

NiFe 박막의 두께에 따른 강자성 공명 특성 분석

김동영 · 윤석수*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

(2013년 2월 6일 받음, 2013년 2월 22일 최종수정본 받음, 2013년 2월 28일 게재확정)

본 연구에서는 NiFe 박막 시편을 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제조하여 박막면 기준으로 수직면(out-of-plane) 자기장 방향과 수평면(in-plane) 자기장 방향에 따른 강자성 공명 자기장을 측정하였다. 수직면 자기장 방향에 따른 강자성 공명 자기장으로부터 유효자화량(M_{eff})을 도출하였으며, NiFe 두께에 따른 M_{eff} 의 감소는 $K_s = -0.23 \text{ erg/cm}^2$ 의 값을 갖는 표면 이방성 상수에 기인하였다. 또한 수평면 자기장 방향에 따른 강자성 공명 자기장으로부터 수평면에서의 일축 이방성 자기장을 도출하였다. 한편, 일축 이방성 에너지의 자화 용이축이 두께가 감소함에 따라 시편 제조 시 인가한 자기장의 반대 방향으로 회전하고 있었으며, 이러한 현상은 시편 표면에 형성된 NiFeO의 반강자성 특성에 의한 현상으로 설명하였다.

주제어 : 강자성 공명, 유효자화량, 표면 이방성 상수, 일축 이방성 자기장

I. 서 론

강자성체의 자구를 형성하는 자구모멘트의 세차운동 주파수와 마이크로파 주파수가 공명 조건을 만족하는 상태에서 마이크로파 에너지의 흡수가 최대가 되는 현상을 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR)이라고 한다. 이러한 강자성 공명은 자성 박막 재료의 자기 에너지와 관련되어 있으므로 자성재료의 자기 이방성 상수, 다층박막의 층간 결합력, 교환 바이어스, 자성 재료의 감쇠상수 및 g-factor 등을 결정하기 위하여 널리 사용되고 있다[1-8]. 최근에는 고밀도 하드디스크 메모리 소자의 정보 저장을 위한 자화 반전에 마이크로파 에너지를 이용하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 수직 이방성 자성 재료의 강자성 공명 특성 분석에 대한 관심이 새로이 증가 하고 있다[9].

현재 나노 두께를 갖는 NiFe 박막 재료는 자기저항 소자에 사용되고 있으며, 적층 재료의 종류 및 적층 구조는 자성 재료의 표면에 형성되는 물질 및 표면 이방성 상수에 영향을 준다. 따라서 자성 박막의 적층 재료 및 적층 구조에 따른 자기 이방성 상수에 대한 분석이 필요하다. Mizukami 등은 NiFe 박막에서 표면 층으로 Cu, Ta, Pd 및 Pt를 사용한 경우의 유효자화량의 변화 및 감쇄 상수를 분석하였으며, 특히 강자성 공명의 선폭 증가는 수직 방향의 표면 이방성 상수로 인한 유효 형상 이방성 자기장의 기울어진 각도에 의한 영향으로 분석하였다[3]. 또한 Nibarger 등은 두께에 따른 NiFe

박막 재료의 표면 이방성 상수 및 g-factor을 측정하였으며, 두께 감소에 따른 g-factor의 감소는 g-factor가 작은 표면 전자들의 궤도 운동에 기인하는 것으로 설명하고 있다[8]. 이렇듯, 자성 박막 재료의 강자성 공명 신호에 대한 연구는 대부분 수직면(out-of-plane) 자기장 방향에서 측정된 결과로부터 유효자화량 변화, 표면 이방성 상수 및 g-factor의 특성 분석 등을 주로 수행하였으며, 수평면(in-plane) 자기장 방향에 따른 강자성 공명 신호의 분석은 미미하였다.

따라서 본 연구에서는 하부 표면층을 MgO를 사용하고, NiFe 두께가 다른 Cu/NiFe(*t*)/MgO/Ta 다층 박막 재료를 제작하였으며, 이들 시편의 수직면 및 수평면 자기장 방향에 따른 강자성 공명 신호를 측정하였다. 이들 측정 결과로부터 NiFe의 포화자화량, 표면 이방성 상수 및 수평면에서의 일축 이방성 특성을 분석하였다.

II. 실험방법

NiFe 박막 재료는 고진공 DC 스퍼터링 챔버에서 Si기판 위에 상온 증착하였다. 이때 하부층으로는 Ta(5 nm)/MgO(2 nm)를 사용하였으며, 시편의 산화를 방지하기 위한 상부층으로 Cu(5 nm)를 증착하였다. 시료의 적층 구조는 Ta/MgO/NiFe(*t*: nm)/Cu로 제작하였다(*t* = 5, 7, 10 및 20). 박막 증착 시 수평면에서 일축 이방성 특성을 유지하기 위하여 100 Oe의 자기장을 인가하였다.

자기장의 세기에 따른 강자성 공명 신호(FMR signal)는 강자성 공명 측정 장치인 Bruker Xerp를 사용하여 9.87 GHz (X-band)의 주파수에서 측정하였다. 박막 재료의 수직면(out-

of-plane) 자기장 방향 및 수평면(in-plane) 자기장 방향에 따른 강자성 공명 신호를 각각 측정하였다. 수직면 방향의 각도 θ_H 는 박막에 수직 방향을 기준으로 수평면 방향으로 기울어진 각도를 나타내며, 수평면 방향의 각도는 박막 증착 시 인가한 자기장의 방향을 기준으로 하였다. 각각의 방향에서 자기장의 세기에 따른 강자성 공명 신호로부터 강자성 공명 자기장인 H_{res} 를 도출하였다.

III. 이론적 고찰

강자성 재료에 마이크로파 에너지를 인가할 경우 자화에 기여하는 스핀들의 자기 에너지가 강자성 공명 조건을 만족하는 상태에서 마이크로파 에너지의 흡수가 최대가 된다. 따라서, 강자성 공명은 재료의 자기 에너지로부터 해석되며, 자성 박막 재료의 자기 에너지(E_T)는 다음과 같이 표현된다.

$$E_T = -HM_s t [\sin\theta_M \sin\theta_H \cos(\phi_M - \phi_H) - \cos\theta_M \cos\theta_H] + 2\pi M_s t \cos^2 \theta_M + K_s \cos^2 \theta_M - K_u t \cos^2 \theta_M \sin^2 \phi_M \quad (1)$$

여기서 H 는 인가 자기장이며, M_s 는 자성 박막 재료의 포화 자화량이고, t 는 자성 재료의 두께이다. K_u 는 수평면에서의 일축 이방성 상수 이고, K_s 는 표면 이방성 상수 이다. θ_M 및 θ_H 는 수평면에서 시편의 제조 시 인가한 자기장 방향으로부터 회전한 자화 및 인가 자기장의 각도이며(수평면 방향), θ_M 및 θ_H 는 수직면에서 수평면 방향으로 회전한 자화 및 인가 자기장의 각도(수직면 방향)이다. 자성 재료의 강자성 공명 조건은 자기 에너지로부터 다음과 같이 구한다[1-3].

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M^2 \sin^2 \theta_M} \left[\left(\frac{\partial^2 E_T}{\partial \theta_M^2}\right) \left(\frac{\partial^2 E_T}{\partial \phi_M^2}\right) - \left(\frac{\partial^2 E_T}{\partial \theta_M \partial \phi_M}\right) \right] \quad (2)$$

여기서 $\gamma = g\mu_B/\hbar$ 는 스핀의 자이로 계수(gyromagnetic factor)이며, g , μ_B , 및 \hbar 는 각각 g-factor, 보아 마그네톤 상수 및 플랑크 상수이다. 또한 ω 는 인가한 마이크로파의 각주파수($\omega = 2\pi f$)이다. 자성 박막 재료의 수평면 자기장 방향(ϕ_H) 및 수직면 자기장 방향(θ_H)에 따른 강자성 공명 자기장(H_{res})를 측정하여 재료의 이방성 자기장, g-factor 및 유효자화량의 특성을 분석하는데 이용한다. 식(2)로부터 수직면 자기장 방향(θ_H)에 대한 강자성 공명 조건은 다음과 같이 표현된다[3, 7].

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = (H_{res} \cos(\theta_H - \theta_M) - 4\pi M_{eff} \cos^2 \theta_M) \times (H_{res} \cos(\theta_H - \theta_M) - 4\pi M_{eff} \cos 2\theta_M) \quad (3)$$

식(3)에서 $\theta_H = 0^\circ$ 와 $\theta_H = 90^\circ$ 에서 이들 각도에 대한 평형 조건인 $\theta_H = \theta_M$ 을 대입하여 다음의 결과를 얻는다.

$$\omega = \gamma \left(H_{res}^{\theta_H=0^\circ} - 4\pi M_{eff} \right) \quad (4)$$

$$\omega = \gamma \sqrt{H_{res}^{\theta_H=90^\circ} \left(H_{res}^{\theta_H=90^\circ} + 4\pi M_{eff} \right)} \quad (5)$$

$\theta_H = 0^\circ$ 및 $\theta_H = 90^\circ$ 에서 측정된 H_{res} 를 식(4) 및 (5)에 대입하여 재료의 고유한 특성인 g-factor와 $4\pi M_{eff}$ 의 값을 각각 구할 수 있다. 한편, 수직면 자기장 방향(ϕ_H)에 따른 강자성 공명조건은 다음과 같이 표현된다[5].

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = (4\pi M_{eff} + H_{res} \cos(\phi_H - \phi_M) + H_{Ku} \cos^2 \phi_M) \times (H_{res} \cos(\phi_H - \phi_M) + H_{Ku} \cos 2\phi_M) \quad (6)$$

자성 박막 재료의 수평면 자기장 방향 따른 H_{res} 를 측정하여 수평면에서의 자기 이방성 자기장(H_{Ku})을 구할 수 있다. 이때 NiFe의 경우 수평면에서의 이방성 자기장은 $4\pi M_{eff}$ 보다 매우 작고, 수직면에서 강자성 공명 자기장도 $4\pi M_{eff}$ 보다 매우 작다. 즉, $4\pi M_{eff} \gg H_{res}$ 및 $4\pi M_{eff} \gg H_{Ku}$ 조건을 만족하는 경우 식(6)은 다음과 같이 간단하게 표현된다[5, 6].

$$H_{res} = \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 \frac{1}{4\pi M_{eff}} - H_{Ku} \cos 2\phi_H \quad (7)$$

수평면 자기장 방향에 따른 H_{res} 는 수평면의 이방성 자기장인 $H_{Ku} \cos 2\phi_H$ 에 비례하므로 각도에 따른 H_{res} 의 변화로부터 H_{Ku} 를 쉽게 구할 수 있음을 보인다.

III. 실험결과 및 분석

1. 수직면 자기장 방향의 H_{res} 분석

자기장의 세기에 따른 강자성 공명 신호는 직류 자기장(H)을 인가하고 미소 교류 자기장(dH_{rf})을 추가로 인가하여 흡수되는 마이크로파의 미소 흡수 전력(dP)을 lock-in 증폭기를 사용하여 측정한다. 따라서 강자성 공명 신호는 흡수되는 마이크로파 전력의 미분 특성(dP/dH)이며, 강자성 공명 조건인 마이크로파의 흡수가 최대가 되는 즉, $dP/dH = 0$ 을 만족하는 자기장을 강자성 공명 자기장인 H_{res} 로 정의한다. 수직면 자기장 방향에 따른 H_{res} 는 식(3)을 만족하며, 식(3)에 포함된 유효자화량(M_{eff})과 자이로 계수(γ)는 수직면 자기장 방향이 $\theta_H = 0^\circ$ 와 $\theta_H = 90^\circ$ 에서 측정된 $H_{res}^{\theta_H=0^\circ}$ 와 $H_{res}^{\theta_H=90^\circ}$ 로부터 식(4)와 (5)를 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서 NiFe의 두께에 따른 유효자화량과 자이로 계수를 도출하기 위하여 수직면 자기장 방향이 $\theta_H = 0^\circ$ 와 $\theta_H = 90^\circ$ 에서 강자성 공명 신호를 각각 측정하였다.

Fig. 1은 두께가 5, 7, 10 및 20 nm인 NiFe 박막 재료의 $\theta_H = 0^\circ$ 와 $\theta_H = 90^\circ$ 에서 측정된 자기장의 세기에 따른 강자성

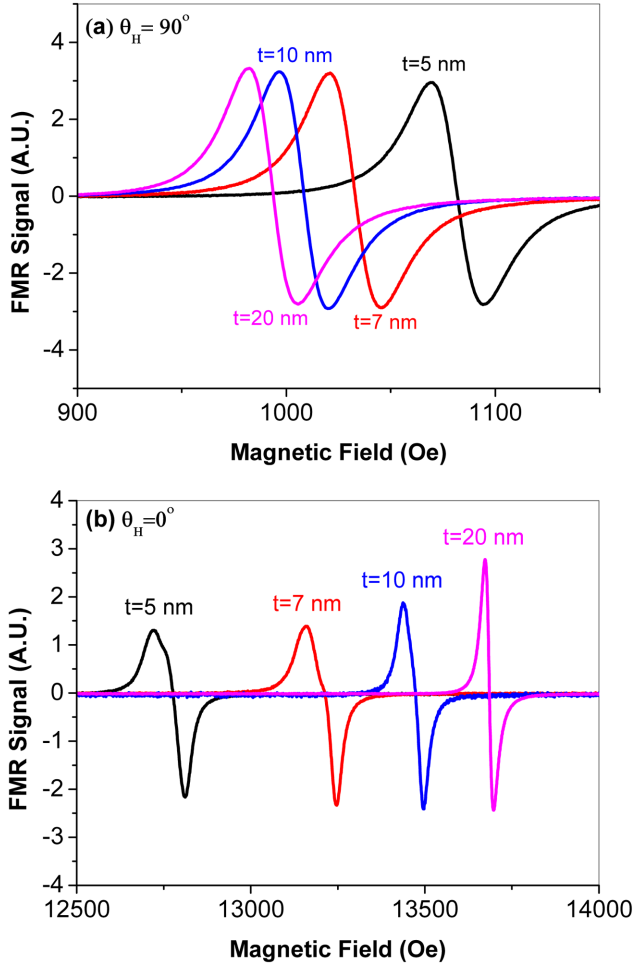


Fig. 1. (Color online) FMR signals of Cu/NiFe(*t*)/MgO/Ta thin films with *t* = 5, 7, 10 and 20 nm at (a) $\theta_H = 90^\circ$ and (b) $\theta_H = 0^\circ$.

Table I. Summary of $H_{res}^{\theta_H=0^\circ}$, $H_{res}^{\theta_H=90^\circ}$, *g*-factor and M_{eff} of Cu/NiFe(*t*)/MgO/Ta thin films with *t* = 5, 7, 10 and 20 nm. The *g*-factor and M_{eff} are calculated from Eq. (4) and (5) using the $H_{res}^{\theta_H=0^\circ}$ and $H_{res}^{\theta_H=90^\circ}$.

NiFe thickness (nm)	$H_{res}^{\theta_H=0^\circ}$ (Oe)	$H_{res}^{\theta_H=90^\circ}$ (Oe)	<i>g</i> -factor	M_{eff} (emu/cc)
5	1081.9	12777.7	2.090	748.7
7	1033.1	13215.1	2.099	784.7
10	1008.4	13473.2	2.101	805.6
20	993.7	13685.0	2.099	822.1

공명 신호를 보여주고 있다. 이들 신호로부터 $H_{res}^{\theta_H=0^\circ}$ 와 $H_{res}^{\theta_H=90^\circ}$ 의 값을 얻었으며, 식(4)와 (5)로부터 *g*-factor와 유효 자화량을 얻었다. 이들 결과는 Table I에서 보여준 것과 같다.

Table I의 *g*-factor와 M_{eff} 를 식(3)에 대입하여 *t* = 20 nm인 재료의 수직면 자기장 방향에 따른 H_{res} 를 계산하였다. 이때 수직면 자화 방향(θ_M)은 식(1)의 자기 에너지가 평행을 유지

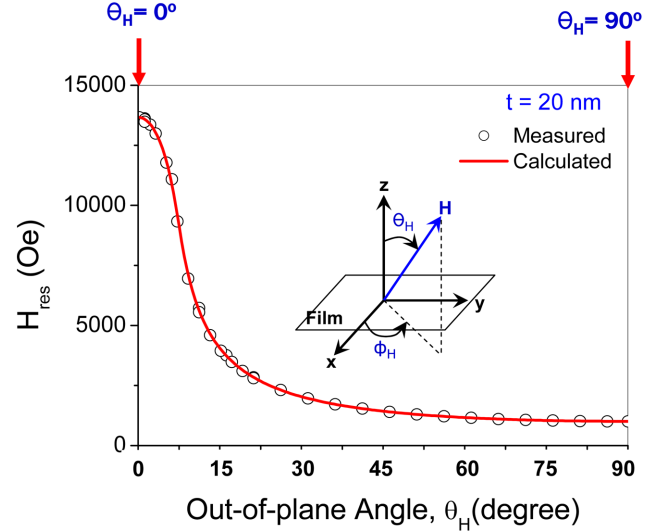


Fig. 2. (Color online) Out-of-plane angular dependence of H_{res} for *t* = 20 nm sample. The solid line is calculated by Eq. (3).

하는 조건인 $\partial E_T / \partial \theta_M = 0$ 으로부터 구하였으며, 자기장의 세기에 따른 θ_M 이 식(3)의 강자성 공명 조건을 만족하는 자기장으로부터 H_{res} 를 얻었다. Fig. 2에서 보인 것과 같이 수직면 자기장 방향에 따른 H_{res} 의 계산 결과는 측정 결과와 일치하고 있으며, 식(1)의 자기 에너지가 식(2)의 강자성 공명 특성을 해석하는데 기본이 됨을 보여주고 있다.

또한, Table I에서 NiFe 박막의 두께에 따른 *g*-factor은 측정 오차 범위 안에서 거의 동일한 값을 나타낸다. 그러나, $4\pi M_{eff}$ 는 두께가 감소함에 따라서 급격하게 감소하는 특성을 보이고 있다. 이러한 감소 특성은 NiFe의 표면 이방성 상수 (K_s)에 기인하며 식(1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$4\pi M_{eff} = 4\pi M_s + \frac{2K_s}{M_s t} + \frac{2K_u}{M_s} \quad (8)$$

두께에 따른 강자성 공명 신호로부터 도출한 $4\pi M_{eff}$ 를 식(8)에 적용하면 NiFe 박막의 포화 자화량(M_s)과 표면 이방성 상수(K_s)를 구할 수 있다. NiFe의 경우 수평면의 일축 이방성 자기장($H_{Ku} = 2K_u/M_s$)은 약 5-6 Oe로 표면 이방성 상수에 의한 $2K_s/tM_s$ 에 비하여 매우 작다. 따라서 식(8)의 오른쪽 두번째 항을 무시하고 두께에 따른 변화로 변경하면 M_{eff} 는 다음과 같이 표현된다.

$$M_{eff} t = M_s t + \frac{K_s}{2\pi M_s} \quad (9)$$

NiFe 박막의 두께에 따른 $M_{eff} t$ 의 기울기로부터 NiFe의 포화 자화량(M_s)를 얻을 수 있으며, 절편으로부터 K_s 를 구할 수 있다. Fig. 3은 두께에 따른 $M_{eff} t$ 값의 변화 특성을 보여주고 있다.

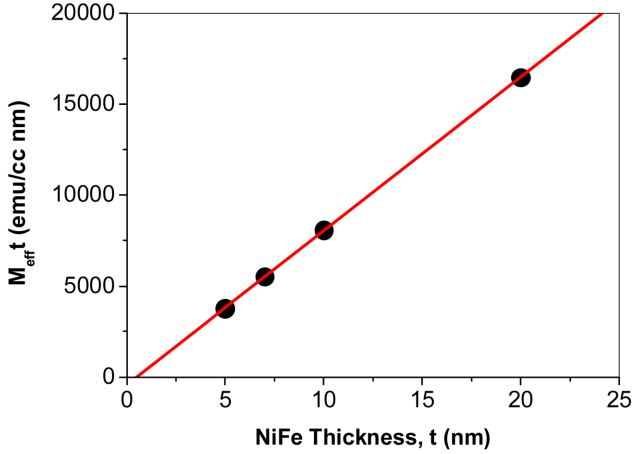


Fig. 3. (Color online) NiFe thickness dependence of M_{eff} . The solid line is least square fitted result.

NiFe 박막의 M_{eff} 는 두께에 따라서 선형적인 증가 특성을 보이고 있으므로 기울기로부터 NiFe 박막의 포화 자화량(M_s)이 844.7 emu/cc임을 알 수 있었으며, 그래프의 절편 값으로부터 표면 이방성 상수(K_s)는 -0.237 erg/cm^2 임을 얻을 수 있었다. NiFe 박막의 표면에 형성된 표면 이방성 상수는 음의 값을 보이며, 이는 박막의 수직 방향으로 작용하는 이방성 특성임을 의미한다.

2. 수평면 자기장 방향의 H_{res} 측정

수평면 자기장 방향에 따른 H_{res} 의 변화로부터 수평면에서의 이방성 에너지 특성을 분석 할 수 있다. Fig. 4는 두께가 20 nm인 시편의 수평면 자기장 방향에 따른 H_{res} 변화 특성을 보여주고 있으며, NiFe 박막은 일축 이방성 특성을 보임을 알 수 있었다. 수평면 자기장 방향의 H_{res} 를 계산하기 위

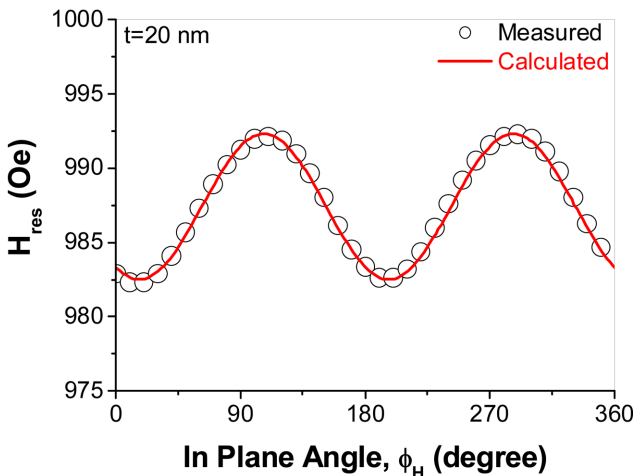


Fig. 4. (Color online) In-plane angular dependence of H_{res} for $t = 20 \text{ nm}$ sample. The solid line is calculated by Eq. (6).

하여 식(6)을 사용하였으며, g-factor과 M_{eff} 에 대한 상수들은 Table I의 값을 이용하였다. 또한, 일축 이방성 특성의 자화 용이축에 대한 보정을 위하여 식(1)에 기술한 일축 이방성 에너지를 다음과 같이 수정하였다.

$$E_{Ku} = K_u \cos^2 \theta \sin^2 (\phi_M - \phi_0) \quad (10)$$

여기서 ϕ_0 는 자화 용이축의 방향을 나타내며, NiFe의 두께가 20 nm인 경우 $\phi_0 = 17^\circ$ 였다. 식(6)을 이용하여 수평면 자기장 방향에 따른 H_{res} 를 계산한 결과 $t = 20 \text{ nm}$ 인 재료의 일축 이방성 자기장은 $H_{Ku} = 5.1 \text{ Oe}$ 임을 알 수 있었다. 한편, 식(7)을 이용하여 수평면 자기장 방향에 따른 H_{res} 를 계산한 결과 측정값과 약 100 Oe의 차이가 있었다. 이러한 오차는 식(7)을 유도하기 위하여 가정한 $4\pi M_{eff} \gg H_{res}$ 조건에서 비롯되며, 이들 조건이 약 10%의 오차를 내포하고 있었다. 따라서 식(7)을 이용한 H_{res} 의 계산 값이 측정값과 약 10% 오차인 100 Oe의 차이가 생긴 것을 알 수 있었다. 이러한 오차는 NiFe의 일축이방성 보다 매우 크므로 식(7)을 NiFe 박막의 수평면 자기장 방향에 따른 H_{res} 의 계산에 적용할 경우 약 10%의 오차가 날 수 있음을 감안하여야 한다.

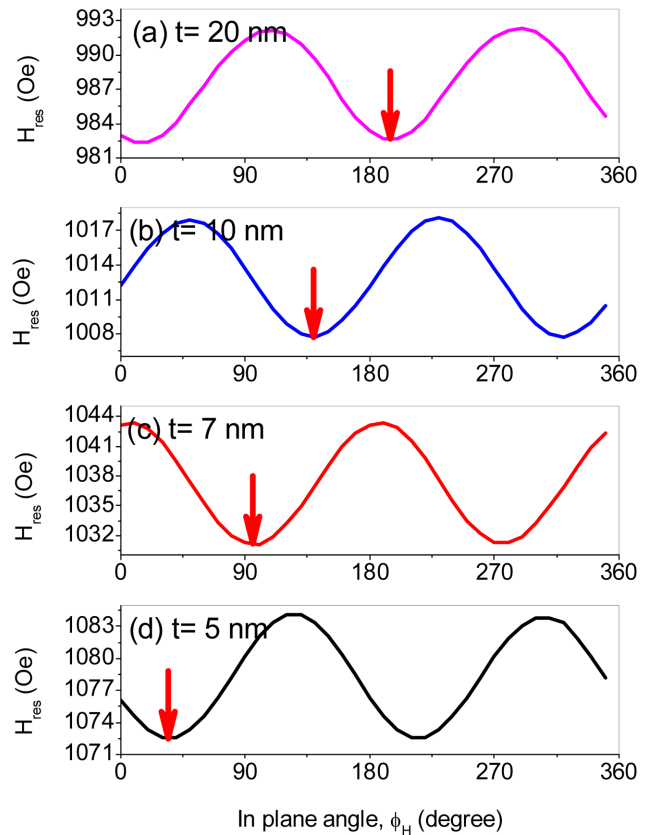


Fig. 5. (Color online) In-plane angular dependence of H_{res} for (a) $t = 20 \text{ nm}$, (b) $t = 10 \text{ nm}$, (c) $t = 7 \text{ nm}$ and $t = 5 \text{ nm}$ samples, respectively. The solid sorrows indicate the angle of easy axis (ϕ_0).

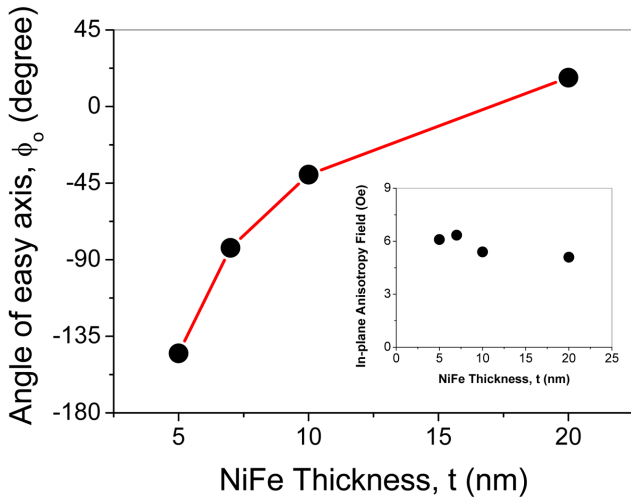


Fig. 6. (Color online) NiFe thickness dependence of easy axis angle (ϕ_0). The insert figure shows NiFe thickness dependence of H_{Ku} .

Fig. 5는 두께가 5, 7, 10 및 20 nm인 NiFe 박막 재료의 수평면 자기장 방향에 따른 H_{res} 의 변화 특성을 보인다. NiFe의 두께가 감소하더라도 일축 이방성 특성은 그대로 유지되고 있으나, Fig. 5에서 화살표로 표시한 일축 이방성 에너지의 자화 용이축은 두께가 감소함에 따라서 감소하는 경향을 보여 주고 있다.

Fig. 6은 NiFe의 두께에 따른 자화 용이축의 각도 변화를 보여 주고 있다. 식(10)에서 보인 자화 용이축의 각도 ϕ_0 는 두께가 20 nm인 경우 17°에서 두께가 5 nm인 경우 -140°까지 두께에 따라서 자화 용이축이 순차적으로 회전하는 것을 볼 수 있다. 즉, $t = 20$ nm에서는 자화 용이축이 시편 제조 시 인가한 자기장의 방향과 거의 동일한 방향을 유지하고 있으나, 두께가 감소함에 따라 시편 제조 시 인가한 자기장의 반대방향으로 자화 용이축이 회전하는 것을 알 수 있었다. 이러한 변화는 인가 자기장의 반대 방향으로 자화 방향을 회전시키는 특성을 갖는 반강자성층의 형성과 관련 지을 수 있으며, 표면에서 형성된 반강자성 재료인 NiFeO가 NiFe의 자화 용이축을 회전시킨 것으로 볼 수 있다[10, 11]. 본 연구에서 제조한 시편은 MgO 위에 NiFe를 증착하였으므로 MgO-NiFe의 계면에서는 반강자성층인 NiFeO층이 형성될 수 있다. 그러나 MgO의 두께가 얇아 형성된 NiFeO층은 반강자성층의 임계 두께 이하로 형성되어 교환 결합력 특성은 보이지 않고 있다. 그러나, 표면에 형성된 NiFeO층으로 인하여 두께가 감소하면서 반강자성 특성이 현저하게 나타나 자화 용이축의 회전 각도를 증가시켰음을 알 수 있다. 또한 표면에서 형성된 반강자성층은 일축 이방성 자기장을 증가시키는 경향이 있으며, Fig. 6의 삽입 그림에서 보인 것과 같이 일축이방성 자기장이 두께가 감소함에 따라 미약하나마 증가하고 있

음을 보여 주고 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 두께에 따른 NiFe 박막 시편을 제조하여 수직면 자기장 방향과 수평면 자기장 방향에 따른 강자성 공명 자기장을 측정하였다. 수직면 자기장 방향의 강자성 공명 자기장으로부터 g-factor과 유효자화량을 도출하였다. NiFe 박막의 g-factor은 두께에 무관하게 거의 일정한 값을 보였으나, 유효자화량은 두께에 따라서 현저하게 감소하였다. 이러한 감소는 표면의 수직 이방성 상수에 기인하였으며, 표면 이방성 상수는 -0.23 erg/cm^2 임을 강자성 공명 측정 결과로부터 도출하였다. 또한 수평면 자기장 방향에 따른 H_{res} 측정 결과로부터 수평 방향의 일축 이방성 자기장을 도출하였으며, $t = 20$ nm인 시편의 경우 $H_{Ku} = 5.1 \text{ Oe}$ 의 값을 보였다. 한편, 일축 이방성 에너지의 자화 용이축이 두께가 감소함에 따라 시편 제조 시 인가한 자기장의 반대 방향으로 회전하고 있음을 확인하였으며, 이러한 현상은 시편 표면에 형성된 NiFeO의 반강자성 특성에 의한 것으로 설명하였다.

본 연구 결과로부터 20 nm 이하의 NiFe 박막은 표면에 수직 방향의 표면 이방성 상수에 의하여 유효자화량을 감소시키며, 표면에 형성된 반강자성 특성을 갖는 NiFeO층에 의하여 수평면에서 일축 이방성 에너지의 자화 용이축을 회전시킬 수 있음을 보였다. 따라서 20 nm 이하의 NiFe 재료를 이용하여 자기 센서 또는 자기 저항 소자에 응용하고자 할 경우 센서의 성능 및 자기저항 소자의 출력 신호에 영향을 주는 자화 용이축의 방향을 반드시 검증하여야 한다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] W. Platow, A. N. Anisimov, G. L. Dunifer, M. Farle, and K. Baberschke, Phys. Rev. B **58**, 5611 (1998).
- [2] S. J. Yuan, L. Sun, H. Sang, J. Du, and S. M. Zhou, Phys. Rev. B **68**, 134443 (2003).
- [3] S. Misukami, Y. Ando, and T. Miyazaki, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 580 (2001).
- [4] M. Oogane, T. Wakitani, S. Yakata, R. Yilgin, Y. Ando, A. Sakuma, and T. Miyazaki, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 3889 (2006).
- [5] S. Yuan, K. Yu, L. M. Yu, S. X. Cao, C. Jing, and J. C. Zhang, J. Appl. Phys. **101**, 113915 (2007).
- [6] S. Yuan, B. Kang, L. Yu, S. Cao, and X. Zhao, J. Appl. Phys.

- 105**, 063902 (2009).
- [7] S. Yuan, L. Wang, R. Shan, and S. M. Zhou, *Appl. Phys. A* **79**, 701 (2004).
- [8] J. P. Nibarger, R. Lopusnik, Z. Celinsk, and T. J. Silva, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 93 (2003).
- [9] C. Nistor, K. Sun, Z. Wang, M. Wu, C. Mathieu, and M. Hadley, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 012504 (2009).
- [10] C. H. Laia, C. P. Wang, and C. Qian, *J. Appl. Phys.* **85**, 6115 (1999).
- [11] C. H. Laia, W. C. Lien, and R. L. White, *J. Appl. Phys.*, **89**, 1302 (2001).

Thickness Dependence of Ferromagnetic Resonance Properties in NiFe Thin Films

Dong Young Kim and Seok Soo Yoon*

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

(Received 6 February 2013, Received in final form 22 February 2013, Accepted 28 February 2013)

The out-of-plane and in-plane angular dependence of ferromagnetic resonance field was measured in NiFe thin films fabricated by magnetron sputtering. The effective magnetization was obtained from the out-of-plane angular dependence of ferromagnetic resonance field, which was well agreed with calculated one. The decrease of effective magnetization with NiFe thickness was due to the surface anisotropy constant of $K_s = -0.23 \text{ erg/cm}^2$. The in-plane uniaxial anisotropy fields were obtained from the in-plane angular dependence of ferromagnetic resonance field. The easy axis of in-plane uniaxial anisotropy field was rotated to the reverse direction of applied magnetic field during sample fabrication, which was explained by the antiferromagnetic NiFeO layer at sample surface.

Keywords : ferromagnetic resonance, effective magnetization, surface anisotropy, uniaxial anisotropy