

Angular Dependence of Exchange Stiffness Constant of NiFe Thin Film

Seok Soo Yoon and Dong Young Kim*

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

(Received 10 October 2017, Received in final form 19 October 2017, Accepted 19 October 2017)

The exchange stiffness constant A_{ex} was linearly proportional to the difference of spin wave resonance field H_{SWR} and ferromagnetic resonance field H_{FMR} . In this work, we measured the H_{SWR} and H_{FMR} with in-plane angles in order to analyze the angular dependence of A_{ex} in NiFe thin film with thickness of 100 nm. The A_{ex} of NiFe thin film was shown isotropic behavior not depending on the in-plane angles. The measured value of A_{ex} was 10.9×10^{-7} erg/cm and its value should be applied to the spin wave devices.

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

NiFe 박막에서 교환 뺏뺏함 상수의 각도 의존성 분석

윤석수 · 김동영*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2017년 10월 10일 받음, 2017년 10월 19일 최종수정본 받음, 2017년 10월 19일 게재확정)

교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 스핀파의 공명 자기장 H_{SWR} 과 강자성 공명 자기장 H_{FMR} 의 차에 선형적으로 비례한다. 본 연구에서는 두께가 100 nm인 NiFe 박막에서 A_{ex} 의 각도 의존성을 분석하기 위하여 수평면에서 자기장 각도에 따른 H_{SWR} 와 H_{FMR} 를 측정하였다. NiFe 박막의 A_{ex} 는 수평면의 자기장 각도와 무관하게 등방성 특성을 보였다. 본 연구에서 측정된 A_{ex} 의 값은 10.9×10^{-7} erg/cm였으며, 이 값은 스핀파를 이용한 소자에 응용될 수 있다.

주제어 : 박막, 강자성 공명, 스핀파 공명, 교환 뺏뺏함 상수, 일축 이방성

I. 서 론

자성 재료를 이루는 원자 내부의 스핀들은 스핀-스핀 사이에 작용하는 강자성 결합에 의하여 스핀들이 모두 한쪽 방향으로 정렬 되며, 이러한 스핀들의 정렬에 의하여 강자성이 나타난다. 강자성 재료에 자기장을 인가하면 스핀들 각각은 자기장 방향을 중심으로 세차 운동을 하게 되며, 세차운동을 하고 있는 스핀들에 의하여 만들어진 파동을 스핀파(spin wave)라고 한다. 따라서 강자성체 매질을 진행하는 스핀파의 전파 특성은 스핀들의 진동을 매개하는 교환 뺏뺏함 상수(exchange stiffness constant, A_{ex})에 의존한다. 이러한 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 스핀파를 이용한 스핀 소자 연구뿐만 아니라 자구의 생성/소멸 및 자벽의 크기 분석에 이용된다[1,

2]. 또한 교환 뺏뺏함 상수(A_{ex})는 차세대 자기 메모리의 미디어 재료로 부각되고 있는 연자성/경자성이 결합된 교환 스프링 구조의 자화 특성 분석에 활용되고 있다[3]. 그러나, 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 자성 재료의 성분[4] 및 제작 조건[5] 등에 따라서 변화되는 특성이 있으며, 브릴루앙 빛산란[5], 중성자 산란[7] 및 스핀파 공명[8] 등을 이용하여 측정되고 있다. 이들 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 의 특성 변화에 대한 연구는 미미하며, 본 연구에서는 스핀파 공명을 이용하여 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 의 각도 의존성을 분석하였다.

자성 박막에서 모든 자기 스핀들이 동일하게 세차 운동(coherent precession) 하면서 공명 조건을 만족할 때 강자성 공명이라 부른다. 한편, 세차운동을 하는 자기 스핀들이 만드는 스핀파가 박막 재료의 두께 방향으로 진행하면서 정상파(standing wave) 조건을 만족할 때 스핀파 공명(spin wave resonance)이 발생되며, 두께가 560 nm인 NiFe 박막 재료에서 처음 발견되었다[9]. 강자성 공명(ferromagnetic resonance,

FMR) 장치를 이용하여 측정된 강자성 공명과 스핀파 공명은 LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert) 운동 방정식을 사용하여 분석되고 있다. 특정 주파수를 사용하는 FMR 장치를 이용하여 강자성 공명 신호와 스핀파 공명 신호를 동시에 측정하면, 스핀파 공명 신호는 강자성 공명 신호 보다 작은 자기장에서 나타난다. 교환 뺏뺏합 상수 A_{ex} 는 강자성 공명 자기장과 스핀파 공명 자기장의 차에 선형적으로 비례하는 특성이 있다. 따라서 강자성 공명 자기장과 스핀파 공명 자기장을 동시에 측정하여 강자성 재료의 교환 뺏뺏합 상수 A_{ex} 를 구하는 방법이 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 두께가 100 nm인 NiFe 재료의 수평면에서 자기장 각도에 따른 강자성 공명 신호와 스핀파 공명 신호를 측정하였으며, 이들 결과로부터 교환 뺏뺏합 상수 A_{ex} 의 각도 의존성을 분석하였다.

II. 실험 방법

강자성 재료인 NiFe 박막은 고진공 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 열산화막이 있는 Si 기판 위에 Ni₈₀Fe₂₀ 타겟을 사용하여 100 nm의 두께로 증착 하였으며, 진공에서 적외선을 사용하여 250 °C의 온도에서 3분 동안 열처리를 하였다. NiFe 박막의 결정성 향상을 위하여 하부층으로 Ta(5 nm)/Cu(5 nm)를 증착 하였으며, NiFe 자성 박막의 표면 산화를 방지하기 위하여 NiFe 상부에 Ta(5 nm)를 증착 하였다. 제작된 NiFe 박막의 적층 구조는 Si/SiO₂/Ta/Cu/NiFe(100 nm)/Ta이였으며, 증착된 NiFe 박막의 조성비는 79 wt% Ni와 21 wt% Fe였다. NiFe 박막 재료의 자기장 세기에 따른 강자성 공명 신호 및 스핀파 공명 신호는 FMR 측정 장치인 Bruker사의 Xepr를 사용하였으며, 9.89 GHz(X-band)의 고정 주파수에서 측정하였다. NiFe 박막의 교환 뺏뺏합 상수 A_{ex} 의 각도 의존성을 분석하기 위하여 수평면(in-plane)에서 자기장 각도 ϕ_H 에 따른 강자성 및 스핀파 공명 신호를 동시에 측정하여 강자성 공명 자기장과 스핀파 공명 자기장을 각각 도출하였다. 또한 NiFe의 포화 자화량을 측정하기 위하여 수직면(out-of-plane)에서 자기장 각도 θ_H 에 따른 강자성 공명 신호를 측정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

강자성 공명 신호는 강자성 재료의 결정이방성, 유도이방성, 다층박막의 층간 결합력 및 교환 바이어스 등을 이방성 특성을 분석하기 위하여 이용되고 있다. 한편, 스핀파 공명 신호는 교환 뺏뺏합 상수를 분석하는데 이용되고 있으며, 재료의 두께에 의존하는 스핀파 공명 자기장 H_{SWR} 은 다음과 같이 표

현된다[10-13].

$$H_{SWR} = H_{FMR} - \frac{2A_{ex}(n\pi)^2}{M_s t} \tag{1}$$

여기서 H_{FMR} 는 강자성 공명 자기장이고, t 와 M_s 는 박막의 두께 및 포화 자화량이다. 자성 재료의 교환 뺏뺏합 상수 A_{ex} 는 스핀파들의 탄성 특성을 나타내는 자성 재료의 물성이다. n 은 스핀파의 정상파 모드를 나타내는 정수이다($n=1, 2, 3, 4, \dots$). 식(1)에서 스핀파 공명 자기장은 강자성 공명 자기장 보다 작은 자기장에서 나타나며, 강자성 공명 자기장과 스핀파 공명 자기장의 차이는 박막의 두께의 제곱에 반비례하고, 교환 뺏뺏합 상수 A_{ex} 와 자성 재료의 포화 자화량 M_s 에 비례한다. 따라서, 식(1)로부터 교환 뺏뺏합 상수 A_{ex} 는 다음과 같이 표현된다.

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

본 연구에서는 두께가 100 nm인 NiFe 박막의 교환 뺏뺏합 상수 A_{ex} 를 분석하기 위하여 자기장의 세기에 따른 공명 신호를 측정하였다.

Fig. 1은 두께가 100 nm인 NiFe 재료의 자화 용이축 방향에서 자기장의 세기에 따라 측정된 공명 신호 특성을 보인 것이다. 두께가 100 nm인 NiFe 재료는 두 개의 공명 신호가 측정되었다. 자기장의 세기가 932 Oe에서 보인 공명 자기장은 강자성 공명 자기장 H_{FMR} 에 해당하며, 강자성 공명 자기장 보다 낮은 685 Oe의 자기장에서 나타난 공명 자기장은 두께 방향으로 진행하는 스핀파의 정상파 공명에 기인하는 스핀파 공명 자기장 H_{SWR} 이다. Fig. 1에서 측정된 스핀파는

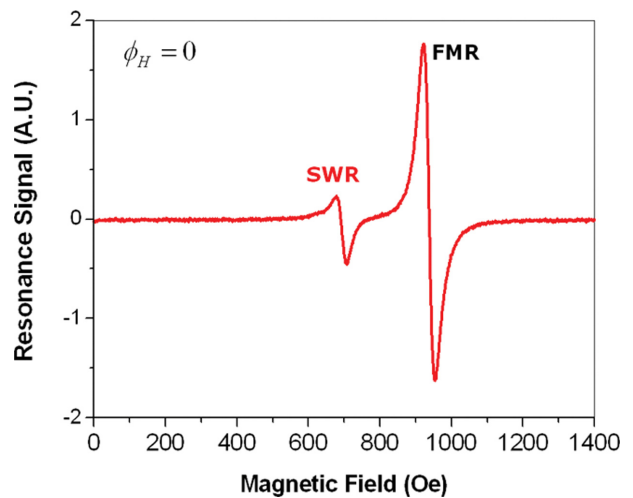


Fig. 1. (Color online) Measured resonance signals with magnetic field at easy axis ($\phi_H = 0^\circ$) in NiFe thin films with thickness of 100 nm.

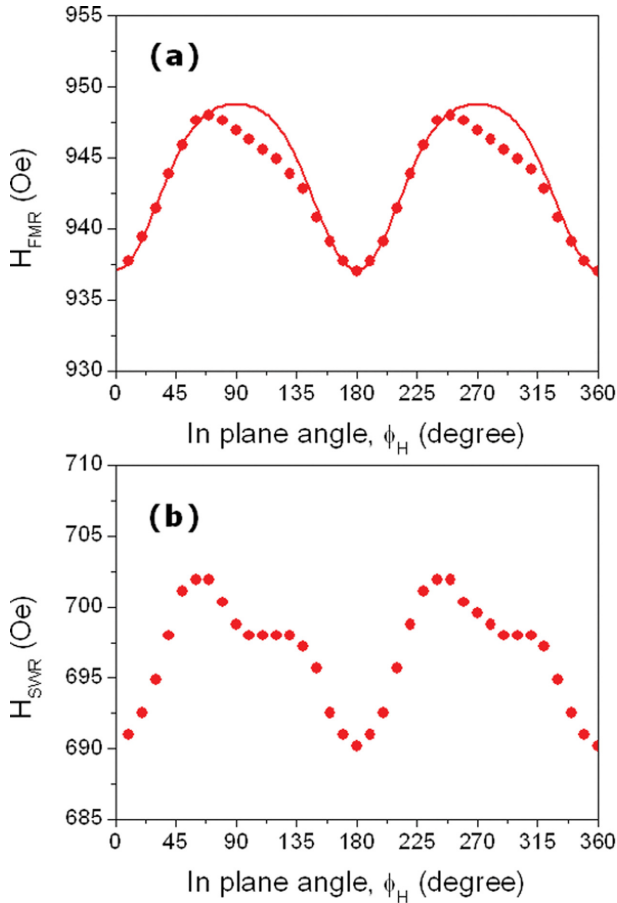


Fig. 2. (Color online) (a) Ferromagnetic resonance field H_{FMR} and (b) spin wave resonance field H_{SWR} with in plane magnetic field angle ϕ_H measured in NiFe thin film with thickness of 100 nm. The solid lines are fitted by Eq. (3).

$n = 1$ 에 해당하는 정상파 모드만 측정되었다. 따라서, 본 연구에서는 $n = 1$ 에 해당하는 정상파 모드에 의한 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 를 식(2)에 대입하여 구하였다. NiFe 박막의 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 의 각도 의존성을 분석하기 위하여 수평면(in-plane)에서 자기장 각도 ϕ_H 에 따른 강자성 및 스핀파 공명 자기장을 각각 측정하였다.

Fig. 2(a)와 (b)는 수평면에서 측정한 강자성 공명 자기장 H_{FMR} 및 스핀파 공명 자기장 H_{SWR} 의 수평면 각도 의존성을 보인 것이다. NiFe은 이방성 자기장 H_K 가 포화 자화량 보다 매우 작은 $4\pi M_s \gg H_{res} \gg H_K$ 조건을 만족하므로 강자성 공명 자기장 H_{FMR} 은 간단하게 다음과 같이 표현된다[14].

$$H_{FMR} = \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 \frac{1}{4\pi M_s} - H_K \cos 2\phi_H - H_C \cos 4\phi_H \quad (3)$$

여기서 $\gamma = g\mu_B/\hbar$ 는 자기 스핀의 자이로 계수(gyromagnetic factor)이며, g , μ_B , 및 \hbar 는 각각 g-factor, 보아 마그네톤 상수 및 플랑크 상수이다. 또한 ω 는 마이크로파의 각주파수

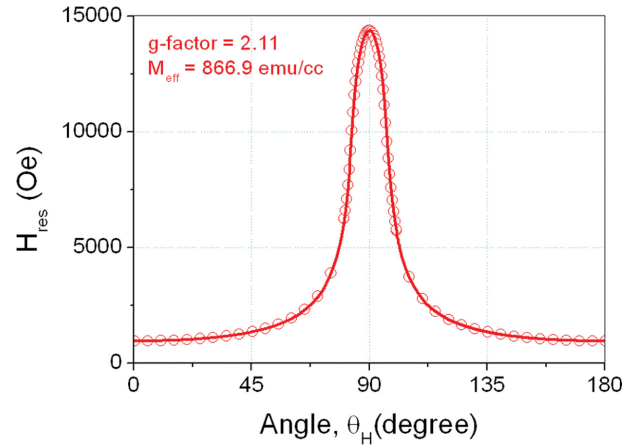


Fig. 3. (Color online) Ferromagnetic resonance field H_{FMR} with out-of plane magnetic field angle θ_H measured in NiFe thin films with thickness of 100 nm. The solid lines are fitted by Eq. (4).

($\omega = 2\pi$)이며, ϕ_H 는 박막 재료의 수평면에서 자화 용이축으로부터 측정된 자기장의 각도를 나타낸다. Fig. 2(a)에서 실선은 식(3)을 이용하여 각도에 따른 강자성 공명 자기장을 계산한 결과이며, 계산 결과로부터 NiFe 박막 재료의 일축 이방성 자기장 $H_K = 6.0 \text{ Oe}$ 였으며, 쌍축 이방성 상수 $H_C = 1.1 \text{ Oe}$ 였다. 한편, Fig. 2(b)에서 보인 각도에 따른 스핀파 공명 자기장은 강자성 공명 자기장 보다 낮은 자기장 쪽으로 이동되어 있었으며, 강자성 공명 자기장과 동일한 이방성 특성을 보임을 알 수 있었다. 식(2)에서 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 자성 재료의 포화 자화량에 비례하는 특성이 있다. 따라서 본 연구에서는 NiFe 박막의 포화 자화량 M_s 를 도출하기 위하여 수직면에서 자기장의 각도에 따른 강자성 공명 자기장을 측정하였다.

Fig. 3은 NiFe 박막에서 수직면의 자기장 각도에 따른 강자성 공명 자기장을 보인 것이다. Fig. 3에서 실선은 수직면 자기장 방향(θ_H)에 대한 강자성 공명 자기장 H_{FMR} 을 계산하는 다음의 식(4)를 사용하였다[15, 16].

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{(H_{res} \cos(\theta_H - \theta_M) - 4\pi M_{eff} \cos^2 \theta_M) \times (H_{res} \cos(\theta_H - \theta_M) - 4\pi M_{eff} \cos 2\theta_M)}{4\pi M_{eff} \cos^2 \theta_M} \quad (4)$$

여기서 M_{eff} 는 유효 포화 자화량이고, θ_M 는 수직면에서 자구의 자화 방향이다.

식(4)의 계산 결과로부터 두께가 100 nm인 NiFe 재료의 $g = 2.11$ 과 $M_{eff} = 866.9 \text{ emu/cm}^2$ 의 값을 각각 얻었다. M_{eff} 는 NiFe의 일축 이방성 상수 K_u 와 표면 이방성 상수 K_s 에 기인하며 다음과 같이 표현된다.

$$M_{eff} = M_s + \frac{K_s}{2\pi M_s t} + \frac{K_u}{2\pi M_s} \quad (5)$$

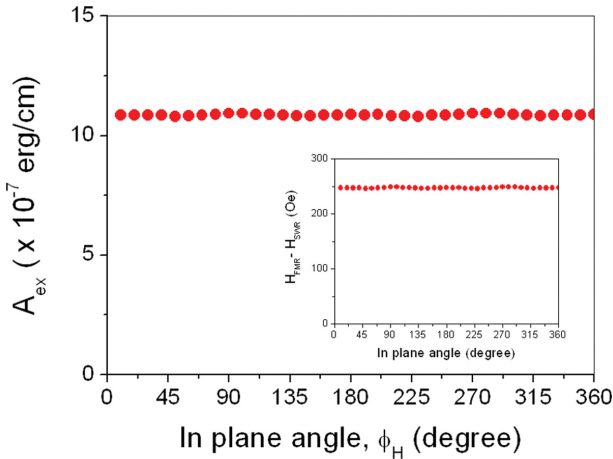


Fig. 4. (Color online) (a) Angular dependence of exchange stiffness constant A_{ex} measured in NiFe thin films with thickness of 100 nm.

NiFe 박막의 일축 이방성 자기장($H_{Ku} = 2K_u/M_s$)은 약 5.7 Oe 로 매우 작으며, 두께가 100 nm인 경우 표면 이방성 상수에 의한 $2K_s/tM_s$ 도 매우 작다. 따라서 식(5)의 오른쪽 두 번째 및 세 번째 항을 무시하면 M_{eff} 는 M_s 로 근사하는 것이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 NiFe 박막의 포화 자화량 $M_s = 866.9 \text{ emu/cm}^2$ 의 값을 식(2) 대입하여 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 를 구하였다.

Fig. 4는 NiFe 박막의 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 의 수평면 각도 의존성을 보인 것이다. A_{ex} 는 수평면에서 자기장 각도에 따라서 일정한 값인 $A_{ex} = 10.9 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 을 나타내고 있으며, 수평면에서 등방성 특성을 갖고 있음을 알 수 있었다. 이러한 등방성 특성은 Fig. 4에 삽입한 그림에서 보인 것과 같이 수평면 각도에 따른 ($H_{FMR} - H_{SWR}$)의 등방성 특성을 반영하고 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 얻은 NiFe의 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 의 타당성을 분석하기 위하여 다른 논문에서 제시한 계산 및 측정값을 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보인 것과 같이 계산에 의한 Ni, Fe, Co 및 NiFe의 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 각각 9.7, 20.1, 30.0, $13.0 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 이었다[17]. 그러나 상온, 300, 400 °C의 온도에서 열처리한 NiFe 박막의 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 각각 7.2, 10.7 및 $12.9 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 의 값을 나타내고 있었다[5]. 이렇듯 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 재료의 구조, 조성 및 재료의 제작 조건에 따라서 변한다. 본 연구에서 측정된 250 °C에서 열처리한 100 nm 두께의 NiFe 재료의 교환 뺏뺏함 상수 $A_{ex} = 10.9 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 의 값은 Wei 등[5]이 300 °C에서 열처리한 NiFe 재료에서 측정된 교환 뺏뺏함 상수 $A_{ex} = 10.7 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 의 값과 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 얻은 NiFe 박막의 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 타당한 값이며, 이 값은 스핀파를 이용한 스핀파 소자 연구, 자구의 생성/소멸 및 자벽의 크기 분석 등에 이용될 수 있다.

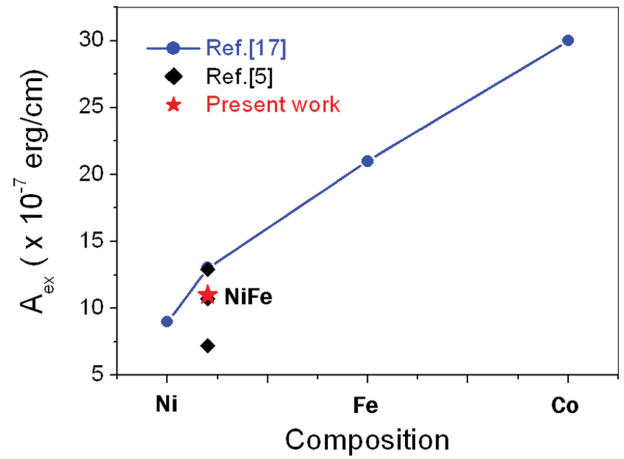


Fig. 5. (Color online) (a) Composition dependence of exchange stiffness constant A_{ex} . The red star symbol shows present work. The black diamond symbols are measured values at different temperature [5] and blue circle symbols are calculated values [17].

생성/소멸 및 자벽의 크기 분석 등에 이용될 수 있다. Fig. 5에서 보인 Ni, Fe 및 Co 박막에 대한 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 추후 측정을 통하여 계산 값과 비교 분석할 예정이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 스핀파의 공명 자기장 H_{SWR} 과 강자성 공명 자기장 H_{FMR} 의 차에 선형적으로 비례하고 포화 자화량에 반 비례하는 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 의 각도 의존성 분석하기 위하여 두께가 100 nm인 NiFe 박막의 수평면에서 자기장 각도에 따른 H_{SWR} 와 H_{FMR} 를 측정하였다. 또한 NiFe 박막의 포화 자화량을 측정하기 위하여 수직면(out-of-plane)에서 자기장 각도에 따른 강자성 공명 자기장을 측정하였으며, 계산 결과로부터 두께가 100 nm인 NiFe 박막 재료의 포화 자화량 $M_s = 866.9 \text{ emu/cm}^2$ 의 값을 얻었다.

본 연구에서는 250 °C에서 열처리한 100 nm 두께의 NiFe 박막 재료에서 측정된 ($H_{SWR} - H_{FMR}$)와 M_s 값을 사용하여 NiFe 박막의 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 를 구하였다. NiFe 박막 재료의 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 는 수평면의 자기장 각도와 무관하게 등방성 특성을 보였으며, 등방성 특성을 보인 교환 뺏뺏함 상수 $A_{ex} = 10.9 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 의 값을 얻었다. 본 연구에서 사용한 250 °C에서 열처리한 NiFe 재료의 교환 뺏뺏함 상수 A_{ex} 의 값은 Wei 등[5]이 300 °C에서 열처리한 NiFe 재료에서 측정된 교환 뺏뺏함 상수 $A_{ex} = 10.7 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 의 값과 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 스핀파를 사용하여 구한 교환 뺏뺏함 상수 $A_{ex} = 10.9 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 는 타당한 값이며, 이 값은 스핀파를 이용한 스핀파 소자 연구, 자구의 생성/소멸 및 자벽의 크기 분석 등에 이용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부에서 지원하는 DGIST 일반사업에 의해 수행되었습니다(17-BT-02).

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] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, *Science* **11**, 190 (2008).
- [4] X. Liu, R. Sooryakumar, C. J. Gutierrez, and G. A. Prinz, *J. Appl. Phys.* **75**, 7021 (1994).
- [5] 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).
- [6] S. Vernon, S. Lindsay, and M. B. Stearns, *Phys. Rev. B* **29**, 4439 (1984).
- [7] G. Shirane, V. J. Minkiewicz, and R. Nathans, *J. Appl. Phys.* **39**, 383 (1968).
- [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] M. H. Seavey, Jr. and P. E. Tannenwald, *Phys. Rev. Lett.* **1**, 168 (1958).
- [10] C. Bilzer, T. Devolder, J.-V. Kim, G. Counil, and C. Chappert, *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] S. Yuan, K. Yu, L. M. Yu, S. X. Cao, C. Jing, and J. C. Zhang, *J. Appl. Phys.* **101**, 113915 (2007).
- [15] S. Misukami, Y. Ando, and T. Miyazaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 580 (2001).
- [16] S. Yuan, L. Wang, R. Shan, and S. M. Zhou, *Appl. Phys. A* **79**, 701 (2004).
- [17] C.Y. You, *Appl. Phys. Exp.* **5**, 103001 (2012).