ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 31(6), 301-304 (2021) https://doi.org/10.4283/JKMS.2021.31.6.301

Anisotropic Exchange Stiffness Constant of Exchange Biased MnIr/NiFe Thin Film

Seok Soo Yoon and Dong Young Kim*
Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

(Received 2 December 2021, Received in final form 23 December 2021, Accepted 27 December 2021)

The ferromagnetic resonance field and spin wave resonance field with in-plane angles Φ_H were measured in order to analyze the angular dependence of exchange stiffness constant A_{ex} in exchange biased MnIr/NiFe thin film. The A_{ex} of MnIr/NiFe thin film showed an anisotropic behavior such as $A_{ex} = A_0 + A_{eb}\cos\Phi_H$. The isotropic exchange stiffness constant A_0 was due to the exchange stiffness constant of NiFe, while anisotropic exchange stiffness constant A_{eb} was due to the exchange bias field.

Keywords : thin film, ferromagnetic resonance, spin wave resonance, exchange stiffness constant, exchange bias

교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 비등방성 교환 뻣뻣함 상수 특성

윤석수 · 김동영*
안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2021년 12월 2일 받음, 2021년 12월 23일 최종수정본 받음, 2021년 12월 27일 게재확정)

본 연구에서는 교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 자기장 각도 Φ_H에 따른 강자성 공명 자기장과 스핀파 공명 자기장을 측정하여, 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}의 각도 의존성을 분석하였다. 자기장 각도 Φ_H에 따른 A_{ex}는 $A_{ex} = A_0 + A_{eb}\cos\Phi_H$와 같이 비등방성 특성을 보였다. 등방성 특성을 갖는 교환 뻣뻣함 상수 A_0는 NiFe 박막의 교환 뻣뻣함 상수 특성에 기인하며, 비등방성 특성을 갖는 교환 뻣뻣함 상수 A_{eb}는 교환 바이어스 자기장에 의한 특성으로 분석하였다.

주제어 : 박막, 강자성 공명, 스핀파 공명, 교환 뻣뻣함 상수, 교환 바이어스

I. 서 론

강자성 재료의 스핀들은 유효 자기장 방향을 중심으로 세차 운동(precession)을 하며, 세차 운동을 하는 스핀들에 의하여 만들어져 강자성체 매질을 따라 진행하는 파동을 스핀파(spin wave)라고 한다. 스핀파의 전파 특성은 스핀들의 진동을 매개하는 교환 뻣뻣함 상수(exchange stiffness constant, A_{ex})에 의존한다. 이러한 A_{ex}는 스핀파를 이용한 스핀 소자 연구뿐만 아니라[1,2] 연자성/경자성이 결합된 교환 스프링 구조의 자화 특성을 분석하는 스핀-체인(spin-chain) 모델에 적용되고 있다[3]. A_{ex}는 브릴루앙 산란[4,5], 중성자 산란[6] 및 스핀파 공명[7,8] 등을 이용하여 측정하고 있으며, 본 연구에서는 스핀파 공명을 이용하여 교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 A_{ex}의 각도 의존성을 분석하였다.

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-54-820-5445,
Fax: +82-54-823-1628, e-mail: dykim@andong.ac.kr

II. 실험 방법

교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr(4 nm)/NiFe(100 nm) 박막은 고진공 DC 마그네트론 스퍼터링 장치를 사용하여 열산화막이 있는 Si 기판 위에 상온에서 증착하였다. MnIr/NiFe 박막의 하부층으로 Ta(5 nm)/Cu(5 nm)를 증착하였으며, 표면 산화를 방지하기 위하여 상부에 Ta(5 nm)를 증착하였다. 박막의 증착 후 DC 마그네트론 스퍼터링 장치 안에서 적외선을 사용하여 250 °C의 온도에서 3분 동안 진공 열처리를 진행하였다. MnIr/NiFe 박막의 자기장 세기에 따른 마이크로파 흡수 신호인 dP/dH는 Bruker사의 electron paramagnetic resonance spectrometer를 사용하여 9.89 GHz(X-band)의 마이크로파 주파수에서 측정하였다. MnIr/NiFe 박막의 A_{ex}의 각도 의존성을 분석하기 위하여 수평면(in-plane)에서 자기장 각도 Φ_H에 따른 마이크로파 미분 흡수 신호를 측정하여 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 자기장 H_{FMR}과 스핀파 공명(spin wave resonance, SWR) 자기장 H_{SWR}을 각각 도출

하였다. MnIr/NiFe 박막의 자화곡선은 VSM을 이용하여 측정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

교환 결합력을 갖는 반강자성-강자성 박막은 계면의 비상보성 반강자성 스핀에 의하여 자기장 바이어스가 걸린 것과 같은 자화곡선을 보인다. 이러한 바이어스 자기장은 강자성/반강자성 계면의 교환 결합력이 원인이므로 교환 바이어스 자기장 H_{ex}이라고 한다.

Fig. 1은 교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 자화곡선을 보인 것이다. 자화곡선으로부터 구한 교환 바이어스 자기장 H_{ex} = 19.4 Oe이었으며, 포화 자화 M_s = 867 emu/cm^{3}을 얻었다. 이러한 교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}를 구하기 위하여 강자성 공명 신호와 스핀파 공명 신호를 측정하였다.

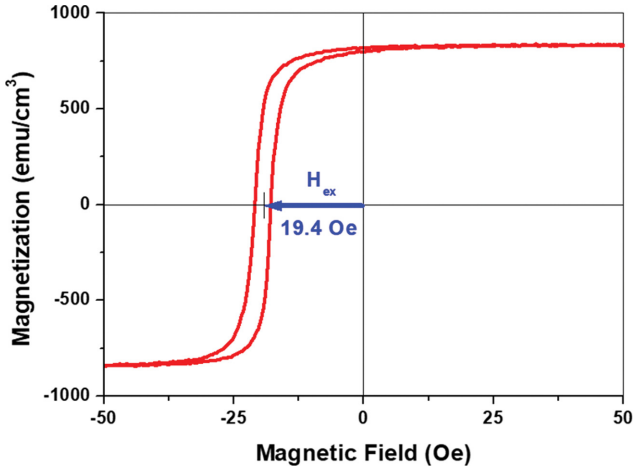

Fig. 1. (Color online) M-H loop of exchange biased MnIr(4 nm)/NiFe(100 nm) thin film. The exchange bias field H_{ex} of MnIr/NiFe thin film was 19.4 Oe.

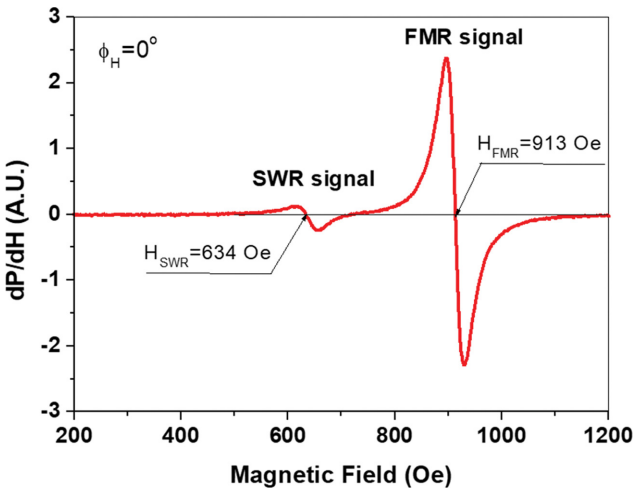

Fig. 2. (Color online) Microwave absorption signals with magnetic field at easy axis (Φ_H = 0°) in exchange biased MnIr/NiFe thin film. The ferromagnetic resonance field H_{FMR} and spin wave resonance field H_{SWR} were 913 Oe and 634 Oe at Φ_H = 0°, respectively.

Fig. 2는 MnIr/NiFe 박막의 자화 용이축 방향인 Φ_H = 0에서 측정한 자기장에 따른 마이크로파의 미분 흡수 신호 dP/dH를 보인 것이다. 높은 자기장 영역에서 보인 흡수 신호는 강자성 공명 신호이며 강자성 공명 자기장 H_{FMR} = 913 Oe로 측정되었다. 한편 강자성 공명 자기장 보다 낮은 자기장에서 나타난 흡수 신호는 두께 방향으로 진행하는 스핀파의 정상파 공명에 기인하는 신호이며 스핀파 공명 자기장 H_{SWR} = 634 Oe이었다. 본 연구에서는 교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}의 각도 의존성을 분석하기 위하여 자기장 각도 Φ_H에 따른 H_{FMR}과 H_{SWR}을 도출하였다.

Fig. 3은 강자성 공명 자기장 H_{FMR} 및 스핀파 공명 자기장 H_{SWR}의 각도 의존성을 보인 것이다. MnIr/NiFe의 일축 이방성 자기장 H_k와 일방 이방성을 갖는 교환 바이어스 자기장 H_{ex}는 포화 자화에 의한 $4\pi M_s$ 보다 매우 작은 조건을 만족하므로 강자성 공명 자기장 H_{FMR}은 간단하게 다음과 같이 표현된다[9].

$$H_{FMR} = \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 \frac{1}{4\pi M_s} - H_k \cos 2\Phi_H - H_{ex} \cos \Phi_H \qquad (1)$$

여기서 γ는 자이로 계수(gyromagnetic factor)이며, ω는 마이

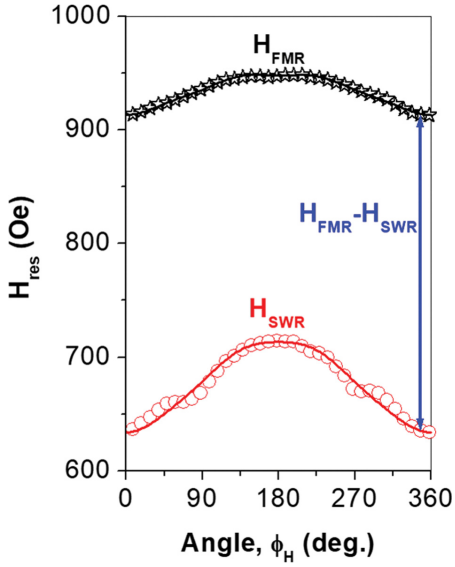

Fig. 3. (Color online) Angular dependence of ferromagnetic resonance field H_{FMR} and spin wave resonance field H_{SWR} in exchange biased MnIr/NiFe thin film. The solid lines were fitted by Eq. (1).

크로파의 각주파수($\omega = 2\pi f$)이다. Fig. 3에서 검은색 실선은 식(1)을 이용하여 계산한 각도에 따른 강자성 공명 자기장이며, 계산 결과로부터 MnIr/NiFe 박막의 일축 이방성 자기장 $H_k = 2.5$ Oe이었고, 교환 바이어스 자기장 $H_{ex} = 17.3$ Oe이었다. FMR 장치로 측정한 교환 바이어스 자기장은 VSM으로 측정한 값보다 2.1 Oe 작게 나타났다. 한편, 강자성 공명 자기장 보다 낮은 자기장 쪽에서 측정된 스핀파 공명 자기장은 강자성 공명 자기장과 유사한 일방 이방성 특성을 보였으며, 스핀파의 일방 이방성 자기장은 교환 바이어스 자기장의 약 2배인 39.8 Oe임을 계산 결과(붉은색 실선)로부터 알 수 있었다.

교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}는 강자성 공명 자기장 H_{FMR}과 스핀파 공명 자기장 H_{SWR}의 차에 선형적으로 비례하는 특성이 있다. 따라서 H_{FMR}과 H_{SWR}를 동시에 측정하여 강자성 재료의 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}를 구하는 방법이 사용되고 있으며, 재료의 두께에 의존하는 H_{SWR}은 다음과 같이 표현된다[10-13].

$$H_{SWR} = H_{FMR} - \frac{2A_{ex}}{M_s}\left(\frac{n\pi}{t}\right)^2 \tag{2}$$

여기서 t와 M_s는 각각 강자성 박막의 두께 및 포화 자화이고, n은 스핀파의 정상파 모드를 나타내는 정수이다. 식(2)에서 H_{SWR}은 H_{FMR}보다 낮은 자기장에서 나타나며, 박막 두께의 제곱(t^2)과 포화 자화 M_s에 반비례하고, 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}에 비례한다. 본 연구에서 사용한 NiFe 박막은 $t = 100$ nm이고, $M_s = 867$ emu/cm^{3}이었다. 또한, 스핀파는 $n = 1$에 해당하므로 식(2)로부터 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}는 다음과 같이 얻을 수 있다[7].

$$A_{ex} = \frac{M_s t^2}{2\pi^2}(H_{FMR} - H_{SWR}) \tag{3}$$

교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}는 식(3)을 이용하여 구하였으며, 각도에 따른 이방성 특성을 분석하기 위하여 식(3)에서 보인 수평면 각도에 따른 ($H_{FMR} - H_{SWR}$)의 특성을 분석하였다.

Fig. 4는 MnIr/NiFe 박막의 $H_{FMR} - H_{SWR}$의 각도 의존성을 보인 것이다. NiFe(100 nm) 박막의 경우, $H_{FMR} - H_{SWR}$는 자기장 각도에 따라서 일정한 등방성 특성을 보였다[7]. 그러나 교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 $H_{FMR} - H_{SWR}$는 Fig. 4에 보인 것과 같이 각도에 따라서 변화하는 이방성 특성을 보였다. 이러한 이방성 특성은 반강자성-강자성 표면에 존재하는 반강자성 스핀의 고정(pinning)에 의한 영향으로 해석되고 있다[14,15]. 반강자성 스핀의 고정은 일방 이방성 특성을 갖는 교환 바이어스 자기장 H_{ex}를 유발한다. 따라서 $H_{FMR} - H_{SWR}$의 이방성 특성은 NiFe 박막의 등방성 특성을

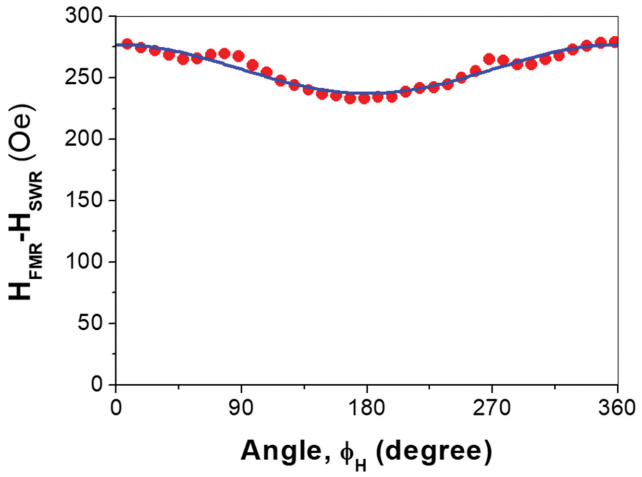

Fig. 4. (Color online) Angular dependence of $H_{FMR} - H_{SWR}$ in exchange biased MnIr/NiFe thin film. The solid line was fitted by Eq. (4).

갖는 H_0와 일방 이방성 특성을 갖는 교환 바이어스 자기장 효과 $H_{ex}\cos\Phi_H$가 합쳐진 결과로 볼 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$H_{FMR} - H_{SWR} = H_0 + H_{ex}\cos\Phi_H \tag{4}$$

Fig. 4에서 보인 청색 실선은 MnIr/NiFe 박막에 대한 $H_{FMR} - H_{SWR}$의 각도 의존성을 식(4)로 계산한 결과이다. 계산에 사용한 $H_0 = 256$ Oe이고, H_{ex}는 VSM으로 측정한 19.4 Oe를 사용하였다. 계산 결과는 실험 결과와 일치하였으며, $H_{FMR} - H_{SWR}$는 교환 바이어스 자기장 H_{ex}에 의하여 이방성 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 교환 바이어스 자기장 H_{ex}에 의한 $H_{FMR} - H_{SWR}$의 변화 폭은 NiFe에 의한 H_0와 비교하여 약 15%가량으로 나타났다.

교환 바이어스 특성을 갖는 재료의 A_{ex}는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_{ex} = A_0 + A_{eb}\cos\Phi_H \tag{5}$$

여기서 $A_0 = \frac{M_s t^2}{2\pi^2}H_0$는 NiFe의 등방성 H_0에 기인한 교환 뻣뻣함 상수이며, $A_{eb} = \frac{M_s t^2}{2\pi^2}H_{ex}$는 교환 바이어스 자기장 H_{ex}에 기인한 교환 뻣뻣함 상수이다.

Fig. 5는 MnIr/NiFe 박막의 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}의 각도 의존성을 보인 것이다. Fig. 5에서 보인 청색 실선은 MnIr/NiFe 박막에 대한 A_{ex}의 각도 의존성을 식(5)로 계산한 결과이다. 계산에는 $A_0 = 11.2 \times 10^{-7}$ erg/cm, $A_{eb} = 0.87 \times 10^{-7}$ erg/cm를 사용하였다. A_0는 NiFe(100 nm) 단일 박막에서 측정한

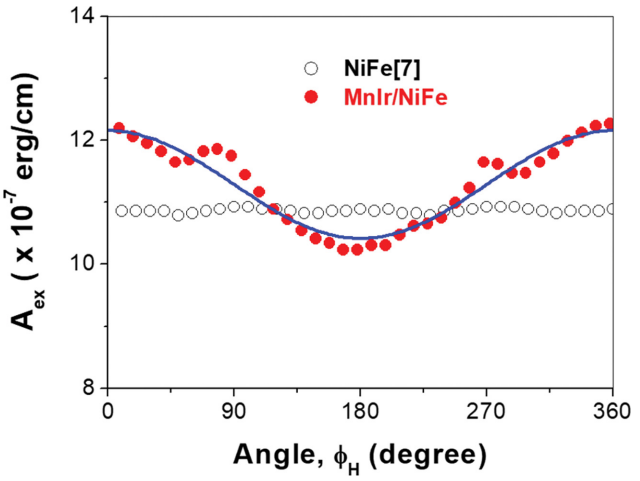

Fig. 5. (Color online) Angular dependence of exchange stiffness constant A_{ex} in MnIr/NiFe thin film. The solid line was fitted by Eq. (5). The open cycle symbols were the exchange stiffness constant A_{ex} of NiFe(100 nm) thin film [7].

등방성 특성을 갖는 $A_{ex} = 10.9 \times 10^{-7}$ erg/cm[7]와 유사한 값으로 측정되었다. 따라서 교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}는 자기장 방향을 변화시켜 약 15% 범위의 조절이 가능함을 알 수 있었다.

IV. 결　　론

본 연구에서는 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}의 각도 의존성을 분석하기 위하여 교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 자기장 각도 Φ_H에 따른 강자성 공명 자기장과 스핀파 공명 자기장을 측정하였다. 또한, A_{ex} 분석에 이용되는 MnIr/NiFe 박막의 교환 바이어스 자기장 $H_{ex} = 19.4$ Oe와 포화 자화 $M_s = 867$ emu/cm^{3}은 자화곡선으로부터 구하였다.

MnIr/NiFe 박막의 자기장 각도 Φ_H에 따른 A_{ex}는 $A_{ex} = A_0 + A_{eb}\cos\Phi_H$와 같이 비등방성 특성을 보였다. 등방성 특성을 갖는 교환 뻣뻣함 상수 $A_0 = 11.2 \times 10^{-7}$ erg/cm이었으며, 이는 NiFe(100 nm) 단일 박막에서 측정한 등방성 특성을 갖는 $A_{ex} = 10.9 \times 10^{-7}$ erg/cm와 유사한 값으로 측정되었다. 따라서 A_0는 NiFe의 교환 뻣뻣함 상수에 의한 영향으로 분석하였다. 한편, 비등방성 특성을 갖는 $A_{eb} = 0.87 \times 10^{-7}$ erg/cm이었으며, 이는 교환 바이어스 자기장에 의한 영향으로 분석하였다. 따라서 교환 바이어스 특성을 갖는 MnIr/NiFe 박막의 교환 뻣뻣함 상수 A_{ex}는 자기장 방향을 변화시켜 약 15% 범위의 조절이 가능함을 알 수 있었으며, 이들 결과는 스핀파를 이용한 소자 연구, 자구의 생성/소멸 및 자벽의 크기 분석 등에 이용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본 연구 지원 사업에 의하여 연구되었습니다.

References

[1] N. Vukadinovic, O. Vacus, M. Labrune, O. Acher, and D. Pain, Phys. Rev. Lett. **85**, 2817 (2000).
[2] N. Vukadinovic, M. Labrune, J. Ben Youssef, A. Marty, J. C. Toussaint, and H. Le Gall, Phys. Rev. B **65**, 054403 (2001).
[3] E. E. Fullerton, J. S. Jiang, M. Grimsditch, C. H. Sowers, and S. D. Bader, Phys. Rev. B **58**, 12193 (1998).
[4] J. Wei, Z. Zhu, C. Song, H. Feng, P. Jing, X. Wang, Q. Liu, and J. Wang, J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 265002 (2016).
[5] J. Cho, J. S. Kim, and C. Y. You, J. Kor. Mag. Soc. **31**, 219 (2021).
[6] G. Shirane, V. J. Minkiewicz, and R. Nathans, J. Appl. Phys. **39**, 383 (1968).
[7] S. S. Yoon and D. Y. Kim, J. Kor. Mag. Soc. **27**, 175 (2017).
[8] M. Belmeguenai, D. Apalkov, Y. Roussigné, M. Chérif, A. Stashkevich, G. Feng, and X. Tang, J. Phys. D: Appl. Phys. **50**, 415003 (2017).
[9] S. J. Yuan, K. Yu, L. M. Yu, S. X. Cao, C. Jing, and J. C. Zhang, J. Appl. Phys. **101**, 113915, (2007).
[10] C. Bilzer, T. Devolder, Joo-Von Kim, G. Counil, C. Chappert, S. Cardoso, and P. P. Freitas, J. Appl. Phys. **100**, 053903 (2006).
[11] K. Kiseki, S. Yakata, and T. Kimura, Appl. Phys. Lett. **101**, 212404 (2012).
[12] X. Liu, Y. Y. Zhou, and J. K. Fuedyna, Phys. Rev. B **75**, 195220 (2007).
[13] Y. Y. Kim, J. S. Baek, S. J. Lee, K. W. Rhie, and W. Y. Lim, J. Kor. Phys. Soc. **31**, 495 (1997).
[14] M. A. Sousa, F. Pelegrini, W. Alayo, J. Q. Marcatoma, and E. B. Saitovitch, Physica B **450**, 167 (2014).
[15] R. Magaraggia, K. Kennewell, M. Kostylev, R. L. Stamps, M. Ali, D. Greig, B. J. Hickey, and C. H. Marrows, Phys. Rev. B **83**, 054405 (2011).