# Method to Check Sample Reproducibility by Measuring Magnetic Domain Wall Motion in Perpendicular Magnetic Anisotropy Thin Films

### Joon Moon, Seong-Hyub Lee, Kitae Kim, Jung-Hyun Park, Jun-Young Chang, Ji-Sung Yu, and Sug-Bong Choe\*

Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

(Received 13 October 2021, Received in final form 29 October 2021, Accepted 29 October 2021)

In this study, a method was developed to confirm the deposition reproducibility of the magnetic layer thickness through the magnetic domain wall velocity analysis in the perpendicular magnetic thin film. We analyzed the effect of magnetic layer thickness and magnetic anisotropy on the magnetic domain wall motion occurring in a perpendicular magnetic thin film composed of Pt/Co/Pt. It was confirmed that the creep scaling constant ( $\alpha$ ) changed rapidly in the thickness regime of the magnetic layer where perpendicular magnetic anisotropy was formed. Using this, it is possible to check the change of  $\alpha$  with respect to the change in the thickness of the magnetic layer of several Å.

Keywords : magnetic anisotropy, perpendicular magnetic anisotropy thin film, domain wall motion

## 수직자성박막에서 자구벽 속도 측정을 통한 샘플 재현성 확인 방법

#### 문준 · 이성협 · 김기태 · 박정현 · 장준영 · 유지성 · 최석봉\*

서울대학교 물리천문학부, 서울시 관악구 관악로1, 08826

(2021년 10월 13일 받음, 2021년 10월 29일 최종수정본 받음, 2021년 10월 29일 게재확정)

본 연구에서는 수직자성박막에서 자구벽 이동속도 분석을 통해 자성층 두께의 증착 재현성을 확인하는 방법을 개발하였다. Pt/ Co/Pt로 구성된 수직자성박막에서 발생하는 자구벽 운동에 자성층 두께와 자기이방성이 미치는 영향을 분석하였다. 수직자기 이 방성이 형성되는 자성층 두께 구간에서 기어가기 상수(*a*)가 급격하게 변하는 것을 확인하였고, 이를 이용하여 수 Å 수준의 자성 층 두께 변화에 대한 *a*의 변화를 확인할 수 있다. 본 연구에서 제시한 자구벽 속도분석 방법을 이용한다면 제작된 시료의 자성 층 두께 재현성을 확인할 수 있을 것이다.

주제어 : 자기이방성, 수직자성박막, 자구벽 운동

## I.서 론

자성 박막을 이용한 자성 메모리 소자는 차세대 메모리로 많은 관심을 받고 있다[1]. 그 중에서도 수직자성박막에서의 자구벽 운동은 최근 몇 년간 잘로신스키-모리야 상호작용 (Dzyaloshinskii-Moriya interaction), 스핀 궤도 돌립힘(spinorbit torque)의 발견과 더불어 효율적인 자성소자를 구현하기 위한 방법으로서 활발한 연구가 진행되고 있다[2-4]. 이러한 수직자성 박막에서 자구벽 운동의 재현성을 확보하는 것은 어 플리케이션을 구현하고 자구벽 운동을 연구하는데 있어 중요 한 요소이다.

그러나 대부분의 수직자성은 얇은 자성층 상태에서 발현되 어, 자성층의 두께 변화에 따른 수직자성의 특성 변화가 크 기 때문에, 시료의 재현성을 유지하는 것이 쉽지 않다.

우리는 수직자성박막에서 자성층 두께에 따른 자기이방성 과 기어가기(creep) 운동의 상관관계를 분석하였고, 자구벽 속 도 측정을 통해 자성층의 두께가 재현성 있게 제작되었는지 확인할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

#### II. 배경이론

먼저 수직 자성 박막에서 자기이방성은 자성층의 두께 *t<sub>FM</sub>* 에 대해 다음과 같은 관계가 있음이 알려져 있다[5,6].

<sup>©</sup> The Korean Magnetics Society. All rights reserved. \*Corresponding author: Tel: +82-2-880-9254, e-mail: sugbong@snu.ac.kr

수직자성박막에서 자구벽 속도 측정을 통한 ...... – 문준 · 이성협 · 김기태 · 박정현 · 장준영 · 유지성 · 최석봉

$$K_{U}^{eff} = \left(K_{v} - \frac{1}{2}\mu_{0}M_{S}^{2}\right) + \frac{K_{s}^{tot}}{t_{FM}}.$$
(1)

여기서  $K_U^{eff}$ 는 유효 일축 이방성(effective uniaxial anisotropy),  $K_v$ 는 부피 이방성(volume anisotropy),  $M_s$ 는 포화자화 (saturation magnetization),  $K_s^{tot}$ 는 총 표면 자기이방성(total surface magnetic anisotropy)이다.  $\frac{1}{2}\mu_0 M_s^2$ 는 샘플의 자기소 거 에너지(demagnetization energy)로 유효 부피 이방성 (effective volume anisotropy)를  $K_v^{eff} = \left(K_v - \frac{1}{2}\mu_0 M_s^2\right)$ 로 나 타내 낼 수 있다. 따라서 자기이방성은

$$K_U^{eff} t_{FM} = K_v^{eff} t_{FM} + K_s^{tot}$$
(2)

의 관계를 따르며, K<sup>(5)</sup>가 양수인 경우 이를 수직 자기이방성, 음수인 경우 수평 자기 이방성을 가진다고 알려져 있다. 수 직 자기 이방성은 샘플 표면에 수직인 방향으로, 수평 자기 이방성은 샘플 표면에 수평인 방향으로 자화방향이 정렬되려 는 성질을 나타낸다.

자구벽의 기어가기 운동의 속도[7]는 비자성층의 두께에 의존하는 자기이방성[9]뿐만 아니라 자성층의 두께[8]에 의 해 달라진다. 이를 종합하여 기어가기 운동속도와 자성층의 두께, 그리고 자기이방성과의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha \propto t_{FM} K_U^{eff^{58}}.$$
 (3)

여기서 *a*는 기어가기 상수(creep scaling constant)이며 자 구벽은 수직방향으로 인가되는 자기장 *H*<sub>2</sub>의 세기에 따라

$$V = V_0 \exp\left[-\alpha H_z^{-1/4}\right] \tag{4}$$

의 속도로 운동한다.

#### III. 실험 방법

실험을 위하여 수직자성을 가진 자성 샘플을 직류 마그네 트론 스퍼터링(dc magnetron sputtering) 방법을 사용하여 만 들었다. SiO<sub>2</sub> 기판위에 Ta(5 nm)/Pt(2.5 nm)/Co(x nm)/Pt(1.5 nm) 구조의 박막을 증착하였다. 이때 Co 두께 x는 0.3 nm 부터 0.6 nm까지 0.05 nm 이하의 간격으로 만들었다. 시료는 모두 수직자성박막을 가지며, Fig. 1(a)와 같이 속도를 측정하기 용 이한 깨끗한 등방적 자구벽 운동을 하였다.

포토 패터닝을 통해 홀 막대(hall bar) 구조로 만든 마이크로 선에 수평 자기장을 인가하면서 비정상 홀 효과(anomalous hall effect(AHE))의 크기 변화를 측정하여(Fig. 1(b)) 유효 이방성 자기장(effective anisotropy field)를 측정하였으며, 포화자화 (saturation magnetization)를 진동 자력계(vibrating sample magnetometer(VSM))를 이용하여 측정하였다(Fig. 1(c)).

자기광학 커 효과(magneto-optical Kerr effect(MOKE))을



Fig. 1. (Color online) (a) MOKE overlap Images of domain wall expansion by the perpendicular magnetic field ( $H_z = 2.88 \text{ mT}$ ) at 100 ms intervals (b) Effective anisotropic magnetic field as a Co thickness. (c) Graph of Correlation between Co thickness and saturation magnetization. (d) Domain wall velocity with respect to the perpendicular magnetic field in each sample.

- 226 -

이용한 광학현미경을 이용하여 자구벽의 속도를 측정하였다. 이때 자구벽은 기어가기 운동 영역에서 수~수백 µm/s 속력 을 가지며, 측정 결과로부터 각 샘플의 기어가기 상수를 구 하였다(Fig. 1(d)).

#### IV. 실험결과 및 고찰

먼저 Co 두께에 따른 수직자기 이방성의 변화를 확인하였 다. 일반적으로 Ta/Pt/Co/Pt 구조는 얇은 Co두께 영역에서 수 직 자기이방성이 형성되는 대표적인 샘플 구조이며, Co 두께 에 따라 자기이방성이 변화한다. 본 연구에서 사용한 시료에 서 Co의 두께가 0.3 nm 보다 두꺼우면 수직 자기이방성을 가지기 시작한다. 0.45 nm의 Co두께 까지는 수직 자기이방성 이 증가하지만 0.45 nm 이상에서는 수직 자기이방성이 감소 한다. 이는 Co 두께가 두꺼울수록 수평 자기이방성을 가진 부피 이방성의 증가가 수직 자기이방성을 가진 표면 자기이 방성을 상쇄시키기 때문으로 해석된다(Fig. 2). 요약하면 Co 두께변화에 따라 Co 두께 0.45 nm 이하 구간(I 구간) 에서는 자기이방성이 증가하며, Co 두께 0.45 nm 이상의 구간(II 구 간) 에서는 자기이방성이 감소하는 경향을 보이게 된다.

다음으로 Co 두께에 따른 기어가기 상수를 구했다. 자기장 의 세기에 따라 속도를 측정한 뒤 로그 피팅을 통하여 기울 기를 측정하였다. 이 결과로 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 Co 두께를 0.3 nm 부터 0.6 nm까지 변화시켜가며 *a*를 추산하였 으며, 이 결과가 앞에 기술한 바와 같이 *a*가 자성층의 두께 와 자기이방성의 함수로 표현되는 식(3)의 관계를 만족하는지 확인하였다.

Fig. 4는 측정된 a와 자기이방성의 관계를 그래프로 표현 한 것이다. 식(3)과 같이 a가 자성체의 두께와 자기이방성의 지수함수로 잘 설명되는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 2. Change of effective uniaxial anisotropy with Co thickness.

Fig. 2의 I 구간에서 두께와 자기이방성이 같이 증가하며, 이로 인해 Fig. 3의 I 구간에서와 같이 자성체의 두께에 따 라 α가 크게 변화하게 된다. 이 구간에서는 Co 두께가 0.3 nm에서 0.4 nm로 변화할 때 α는 약 3에서 7로 증가한다. 반면 Fig. 2의 II 구간에서 자성체 두께는 증가하고 자기이방 성은 감소하여 Fig. 3의 II 구간에서와 같이 자성체의 두께변 화에 따라 α가 크게 변하지 않게 된다. 이 구간에서는 Co 두께가 0.5 nm에서 0.6 nm로 변화할 때 α는 약 8에서 9로 증가한다. 즉 동일한 두께 변화에 대해 구간 II 보다 구간 I 에서의 α 변화가 약 4배가량 크다. 이러한 이유로 만약 구간 I에서 동일한 두께를 목표로 만들어진 복수의 샘플에서 α가 서로 다른 값을 가지면, 샘플간에 자성층의 두께 편차가 있 다는 근거로 활용할 수 있다.



Fig. 3. Change of creep scaling constant of sample with Co thickness.



Fig. 4. The relationship between creep scaling constant and Co thickness and effective uniaxial anisotropy.

Co 두께가 0.4 nm 이하인 샘플을 주기적으로 제작하고 자 구벽 속도 측정으로 a를 추산하는 과정을 통해 제작 공정 중 에 자성층의 두께가 일정하게 유지되었는지 알 수 있으며, 자 성층의 두께를 0.1 nm 이하의 정확도로 재현성 있게 제작할 수 있다.

## V.결 론

자성층의 두께가 얇은 수직자성박막에서, 기어가기 상수와 자성층의 두께, 그리고 자기이방성의 상관관계가 이론적인 수 식과 일치함을 확인하였다. 특히 수직자성이 형성되는 구간에 서 기어가기 상수가 자성층의 두께에 따라 급격하게 바뀌는 현상을 관찰하였다. 이러한 특성을 이용하여 자구벽 운동 속 도 측정을 통해 수 Å 수준의 자성층 두께 변화를 감지함으 로써 정밀한 자성박막을 재현성있게 제작하는 방법을 제안하 였다.

## 감사의 글

이 논문은 삼성전자의 지원(Samsung Science and Technology Foundation(SSTF-BA1802-07))과 정부의 지원 (National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT(MSIT)(2015M3D1A1070465 and 2020R1A5A1016518))을 받아 수행된 연구임.

#### References

- S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, Science 320, 190 (2008).
- [2] A. Bellec, S. Rohart, M. Labrune, J. Miltat, and A. Thiaville, EPL 91, 17009 (2010).
- [3] P. P. J. Haazen, E. Murè, J. H. Franken, R. Lavrijsen, H. J. M. Swagten, and B. Koopmans, Nat. Mater. 12, 299 (2013).
- [4] I. M. Miron, K. Garello, G. Gaudin, P. J. Zermatten, M. V. Costache, S. Auffret, S. Bandiera, B. Rodmacq, A. Schuhl, and P. Gambardella, Nature 476, 189 (2011).
- [5] R. Jungblut, M. T. Johnson, J. Stegge, A. Reinders, and F. J. A. Broeder, J. Appl. Phys. 75, 6424 (1994).
- [6] P. Bruno and J.-P. Renard, Appl. Phys. A. 49, 499 (1989).
- [7] S. Lemerle, J. Ferré, C. Chappert, V. Mathet, T. Giamarchi, and P. Le Doussal, Phys. Rev. Lett. 80, 849 (1998).
- [8] D. Y. Kim, M. H. Park, Y. K. Park, J. S. Yu, J. S. Kim, D. H. Kim, B. C. Min, and S. B. Choe, Appl. Phys. Lett. **112**, 062406 (2018).
- [9] D. H. Kim, S. C. Yoo, D. Y. Kim, K. W. Moon, S. G. Je, C. G. Cho, B. C. Min, and S. B. Choe, Appl. Phys. Lett. **104**, 142410 (2014).

- 228 -