특성으로 사용하였다.

Fig. 2는 CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF})에서 $t_{AF} = 0, 2, 3, 5, 10$ 및 15 nm인 재료 각각에 대하여 각도에 따른 강자성 공명 자기장 H_{res} 를 측정된 결과를 보인 것이다. $t_{AF} = 0$ nm은 Fig. 1(b)에 보인 CoFe(50 nm) 재료의 H_{res} 를 측정된 결과 이다. $t_{AF} = 2$ 와 3 nm 재료의 H_{res} 는 CoFe(50 nm)와 같은 크기의 일축 이방성 자기장 특성을 보이고 있으나, CoFe(50 nm) 보다 낮은 자기장 쪽으로 이동되어 있음을 볼 수 있다. $t_{AF} = 5, 10$ 와 15 nm 재료의 H_{res} 는 일축 이방성 자기장뿐만 아니라 일방 이방성 자기장 특성이 혼합된 형태의 이방성 자기장 특성을 보였다. CoFe(50 nm) 보다 낮은 자기장 쪽으로 이동되어 나타난 등방성 특성은 AF 스핀의 회전에 기인하므로 회전 이방성 자기장 H_{ra} 이며, 일방 이방성 특성은 AF 스핀의 고정에 기인한 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 이다. 따라서 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료의 H_{res} 는 다음과 같이 표현된다 [15].

$$H_{res} = H_{ref} - H_{ra} - H_{ex} \cos \theta_H - H_k \cos 2\theta_H \quad (3)$$

H_{ra} 와 H_{ex} 는 CoFe의 강자성 공명 자기장인 $H_{ref} - H_k \cos \theta_H$ 로부터 변화된 특성으로 교환 결합에 기인한 자성 특성이다.

Fig. 3은 CoFe(50 nm)/MnIr(15 nm) 재료에서 측정된 H_{res}

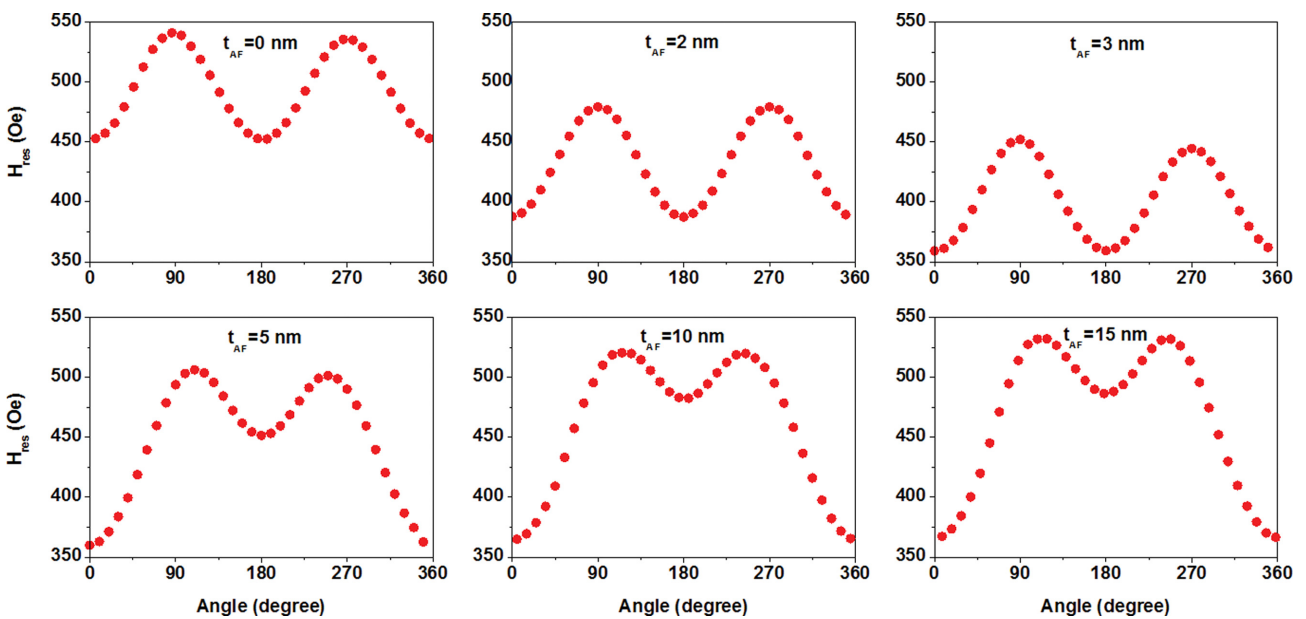


Fig. 2. (Color online) Angular dependence of H_{res} in 300 °C annealed CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}) with $t_{AF} = 0, 2, 3, 5, 10$ and 15 nm, respectively.

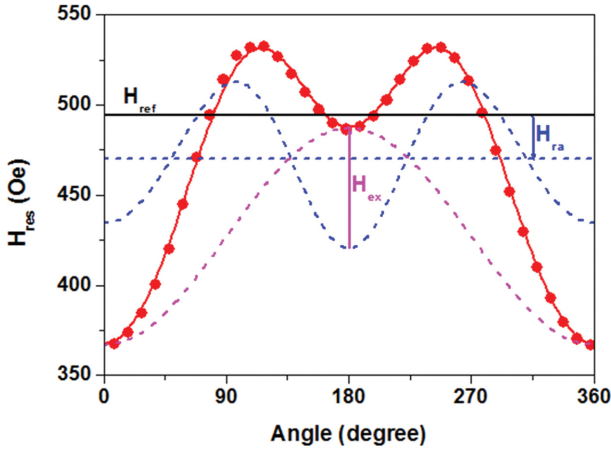


Fig. 3. (Color online) Angular dependence of H_{res} in 300 °C annealed CoFe(50 nm)/MnIr(15 nm). The red line is calculated by Eq. (3). The blue and magenta dotted lines are corresponding to the exchange bias field effect and rotatable anisotropy field effect, respectively.

를 식(3)을 이용하여 분석한 결과를 보인 것이다. Fig. 3에서 붉은색 표식은 측정 결과이며, 붉은색 실선은 식(3)을 이용하여 계산한 결과이다. 청색 및 보라색 점선은 계산을 통하여 얻은 H_{ra} 와 H_{ex} 특성을 각각 나타낸 것이다. 강자성 공명 측정으로부터 얻은 CoFe(50 nm)/MnIr(15 nm) 재료의 $H_{ex} + 65$ Oe이었고 $H_{ra} = 24$ Oe이었다. CoFe(50 nm)/MnIr(15 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 보였다. Fig. 3에서 보인 것과 동일한 방법으로 CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}) 재료에서 MnIr의 두께 t_{AF} 에 따른 H_{ra} 와 H_{ex} 를 추출하였다.

Fig. 4(a)와 (b)는 CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}) 재료에서 MnIr의 두께 t_{AF} 에 따른 H_{ra} 와 H_{ex} 특성을 각각 보인 것이다. H_{ra} 는 $t_{AF} = 1.5$ nm에서 나타나기 시작하였으며, $t_{AF} = 3.0$ nm에서 최대가 된 후 감소하여 $t_{AF} = 7.0$ nm 이상에서는 거의 일정한 값을 보였다. 한편 H_{ex} 는 $t_{AF} = 3.5$ nm에서 나타나기 시작하였으며, H_{ra} 가 감소하는 구간에서 증가하는 특성을 보인 후 $t_{AF} = 7.0$ nm 이상에서는 거의 일정한 값을 보였다. 이들 결과로부터 교환 바이어스 특성인 H_{ex} 를 갖기 위해서는 MnIr의 두께가 임계두께 t_c 이상으로 두꺼워야하므로 CoFe/MnIr 재료의 임계 두께는 $t_c = 3.0$ nm임을 알 수 있었다. H_{ra} 는 임계 두께인 $t_{AF} = 3.0$ nm인 재료에서 최대가 되었다. 즉, 교환 결합에 의한 AF 스핀의 회전 특성인 H_{ra} 는 임계 두께에서 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. $t_{AF} > t_c$ 에서는 H_{ra} 의 감소에 따라 H_{ex} 가 증가하는 특성을 보였다. 이때 H_{ra} 와 H_{ex} 가 함께 나타났다는 것은 CoFe/MnIr 박막의 계면에서 고정된 AF 스핀과 회전하는 AF 스핀이 공존하고 있다는 것을 의미하였다.

$t_{AF} > t_c$ 의 재료에서 H_{ex} 뿐만 아니라 H_{ra} 가 함께 관측된 원

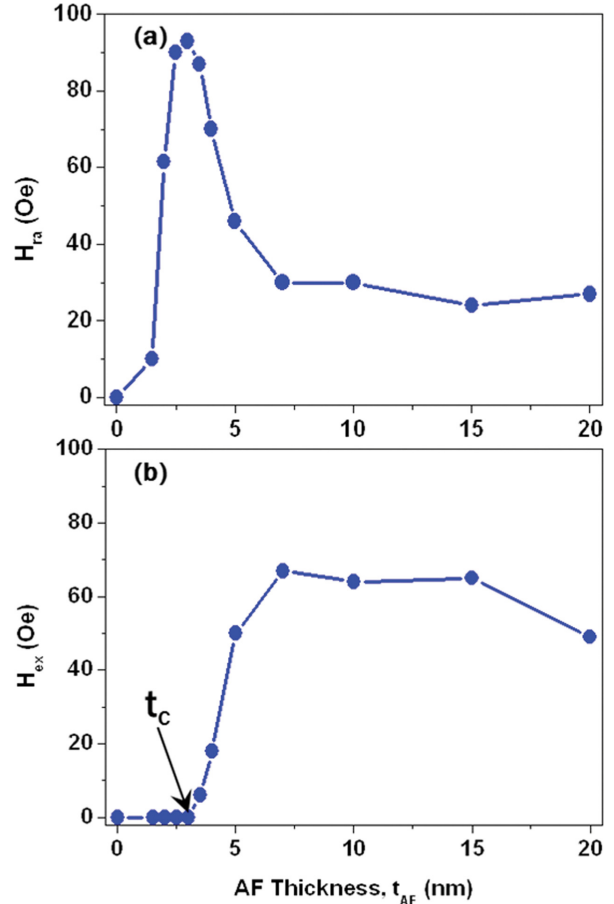


Fig. 4. (Color online) MnIr thickness dependence of (a) H_{ra} and (b) H_{ex} in 300 °C annealed CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}), respectively.

인은 MnIr 결정립의 크기 분포의 영향으로 분석되고 있다 [14]. t_c 보다 두께가 두꺼운 결정립은 AF 스핀을 고정하여 H_{ex} 로 발현되게 하고, t_c 보다 두께가 얇은 결정립은 AF 스핀을 회전하여 H_{ra} 로 발현되게 하였다. 따라서 $t_c < t_{AF} < 7.0$ nm의 재료에서 보인 H_{ra} 감소에 따른 H_{ex} 증가 특성은 t_{AF} 의 증가에 따라 t_c 보다 두꺼운 결정립의 분포가 증가하였음을 입증하고 있었다. 그 결과 H_{ra} 의 감소량에 해당하는 결정립의 크기 분포 변화만큼 H_{ex} 의 증가 특성으로 변화되었음을 알 수 있었다. 따라서 H_{ra} 와 H_{ex} 모두는 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료에서 MnIr 결정립의 크기 분포 특성에 의하여 나타난 현상으로 해석할 수 있었다. 따라서 이들 재료의 교환 결합 에너지는 H_{ra} 와 H_{ex} 모두에 의한 효과로 분석하는 것이 가능하므로 본 연구에서는 H_{ra} 와 H_{ex} 의 합을 교환 결합 자기장 H_{ec} 를 정의하였다. CoFe/MnIr 재료의 교환 결합 자기장 H_{ec} 는 다음과 같이 표현하였다.

$$H_{ec} = H_{ra} + H_{ex} \quad (4)$$

Fig. 5는 CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}) 재료에서 MnIr의 두께

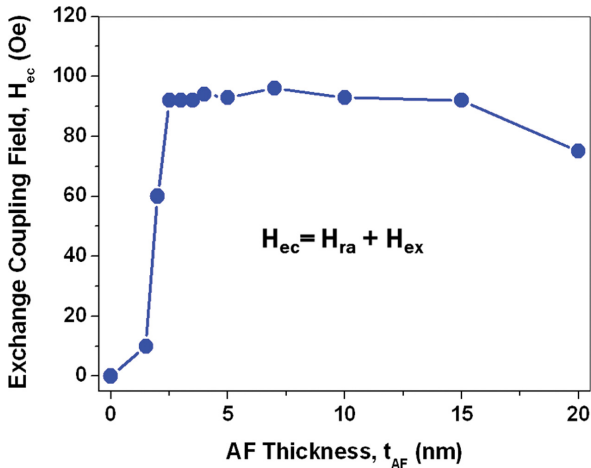


Fig. 5. (Color online) MnIr thickness dependence of H_{ec} in 300 °C annealed CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}).

t_{AF} 에 따른 교환 결합 자기장 H_{ec} 의 특성을 보인 것이다. H_{ec} 는 $t_{AF} > t_c$ 재료에서 두께에 의존하지 않고 일정한 값을 보였다. 이는 CoFe/MnIr 재료의 계면 효과인 교환 결합력은 MnIr 두께 t_{AF} 에 의존하지 않고 일정하게 작용하고 있음을 알 수 있었다. $t_{AF} > t_c$ 재료에서 H_{ec} 가 MnIr 두께 t_{AF} 따라 일정하게 나타난 결과로부터 CoFe/MnIr 재료의 교환 결합 에너지는 MnIr 두께 t_{AF} 에 따라 동일하게 작용함을 알 수 있었다. 따라서 CoFe/MnIr 재료에서 나타난 고정된 AF 스핀과 회전하는 AF 스핀에 의한 교환 결합 에너지 J_{ec} 는 다음과 같이 표현된다.

$$J_{ec} = H_{ec} t_{AF} M_s \quad (5)$$

Fig. 5의 $t_{AF} > t_c$ 재료에서 H_{ec} 가 MnIr 두께 t_{AF} 에 따라 일정하게 나타났으며, 이 범위의 교환 결합 에너지는 식(5)를 이용하여 계산한 결과 $J_{ec} = 0.8 \text{ erg/cm}^2$ 이었다. 따라서 300 °C에서 1시간 동안 진공 자기장 열처리를 수행한 CoFe/MnIr 재료의 교환 결합 에너지는 $J_{ec} = 0.8 \text{ erg/cm}^2$ 임을 알 수 있었다.

IV. 결 론

300 °C에서 열처리한 CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}) 박막 재료에서 MnIr의 두께 t_{AF} 에 따른 강자성 공명 특성을 측정하여 교환 결합력에 의한 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 와 회전 이방성 자기장 H_{ra} 를 도출하였다. 본 연구에서는 CoFe/MnIr 재료의 교환 결합 특성을 분석하기 위하여 CoFe의 포화 자화 $M_s = 1680 \text{ emu/cm}^3$ 와 일축 이방성 자기장 $H_k = 42 \text{ Oe}$ 을 기준 자성 특성으로 사용하였다.

CoFe(50 nm)/MnIr(t_{AF}) 재료에서 t_{AF} 에 따른 H_{ex} 측정 결과로부터 t_{AF} 의 임계 두께는 $t_c = 3.0 \text{ nm}$ 이었으며, 이때 H_{ra} 가 최대로 측정되었다. $t_{AF} > t_c$ 에서는 H_{ra} 의 감소에 따라 H_{ex} 가

증가하는 특성을 보였다. 이때 H_{ex} 뿐만 아니라 H_{ra} 도 함께 관측된 원인은 MnIr 결정립의 크기 분포의 영향으로 분석하였다. 즉, t_c 보다 두께가 두꺼운 결정립은 AF 스핀을 고정하여 H_{ex} 로 발현되고, t_c 보다 두께가 얇은 결정립은 AF 스핀을 회전하여 H_{ra} 로 발현되었다. 따라서 $t_c < t_{AF} < 7.0 \text{ nm}$ 의 재료에서 H_{ra} 의 감소에 따라 H_{ex} 가 증가한 원인은 t_{AF} 의 증가에 따라 t_c 보다 두꺼운 결정립의 분포가 증가하였기 때문이다.

한편 $t_{AF} > t_c$ 재료에서 교환 결합 자기장 $H_{ec} = H_{ra} + H_{ex}$ 는 t_{AF} 에 의존하지 않고 일정한 값을 보였다. 이는 CoFe/MnIr 재료의 계면 효과인 교환 결합력이 t_{AF} 에 의존하지 않고 일정하게 작용하기 때문이다. 따라서 300 °C에서 1시간 동안 진공 자기장 열처리를 수행한 CoFe/MnIr 재료의 교환 결합 에너지는 $J_{ec} = 0.8 \text{ erg/cm}^2$ 임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- [1] T. Sato, M. Tsunoda and M. Takahashi, J. Appl. Phys. **95**, 7513 (2004).
- [2] M. Tsunoda, Y. Tsuchiya, T. Hashimoto, and M. Takahashi, J. Appl. Phys. **87**, 4375 (2000).
- [3] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Korean Magn. Soc. **24**, 140 (2014).
- [4] R. D. McMichael, M. D. Stiles, P. J. Chen, and W. F. Egelhoff, Phys. Rev. B **58**, 8605 (1998).
- [5] J. Geshev, L. G. Pereira, and J. E. Schmidt, Phys. Rev. B **66**, 134432 (2002).
- [6] L. Wee, R. L. Stamps, L. Malkinski, and Z. Celinski, Phys. Rev. B **69**, 134426 (2004).
- [7] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev. **102**, 1413 (1956).
- [8] W. H. Meiklejohn, J. Appl. Phys. **33**, 1328 (1962).
- [9] G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, Phys. Rev. B, **39**, 2489 (1989).
- [10] S. S. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S. H. Yang, Nature Mat. **3**, 862 (2004).
- [11] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, Nature Mat. **3** 868 (2004).
- [12] K. I. Imakita, M. Tsunod, and M. Takahashi, Appl. Phys. Lett. **85**, 3182 (2004).
- [13] M. Tsunoda, T. Sato, T. Hashimoto, and M. Takahashi, Appl. Phys. Lett. **84**, 5222 (2004).
- [14] D. Y. Kim, J. Korean Magn. Soc. **22**, 204 (2012).
- [15] S. J. Yuan, K. Xu, L. M. Yu, S. X. Cao, C. Jing, and J. C. Zhang, J. Appl. Phys. **101**, 113915 (2007).
- [16] S. Chikazumi, Physics of Magnetism (Wiley, New York, 1964), p. 131.