

Angular Dependence of Ferromagnetic Resonance in NiFe/Pt Thin Film

Hyeokjae Yang, Seonghoon Jeong, and Sunjae Chung*

Department of Physics Education, Korea National University of Education, Cheongju 28173, Republic of Korea

Taiwoon Eom and Seulgi Koo

RNDWARE Co., Ltd., Daejeon 34133, Republic of Korea

Sanghoon Lee

Department of Physics, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

(Received 31 January 2025, Received in final form 12 February 2025, Accepted 12 February 2025)

In this study, we investigated the ferromagnetic resonance (FMR) characteristics of NiFe/Pt thin films. In particular, we analyzed the angular dependence of the FMR signal by varying the direction of the applied magnetic field. To facilitate these measurements, we developed a coplanar waveguide (CPW) designed FMR experiments and fabricated it to be compatible with a cryogenic system. Using this setup, we conducted FMR measurements on NiFe/Pt samples while rotating the magnetic field out of the plane. We observed the changes in the resonance field (H_{res}) and the line width (ΔH_{pp}) of peak-to-peak between the maximum and minimum values of the FMR signal as a function of the field direction. From these measurements, we extracted the effective magnetization ($4\pi M_{eff}$) and the magnetic damping coefficient (α). This study is significant in that it establishes an experimental setup for investigating the angular dependence of FMR and contributes to the development of equipment for studying magnetic anisotropy using this setup.

Keywords : ferromagnetic resonance, effective magnetization, magnetic damping

NiFe/Pt 박막의 강자성 공명 현상의 각도 의존성 측정

양혁재 · 정성훈 · 정선재*

한국교원대학교 물리교육과, 충북 청주시 흥덕구 태성탑연로 250, 28173

엄태운 · 구슬기

(주) 알앤디웨어, 대전시 유성구 과학로 169-148, 34133

이상훈

고려대학교 물리학과, 서울시 안암로 145, 02841

(2025년 1월 31일 받음, 2025년 2월 12일 최종수정본 받음, 2025년 2월 12일 게재확정)

본 연구에서 연구진은 NiFe/Pt 박막의 강자성 공명 특성을 측정하였다. 특히 자기장의 인가 방향을 회전시키면서, 강자성 공명 신호가 각도 변화에 따른 변화 추이를 분석하였다. 이러한 연구를 위해서 강자성 공명용 동일면 도파관(coplanar waveguide; CPW)을 개발하였으며, 이 도파관을 극저온 장치에 넣을 수 있도록 제작하였다. 이 장비를 이용하여 NiFe/Pt 시료의 강자성 공명 측정을 평면 외 방향으로 자기장을 회전시키며 수행하였으며, 이에 따라서 공명 자기장(H_{res})과 강자성 공명 신호의 최대-최소값 사이 폭(ΔH_{pp})의 변화가 어떻게 변하는 지도 관찰하였다. 이 결과를 분석하여 유효 자화값($4\pi M_{eff}$) 및 자기 감쇠 계수(α)를 얻을 수 있었다. 본 연구는 강자성 공명의 각도 의존성을 연구할 수 있는 장비의 셋업 및 이 셋업을 이용한 비등방성 자성 연구를 위한 장비를 개발한데 그 의미가 있다.

주제어 : 강자성 공명, 유효자화량, 자기감쇠 계수

I. 서 론

자화 동역학은 스핀트로닉스 분야의 핵심 연구 분야 중 하나로, 다양한 환경에서의 자기 특성 제어 및 예측에 필수적이다. 강자성 공명(FMR)은 자화 동역학 연구에 가장 널리 사용되는 실험 기법의 하나이다[1,2]. 공명 현상은 일상생활에서 흔히 발생하며, 자기 분야에서도 이러한 원리를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 강자성 물질 내의 자기 모멘트는 외부 자기장이 자기 모멘트 방향과 일치하지 않을 때, 외부 자기장을 회전축으로 특정 주파수로 세차 운동을 한다. 이때, 외부 자기장의 주파수와 자기 모멘트의 고유 진동수가 일치하면 공명 현상이 발생하는데, 이를 강자성 공명이라고 한다. 강자성 공명 측정은 강자성 재료의 물리적 특성, 즉 동역학적 특성 및 응용 가능성을 포괄적으로 이해하는 데 필수적이며, 현대 자기학 및 스핀트로닉스 연구 개발의 핵심 연구 기술이다. 특히, 강자성 공명 측정을 통해 자기이방성, 교환 상호 작용, 외부 자기장을 포함한 유효 자기장의 크기 및 방향을 평가할 수 있으며, 길버트 감쇠 상수 분석을 통해 스핀 에너지 손실 메커니즘을 규명할 수 있다. 이러한 감쇠 상수는 스핀트로닉스 소자의 스위칭 속도 및 에너지 효율에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한, 강자성 공명 현상은 스핀과 기반 소자의 설계 및 최적화를 위한 중요한 정보를 제공한다. 결론적으로, 강자성 공명 측정은 강자성 재료의 특성을 종합적으로 이해하는 데 필수적이다.

강자성체는 인접한 물질에 따라 유효 자화 및 감쇠 계수가 민감하게 변할 수 있으며, 이는 인접한 물질들의 간의 스핀 전달 현상으로 설명할 수 있다. 이러한 변화를 직접 측정하는 역 스핀 홀 효과 연구 또한 활발히 진행되고 있다[3-5]. 하지만 강자성 공명(FMR) 측정은 역 스핀 홀 효과 측정 방법이 쉬울 뿐만 아니라, 다양한 스핀파 현상 및 마그논의 고유 모드 연구에 유리한 장점을 제공한다. 본 연구에서는 극저온 장치 기반에 RNDWARE에서 제작한 FMR 측정용 프로브를 사용하여, 다양한 온도(4~300 K) 및 각도(0~360°)에서 측정이 가능한 시스템을 구축하였다. 이를 활용하여 NiFe/Pt 이중층 구조의 자화 동역학적 특성을 분석하였으며, 특히 자기장 방향에 따른 강자성 공명 현상을 연구하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서 사용된 NiFe/Pt 이중 박막 구조는 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 방법을 이용하여 준비되었다. 스퍼터링 챔버 내부의 압력은 2×10^{-8} Torr 이하였으며, Ar 가스에 의한 내부 압력을 5 mTorr로 모든 증착 물질에 대해 유지하여, 고품질의 박막을 증착할 수 있었다. 이런 상태에서

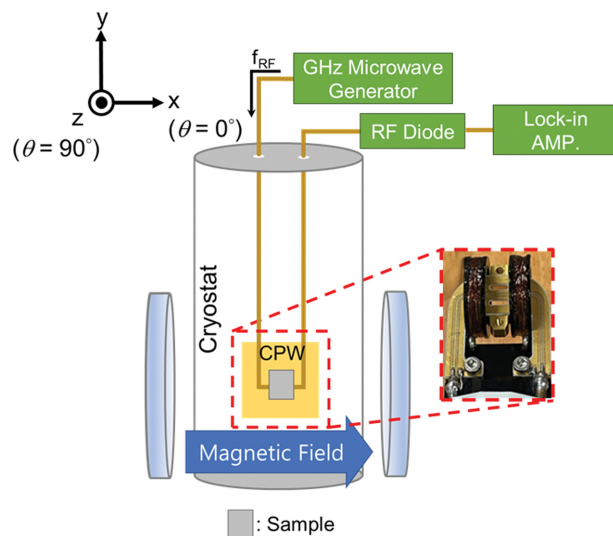


Fig. 1. (Color online) Schematic of ferromagnetic resonance measurement system using a coplanar waveguide (CPW).

NiFe 10 nm, Pt 5 nm 두께를 순서대로 증착하였다. 이렇게 만든 시료를 3 mm × 3 mm의 크기로 자른 다음, Fig. 1에 사진에 보이는 것처럼, 코일 사이의 동일면 도파관(coplanar waveguide; CPW) 위에 놓았으며, 시료가 측정 도중에 떨어지지 않도록 캡톤 테이프를 이용하여 고정하였다. 그 다음 시료가 부착되어 있는 강자성 공명 프루브를 극저온 냉동기가 설치되어 있는 장비에 넣고 고정한 후, Fig. 1에서 보이는 것처럼, 신호 입력부에는 Anritsu사의 MG3692C 신호 발생기를 연결하였으며, 출력부에는 RF 다이오드 및 락인(Lock-in) 앰프를 연결하였다. 강자성 공명 실험을 진행하는 동안 신호 발생기에서는 20 dbm의 일정한 파워의 마이크로파가 Fig. 1에 서처럼 입력부를 통해서 CPW로 입력되었으며, 입력된 신호는 시료가 공명 조건에서 마이크로파를 잘 흡수할 수 있도록 하였다. Fig. 1에 보이는 것처럼 시료의 평면과 평행한 방향을 $\theta = 0^\circ$ (x 방향)으로 정의하고, xy 평면상에서 자기장을 0~360° 사이에서 특정 각도로 자기장을 인가하면서, 강자성 공명 실험을 진행하였다[6-9].

III. 결과 및 고찰

이렇게 측정한 실험 결과 중 자기장의 방향이 x축과 평행한 $\theta = 0^\circ$ 경우가 Fig. 2에 나와 있다. RF 다이오드 기반의 강자성 공명 측정의 일반적인 신호인 로렌지안(Lorentzian) 함수의 미분형 형태의 신호가 각 입력 주파수(f_{RF})에 대해서 나와 있다. 입력 주파수의 증가와 함께 공명 자기장(H_{res})이 증가하면서, 강자성 공명의 폭(ΔH)이 점점 넓어지는 것을 볼 수 있다.

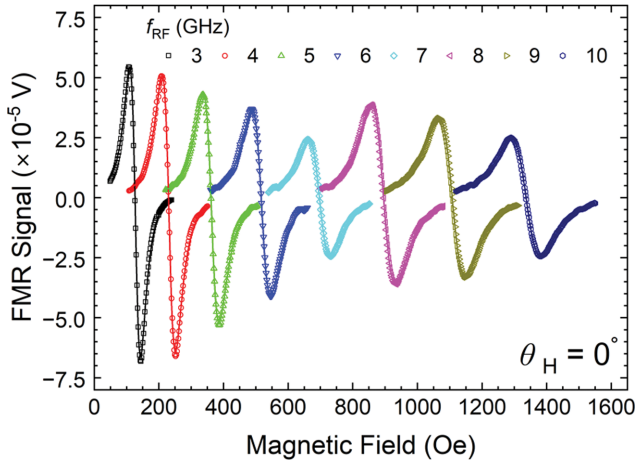


Fig. 2. (a) (Color online) FMR spectra from NiFe/Pt films in angle = 0° using f_{RF} = 3~10 GHz. Colored lines show fitting results using Eq. (1).

$$V_{FMR}(H) = V_{sym} \frac{(\Delta H)^2}{4(H - H_{res})^2 + (\Delta H)^2} + V_{asym} \frac{4\Delta H(H - H_{res})}{4(H - H_{res})^2 + (\Delta H)^2} + V_{offset} \quad (1)$$

위의 식(1)로 비선형 회귀 분석을 하면 H_{res} 과 ΔH 를 얻을 수 있다. 측정 중 신호가 H_{res} 을 중심으로 비대칭 로렌지안 함수 형태가 나타나기 때문에, 대칭 계수 V_{sym} 와 비대칭 계수 V_{asym} 를 고려하였으며, 간혹 오프셋 전압이 RF 다이오드에 의해서 락인 앰프로 측정되기에 V_{offset} 를 고려하였다. 이렇게 구한 ΔH 는 Fig. 3에 나타나 있는 신호의 최대-최소간의 진폭인

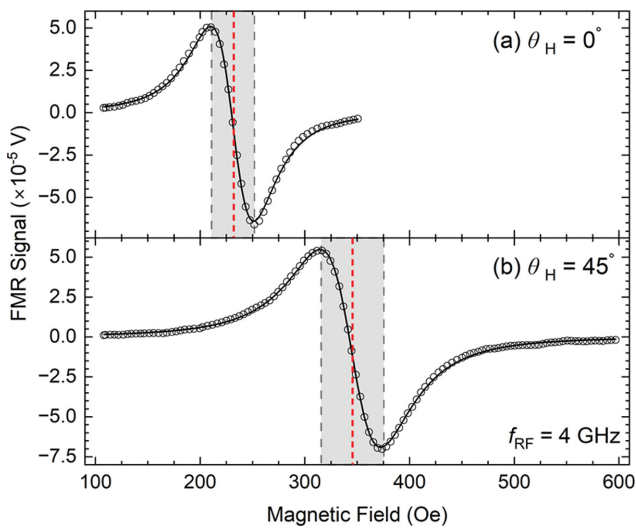


Fig. 3. (Color online) FMR spectra obtained at 4 GHz at (a) $\theta = 0^\circ$ and (b) $\theta = 45^\circ$. The red dashed lines indicate the resonance magnetic fields (H_{res}) for each experimental result, while the gray areas represent the linewidth of peak-to-peak ΔH_{PP} of FMR signal.

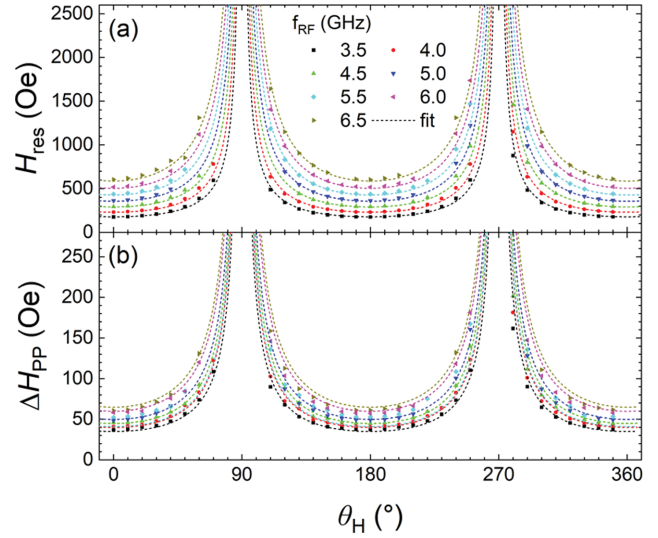


Fig. 4. (Color online) The angular dependence of (a) the resonance field (H_{res}), and (b) the linewidth of peak-to-peak (ΔH_{PP}) of FMR signals.

ΔH_{PP} 와 $\Delta H_{PP} = \Delta H / \sqrt{3}$ 의 관계가 있다. 이를 이용하여 각 비선형 회귀 분석에서 ΔH_{PP} 를 계산할 수 있었다.

Fig. 3(a)와 (b)는 각각 $\theta_H = 0^\circ$ 와 $\theta_H = 45^\circ$ 에서 4 GHz의 마이크로파를 입력하면서 측정한 강자성 공명 실험 결과가 비교되어 있다. 빨간색 점선은 H_{res} 을 나타내며, 회색으로 칠한 부분은 강자성 공명 신호의 ΔH_{PP} 에 해당하는 부분을 나타낸다. 이를 통해 자기장 인가 방향에 따라서, H_{res} 과 ΔH_{PP} 이 변하는 것을 볼 수 있었다. 이렇게 자기장 인가 방향에 대한 결과들을 모아서 각 조건에 따른 H_{res} 와 ΔH_{PP} 를 얻을 수 있다[6-8]. 이렇게 시료에 인가 자기장을 바꿔 가면서 얻은 모든 실험 결과가 Fig. 4에 정리되어 있다. 우선, Fig. 4(a)와 (b) 결과를 분석하기 위해서 NiFe/Pt 박막의 자유 에너지 밀도라고 불리는 자기 에너지 E 를 써보면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E = & -M_S H [\cos \theta_H \cos \theta_M \cos(\phi_H - \phi_M) + \sin \theta_H \sin \theta_M] \\ & + K_{||} \cos^2 \theta_M - 2\pi M_S^2 \cos^2 \theta_M \\ = & -M_S H [\cos \theta_H \cos \theta_M \cos(\phi_H - \phi_M) + \sin \theta_H \sin \theta_M] \\ & - \frac{M_S (4\pi M_{eff})}{2} \cos^2 \theta_M \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 M_S 는 포화자화, θ_H 와 θ_M 은 xz 평면상에서 자기장과 자화의 방향, ϕ_H 와 ϕ_M 은 xy 평면상에서 자기장과 자화의 방향, 그리고 $K_{||}$ 는 수평 방향 자기이방성 에너지 밀도이다. 그리고, $4\pi M_S - 2K_{||}/M_S = 4\pi M_{eff}$ 로 치환하였다. 이 식을 공명 진동수 f_c 에 대한 다음 식(3)에 넣고 미분을 하면 강자성 공명에 대한 식을 얻을 수 있다[10,11].

$$E = -M_S H [\cos \theta_H \cos \theta_M \cos(\phi_H - \phi_M) + \sin \theta_H \sin \theta_M] - \frac{M_S(4\pi M_{eff})}{2} \cos^2 \theta_M$$

$$f_r^2 = \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{M_S^2 \sin^2 \theta_M} \left[\frac{\partial^2 E}{\partial \theta_M^2} - \left(\frac{\partial^2 E}{\partial \theta_M \partial \phi_M} \right)^2 \right] \quad (3)$$

본 연구에서처럼 xz 평면상에서 자기장 방향의 회전에 대한 강자성 공명 식을 구하기 위해서 식(2)을 (3)에 대입하여 계산을 한다. 본 연구에서 다루는 시료는 평면상에서 자기이방성이 없으므로, 편의상 $\phi_H = \phi_M = 0^\circ$ 를 넣으면 다음과 같은 공명 진동수 f_r 에 대한 식을 구할 수 있다.

$$f_r = \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right) \sqrt{H \cos(\theta_M - \theta_H) + 4\pi M_{eff} \cos 2\theta_M} \times \sqrt{H \cos(\theta_M - \theta_H) - 4\pi M_{eff} \sin^2 \theta_M} \quad (4)$$

앞에서 언급한 식(2)를 이용하여, 실제 실험에서 이용한 자기장의 각도 θ_H 와 실험에서 측정한 공명 자기장의 H_{res} 의 범위에서 평면 외 방향으로 기울어진 정도인 θ_M 을 구해보면 $\theta_M < 5^\circ$ 로 아주 작은 각도만 변하기 때문에, 식(4)를 Fig. 5의 각도 의존성 데이터 분석을 위해 편의상 $\theta_M \approx 0^\circ$ 로 근사해서 식(4)를 다시 풀면 다음과 같다.

$$f_r = \left(\frac{\gamma}{2\pi}\right) \sqrt{H \cos \theta_H + 4\pi M_{eff}} \sqrt{H \cos \theta_H} \quad (5)$$

이 식을 갖고 fitting 한 실험 결과가 Fig. 4(a)에 나와 있다. 여기서 $\gamma/2\pi = 0.0028$ GHz/Oe를 사용하였으며, 위의 식을 $H (= H_{res})$ 에 대해 정리한 다음 비선형 회귀 분석을 하였다. 이때 얻은 값은 $4\pi M_{eff} = 8,598$ Oe이다.

다음으로 자기장 방향에 따른 ΔH_{pp} 를 분석하기 위해서 다음과 같은 계산을 하였다. 이전 연구 결과들에서처럼 ΔH_{pp} 는 다음과 같이 표현된다[10,11].

$$\Delta H_{pp} = \Delta H(\alpha) + \Delta H(\Delta 4\pi M_{eff}) + \Delta H(\Delta \theta_H)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} \alpha (H_1 + H_2) \left[\frac{\gamma/2\pi}{\left| \frac{\partial f}{\partial H_{res}} \right|} + \left| \frac{dH_{res}}{d(4\pi M_{eff})} \right| \Delta(4\pi M_{eff}) \right] + \left| \frac{dH_{res}}{d\theta_H} \right| \Delta \theta_H \quad (6)$$

여기서 H_1 와 H_2 는 다음과 같다. 각각 $H_1 = H_{res} \cos(\theta_M - \theta_H) + 4\pi M_{eff} \cos 2\theta_M$, $H_2 = H_{res} \cos(\theta_M - \theta_H) - 4\pi M_{eff} \sin^2 \theta_M$ 이다. H_1 과 H_2 를 넣고 계산한 후, 앞에서와 같이 조건으로 $\theta_M = 0^\circ$ 로 문제를 풀면 다음과 같은 위의 식에서 첫 번째 항만 남게 된다.

$$\Delta H_{pp} = \frac{2\alpha \sqrt{H_{res} \cos \theta_H + 4\pi M_{eff}} \sqrt{H_{res} \cos \theta_H}}{\sqrt{3} \cos \theta_H} \quad (7)$$

식(7)을 이용하여 비선형 회귀 분석을 한 결과가 Fig. 4(b)에 나와 있다. M_{eff} 는 Fig. 4(a)에서 얻은 결과인 $4\pi M_{eff} = 8,598$ Oe를 사용하였으며, 이때 얻은 분석 결과는 $\alpha = 0.02417$ 로 Pt에 의해서 NiFe의 일반적인 $\alpha = 0.007 - 0.010$ 값에 비해서 3~4배 정도 증가된 것을 볼 수 있었다. 이처럼 강자성 공명의 자기장 인가 방향에 대한 측정으로 M_{eff} 와 α 를 얻을 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 상온에서, 0~360°의 각도에서 강자성 공명 측정 실험을 실행하기 위한 장비를 구축하였고, 이를 이용하여 NiFe/Pt 이층 구조의 평면 외 각도에 따른 물성 특성에 대해 비교하였다. NiFe/Pt 시료는 수평 자기 이방성을 갖는 것으로 알려져 있다. 자기장 방향에 대한 실험으로부터 ΔH_{res} 와 ΔH_{pp} 이 시료의 자화 용이축에서 최소값을 갖는 것을 볼 수 있었으며, 이 데이터의 분석을 통해서 M_{eff} 와 α 를 얻을 수 있었다. 이러한 접근법은 시료가 비등방적인 자성 특성을 갖고 있을 때, 각 방향에 대한 자기 이방성 특성을 계산하는데 도움이 될 것으로 예상된다.

References

- [1] C. Kittel, Phys. Rev. **73**, 155 (1948).
- [2] J. H. E. Griffiths, Nature. **158**, 670 (1946).
- [3] E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, Appl. Phys. Lett. **88**, 182509 (2006).
- [4] K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, Y. Kajiwara, H. Nakayama, T. Yoshino, K. Harii, Y. Fujikawa, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, J. Appl. Phys. **109**, 103913 (2011).
- [5] H. Y. Inoue, K. Harii, K. Ando, K. Sasage, and E. Saitoh, J. Appl. Phys. **102**, 083915 (2007).
- [6] S. Kim, Y. Kim, and S. Chung, J. Korean Magn. Soc. **33**, 127 (2023).
- [7] Y. Kim, S. Kim, S. Chung, J. Åkerman, and S. Lee, J. Korean Magn. Soc. **33**, 44 (2023).
- [8] S. Chung, S. Jiang, J. Åkerman, and S. Lee, J. Korean Magn. Soc. **32**, 27 (2022).
- [9] S. S. Yoon and D. Y. Kim, J. Korean Magn. Soc. **31**, 53 (2021).
- [10] J.-M. Beaujour, D. Ravelosona, I. Tudosa, E. E. Fullerton, and A. D. Kent, Phys. Rev. B **80**, 180415 (2009).
- [11] B. Samantaray, A. K. Singh, A. Perumal, R. Ranganathan, and P. Mandal, AIP Adv. **5**, 067157 (2015).