

Effect of DC Sputtering Power on the Magnetization Dynamics of NiFe Thin Films

Hyeokjae Yang and Sunjae Chung*

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

Sanghoon Lee

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

(Received 19 January 2026, Received in final form 25 January 2026, Accepted 26 January 2026)

In this study, we systematically investigated the effect of DC magnetron sputtering power on the magnetization dynamics of ferromagnetic NiFe thin films. The NiFe films were deposited by varying the sputtering power from 18 to 225 W, and their magnetic properties were characterized by using ferromagnetic resonance (FMR) measurements to obtain the Gilbert damping constant (α) and effective magnetization ($4\pi M_{eff}$). We observed that as the sputtering power increased, the effective magnetization significantly increased from 0.3 to 0.68 T. Also, both the Gilbert damping constant (α) and the inhomogeneous linewidth broadening (ΔH_0) showed a rapid decrease. These results demonstrate that controlling the sputtering power is a critical factor in optimizing the characteristics of magnetic thin films.

Keywords : ferromagnetic resonance, sputtering power, magnetization dynamics, Gilbert damping

DC 스퍼터링 파워에 따른 NiFe 자화 동역학 특성 연구

양혁재 · 정선재*

한국교원대 물리교육과, 충북 청주시 흥덕구 태성탑연로 250, 28173

이상훈

고려대학교 물리학과, 서울특별시 성북구 안암로 145, 02841

(2026년 1월 19일 받음, 2026년 1월 25일 최종수정본 받음, 2026년 1월 26일 게재확정)

본 연구에서는 DC 마그네트론 스퍼터링 파워(DC magnetron sputtering power)가 강자성 NiFe 박막의 자화 동역학 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 증착 파워를 18에서 225 W로 변화시키며 NiFe 박막을 제작하였고, 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 측정을 통해 길버트 감쇠 상수(α) 및 유효 자화($4\pi M_{eff}$)를 도출하였다. 분석 결과, 스퍼터링 파워가 증가함에 따라 유효 자화 값은 0.3에서 0.68 T로 뚜렷하게 증가한 반면, 길버트 감쇠 상수(α)와 비균질 선폭(ΔH_0)은 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 스퍼터링 파워의 정밀한 제어가 자성 박막의 구조적-동역학적 특성 최적화에 결정적인 요소임을 시사한다.

주제어 : 강자성 공명, 스퍼터 파워, 자화 동역학, 자기 감쇠 계수

I. 서 론

다양한 자성 박막의 자화 동역학 특성을 이해하고 제어하는 것은 스핀트로닉스 연구의 핵심 과제이다. 이러한 자화 동역학 특성을 연구하기 위해 강자성 공명(ferromagnetic resonance,

FMR) 측정은 폭넓게 활용되고 있다[1,2]. 일반적으로 강자성체의 자기 모멘트는 외부 자기장을 중심으로 세차 운동을 한다. 이 세차 운동의 진동수가 인가한 마이크로파의 주파수와 일치할때 에너지 흡수가 일어나는 공명 현상을 보이며, 이를 강자성 공명이라고 한다. 강자성 공명 측정은 이러한 원리에

기반하여 다양한 박막 및 다층 박막의 자성 특성 등을 체계적으로 연구하는데 이용된다[3]. 특히, 강자성 공명 측정을 통해 자기 이방성, 교환 상호 작용, 외부 자기장을 포함한 유효 자기장의 크기 및 방향을 평가할 수 있으며, 선풍 분석을 통해 얻어지는 길버트 감쇠 상수는 스핀트로닉스 소자의 에너지 효율, 자화 반전 과정 등을 이해하는 데 중요한 정보로 이용될 수 있다. 따라서 강자성 공명 측정은 자성 재료의 기초 물성 분석부터 스핀파 및 고주파 스핀 소자의 최적 설계를 위한 필수적인 정보를 제공하는 핵심 실험 기법이라 할 수 있다.

강자성 물질의 유효 자화량과 감쇠 계수는 인접한 층과의 상호작용뿐만 아니라 자성 박막 자체의 구조적-물리적 특성에 의해서도 민감하게 변화한다. 이러한 이유로 박막 증착 조건을 체계적으로 제어하여 자성 특성을 최적화하는 과정은 매우 중요한 연구 단계로 인식되고 있다. 특히 스퍼터링 파워와 Ar 분압은 박막의 증착 속도뿐만 아니라 결정성, 표면 거칠기, 결함 밀도 등에 직접적인 영향을 미치는 핵심 공정 변수이다. 따라서 이들 증착 파라미터가 자성 박막의 자화 동역학 특성에 미치는 영향을 체계적으로 규명하는 연구는 학문적-응용적 측면에서 모두 중요하다. 본 연구에서는 DC 마그네트론 스퍼터링 파워를 체계적으로 변화시켜 NiFe 박막의 증착률을 제어하였으며, 이러한 제어 변수가 NiFe 박막의 자화 동역학 특성에 미치는 영향을 강자성 공명 측정을 통해 상세히 분석하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서 사용된 NiFe(10 nm)/Al(3 nm) 이층 박막 구조는 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 공정을 통해 제작되었다. 챔버의 초기 진공도(base pressure)는 2×10^{-8} Torr 이하로 유지되었으며, 증착 공정 중 아르곤(Ar) 작동 압력(working pressure)은 NiFe 층의 경우 5 mTorr, Al 층의 경우 10 mTorr로 정밀하게 제어되었다. 특히, NiFe 층은 DC 파워를 18, 37, 75, 150, 225 W로 변화시키며 증착하였고, 상부 Al 층은 75 W의 전력에서 고품질의 박막을 형성하였다. 제작된 시료는 3 mm × 3 mm 크기로 잘라서 CPW(coplanar waveguide) 상에 장착하였으며, 측정 중 시료의 유동을 방지하기 위해 캡톤(Kapton) 테이프를 고정하였다. 강자성 공명(FMR) 특성 분석을 위해 시료가 장착된 프루브를 측정 시스템 내부에 위치시킨 후, Anritsu MG3692C 신호 발생기와 RF 다이오드 및 락인(Lock-in) 앰프를 연결하여 측정 회로를 구성하였다[4]. 실험은 CPW에 20 dBm의 마이크로파 전력을 인가하여, 공명 조건에서 시료가 마이크로파를 효율적으로 흡수할 수 있도록 수행되었다[5-8].

III. 결과 및 고찰

스퍼터링 공정에서 DC 파워를 18 W에서 225 W로 증가 시킴에 따라 NiFe 박막의 증착 속도(Deposition rate)는 Fig. 1에서와 같이 약 0.12 Å/s에서 1.02 Å/s로 선형적으로 증가하였다. 이는 인가 전력의 증가가 타겟에 입사하는 이온의 에너지와 플럭스(flux)를 비례적으로 증대시켜, 결과적으로 스퍼터링 수율(sputtering yield)이 향상되었기 때문으로 해석된다.

Fig. 2는 37 W와 225 W의 파워로 증착된 NiFe/Al 박막에 대하여, 7 GHz의 마이크로파 주파수 하에서 측정된 강자성 공명 측정 신호를 보여준다. 관측된 신호는 RF 다이오드 기반 감지 방식의 전형적인 특징인 로렌지안(Lorentzian) 함수의 미분 형태(dp/dH)를 보여준다.

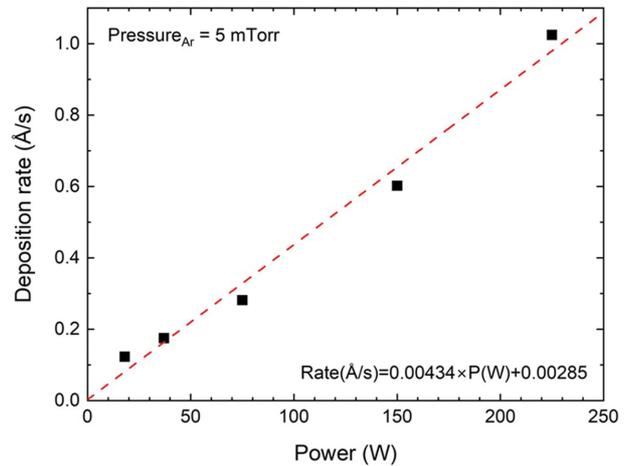


Fig. 1. (Color online) Deposition rate of NiFe films as a function of DC sputtering power.

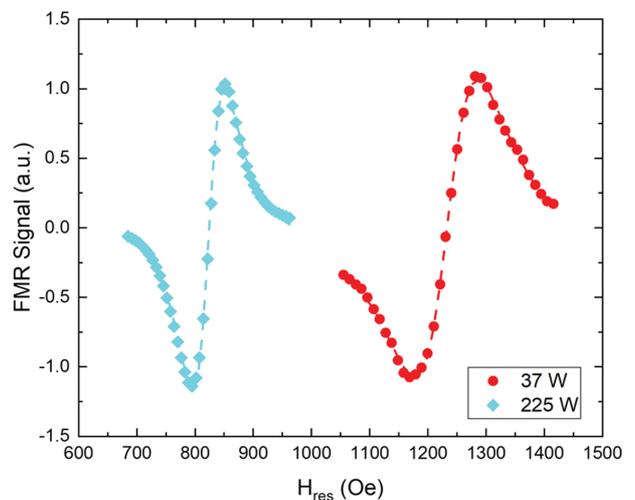


Fig. 2. (Color online) FMR spectra measured at 7 GHz for NiFe films deposited at 37 W and 225 W.

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

측정된 각 스펙트럼은 식(1)을 이용하여 이용하여 비선형 회귀 분석을 수행함으로써 공명 자기장(H_{res})와 선폭(ΔH)을 도출하였다. 측정된 강자성 공명 신호는 공명 자기장을 중심으로 비대칭적인 로렌츠(Lorentzian) 선형을 나타내므로, 피팅 과정에서는 대칭 성분 계수와 비대칭 성분 계수를 모두 고려하였다. 또한 측정 과정에서 RF 다이오드에 의해 발생한 오프셋 전압이 락인 앰프를 통해 검출될 수 있으므로, 이를 보정하기 위한 오프셋 항을 함께 포함시켰다[9-11]. Fig. 2를 자세히 살펴보면, 37 W로 증착된 NiFe 강자성 박막에서 더 높은 공명 자기장과 더 넓은 선폭이 관찰된다.

Fig. 3에는 모든 시료를 식(1)을 이용하여 비선형 회귀 분석을 하여 얻은 공명 자기장(H_{res})과 입력된 마이크로파 주파수(f_{RF})의 관계(Fig. 4(a)), 그리고 선폭(ΔH)과 입력 마이크로파 주파수(f_{RF})와의 관계(Fig. 4(b) 참조)를 나타낸 결과가 정

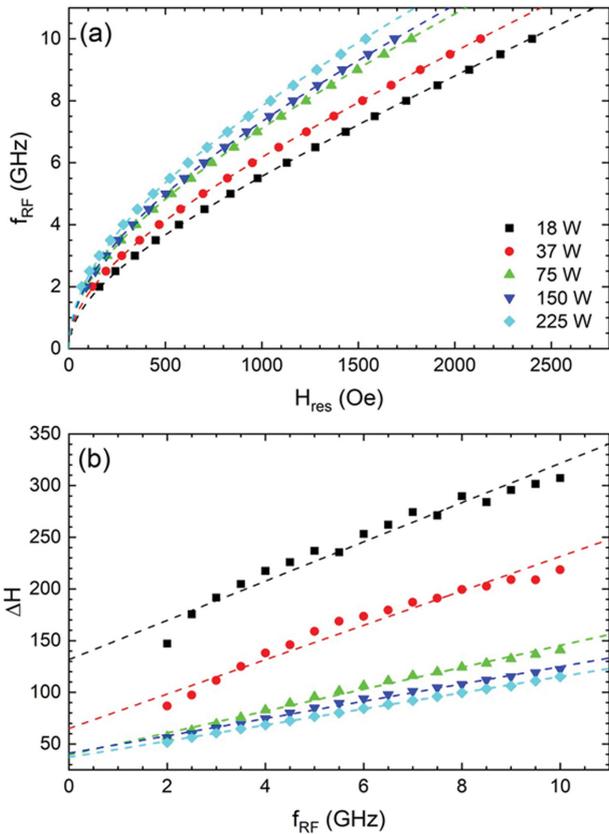


Fig. 3. (Color online) (a) Resonance frequency as a function of resonance field (H_{res}), (b) frequency dependence of the FMR linewidth (ΔH). The solid lines represent fitting results using eq. (2) for (a) and eq. (3) for (b).

리되어 있다. 각 시료에 대해서, Fig. 4(a)에는 식(2)를 이용하여 피팅한 결과가 실선으로 나타나 있다.

$$f = \gamma \sqrt{H_{res}(H_{res} + 4\pi M_{eff})} \quad (2)$$

식(2)는 키텔 방정식(Kittel equation)으로 알려진 관계식으로, 강자성체가 공명 조건에 있을 때 인가된 마이크로파 주파수와 공명 자기장 사이의 상관관계를 나타낸다. 여기서 γ 는 자기 회전 비율(gyromagnetic ratio)로 본 실험 분석에서 28 GHz/T의 값을 고정하여 사용하였다. 또한, $4\pi M_{eff}$ 는 박막의 유효 자화(effective magnetization)를 나타내는 물리량으로, 시료의 자기 이방성 및 탈자 효과를 포함한 자성 특성을 반영한다. 식(2)를 이용하여 Fig. 4(a)에 제시된 실험 데이터를 비선형 회귀 분석함으로써 각 시료의 유효 자화를 도출하였으며, 그 결과를 Fig. 4(a)에 정리하였다.

한편, 자기 감쇠 계수(α)와 비균질 선폭(ΔH_0)은 Fig. 3(b)의 입력 마이크로파 주파수와 선폭(ΔH)의 관계를 식(3)을 이용한 선형 회귀 분석을 통해 추출할 수 있었다. 각 시료에 대한 분석 결과는 실선으로 표시하였으며, 이와 같은 분석을 통해 공명 선폭의 주파수 의존성을 체계적으로 평가함으로써 자화 동역학적 손실 메커니즘을 정량적으로 규명하였다.

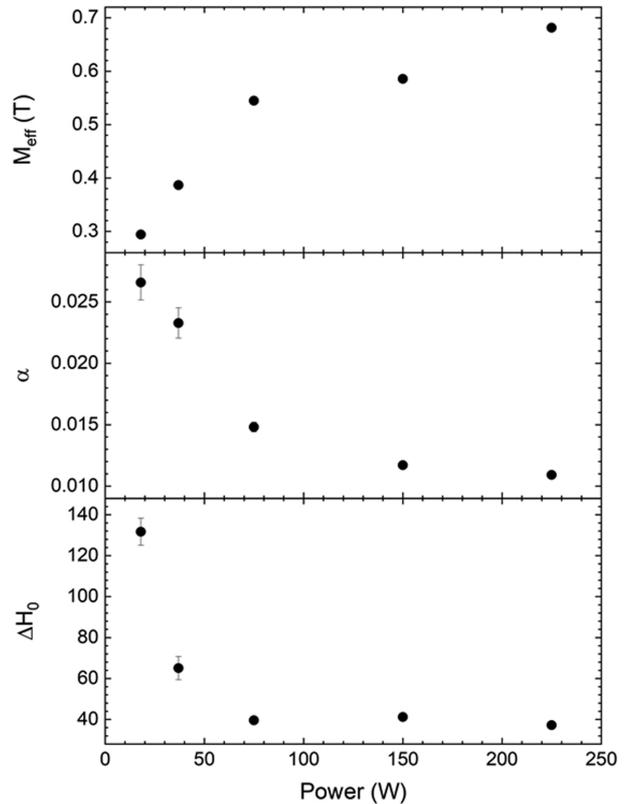


Fig. 4. DC sputtering power dependence of (a) the effective magnetization ($4\pi M_{eff}$), (b) the Gilbert damping constant (α), and (c) the inhomogeneous linewidth (ΔH_0).

$$\Delta H - \Delta H_0 = \frac{2\alpha f}{\gamma} \quad (3)$$

식(3)을 이용한 회귀 분석을 통해, 각 시료의 자기 감쇠 계수(α)와 비균질 선폭(ΔH_0)을 얻었으며, 이 결과는 Fig. 4(b)와 (c)에 나와 있다.

앞의 실험 결과를 시료의 스퍼터링 파워에 따라 정리한 결과가 Fig. 4에 나와 있다. Fig. 4(a)에는 스퍼터링 파워에 따른 유효 자화값이 정리되어 있으며, 파워가 증가함에 유효 자화값이 0.3 T에서 0.68 T까지 증가하는 경향을 보인다. Fig. 4(b)와 (c)에는 스퍼터링 파워와 자화감쇠 계수 및 비균질 선폭에 대한 결과가 요약되어 있다. 스퍼터링 파워가 증가함에 따라, 두 값 모두 감소하는 경향을 보이며, 이는 박막의 자화 동역학 특성이 향상 됨을 암시한다. 이러한 경향은 낮은 스퍼터링 파워 조건에서는 상대적으로 느린 증착 속도로 인해 박막의 결점립 크기가 낮게 형성되는 반면, 높은 파워 조건에서는 입사 원자의 에너지가 증가하여 보다 치밀한 박막 성장이 유도되고, 그 결과 유효 자화가 증가한 것으로 해석할 수 있다[12,13].

IV. 결 론

본 연구에서는 DC 스퍼터링 파워가 NiFe/Al 박막의 자기적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 파워 증가에 따른 높은 증착율은 자성 박막의 유효 자화($4\pi M_{eff}$)를 0.68 T까지 크게 향상시켰다. 또한, 높은 파워의 증착은 자화 감쇠 계수(α)와 비균질 선폭(ΔH_0)을 최소화 시키는 것을 관찰 할 수

있었다. 이러한 결과는 높은 파워에서의 성장이 박막의 특성을 향상 시키고, 이를 더 우수한 자상 특성을 만드는데 기여한 것으로 볼 수 있다. 결론적으로, 높은 스퍼터링 파워는 고주파 스핀트로닉스 소자 응용을 위한 박막의 동역학적 손실 제어에 밀접한 상관관계가 있음을 관찰할 수 있었다.

References

- [1] C. Kittel, Phys. Rev. **73**, 155 (1948).
- [2] J. H. E. Griffiths, Nature **158**, 670 (1946).
- [3] L. Landau and E. Lifshitz, Phys. Zeitsch. der Sowjet. **8**, 153 (1935).
- [4] H. J. Yang, S. H. Jeong, S. J. Chung, T. W. Eom, S. G. Ku, and S. H. Lee, J. Korean Magn. Soc. **35**, 25 (2025).
- [5] S. Kim, Y. Kim, and S. Chung. J. Korean Magn. Soc. **33**, 127 (2023).
- [6] Y. Kim, S. Kim, S. Chung, J. Åkerman, and S. Lee, J. Korean Magn. Soc. **33**, 44 (2023).
- [7] S. Chung, S. Jiang, J. Åkerman, and S. Lee, J. Korean Magn. Soc. **32**, 27 (2022).
- [8] S. S. Yoon and D. Y. Kim, J. Korean Magn. Soc. **31**, 53 (2021).
- [9] <http://www.rndware.com/>.
- [10] J. Topp, S. Mendach, D. Heitmann, M. Kostylev, and D. Grundler, Phys. Rev. B **84**, 214413 (2011).
- [11] S. Tacchi, G. Duerr, J. W. Klos, M. Madami, S. Neusser, G. Gubbiotti, G. Carlotti, M. Krawczyk, and D. Grundler, Phys. Rev. Lett. **109**, 137202 (2012).
- [12] X. H. Li and Z. Yang, Mater. Sci. Eng. B **106**, 41 (2004).
- [13] C. Zhou, T. Li, X. Wei, and B. Yan, Metals **10**, 896 (2020).