

수직 자기 이방성을 갖는 Pt/Co/Pt 자성 박막의 세차 운동 측정 및 분석

윤상준 · 이재철 · 최석봉*

서울대학교 물리·천문학부, 서울시 관악구 대학동, 151-747

신경호

한국과학기술연구원 스핀소자연구센터, 서울시 성북구 하월곡동, 136-791

(2011년 11월 21일 받음, 2011년 12월 19일 최종수정본 받음, 2011년 12월 20일 게재확정)

본 연구에서는 극초고속 시간 대역의 자성 동역학을 탐구하기 위해, 시간 분해능을 가진 주사식 광자기 현미경을 개발하였다. 타이타늄:사파이어 레이저를 펌프-프로브 방식으로 사용하여, 0.1 피코초의 시간 분해능을 확보하였다. 이를 이용하여 Co 층의 두께를 바꾸어가며 Pt/Co/Pt 자성 박막 시료에서의 자성 동역학을 측정하였다. 펄스 레이저로 시료를 직접 가열하는 경우, 모든 시료는 수 피코초 내에 탈자화가 일어났다. Co 층이 두꺼운 두 시료에서는 자화의 세차 운동을 관측할 수 있었고, 란다우-리프쉬츠-길버트 방정식으로부터 각 시료의 길버트 감쇠 상수를 구하였다.

주제어 : 극초고속, 광자기 현미경, 세차 운동, 수직 자기 이방성, 감쇠 상수

I. 서 론

수직 자기 이방성을 가지는 강자성 박막은 높은 저장 밀도의 차세대 메모리나 논리 소자 등, 스핀트로닉스 장비를 구현하는 데 있어 주요한 후보로 관심을 받고 있다. 현재까지 제안된 여러 물질 및 나노 구조 중에서 Co/Pt 박막은 강한 수직 자기 이방성을 가지고 있으며, 전류에 의한 자구벽 운동을 하는 특성으로 인해 많은 관심을 받고 있다[1-5]. 이러한 자성 물질의 동역학 특성을 측정하기 위해 다양한 방법이 개발되어 연구가 진행되고 있다. 자기장과 전류로 자구벽 운동을 유도하여 스핀 전달 토크의 역할을 분석하거나[1], 스핀 파를 발생시켜 강자성 공명 현상을 통해 이방 자기장이나 감쇠 상수를 구하는[5] 등의 연구 방식이 있다. 최근에는 펌프-프로브(pump-probe) 방식을 이용해 자성 물질의 동역학을 피코초 시간 대역에서 직접 관찰하여 물리적 특성을 알아보는 방식이 개발되었다[6-8]. 펨토초 레이저 광원을 사용하는 이 실험 방법은 펨토초 레이저의 펄스 폭 만큼의 시간 분해능을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한, 펌프 레이저로 직접 가열하거나, 광스위치를 통해 유도된 자기장에 의해 발생하는 동역학을 연구할 수 있다. 직접 가열을 통한 스핀 동역학 연구에서는 극초고속 대역에서의 에너지 전달 메커니즘 및 스핀 펌핑 현상 등의 기본적인 물리 작용에 대한 연구가 집중적으로 수행되었다[6, 7]. 광스위치를 이용한 연구에서는 세차 운동, 자기 소용돌이 운동, 자화 역전 등의 현상에 대한 연구가 진행되었다[8].

본 연구에서는 이러한 시간 분해능을 가진 자성 현미경 시스템을 개발하였고, Pt/Co/Pt 구조에서 발생하는 스핀의 탈자화 및 세차 운동을 연구하였다. 0.1 피코초의 시간분해능으로 측정된 스핀동역학을 분석하여 탈자화 시간, 이방성 자기장, 및 스핀 감쇠 상수를 구하였고, Co 층의 두께에 따른 변화에 대해 논의하였다.

II. 실험방법

본 연구에 사용될 수직 자기 이방성을 나타내는 박막을 증착하기 위하여 직류 마그네트론 스퍼터링(DC magnetron sputtering) 방법을 사용하였다. SiO₂ 기판 위에 Ta 버퍼층을 쌓은 다음 Pt(2.5 nm)/Co(x nm)/Pt(1.5 nm) 의 구조로 박막을 증착하였고, Co 두께 x를 0.5~1.3 nm로 바꾸어 서로 다른 이방 자기장을 갖게 하였다. 두 Pt 층은 Co 층과의 경계면에서 강한 수직 자기 이방성을 일으키는 역할을 한다. 서로 다른 두께를 갖는 Pt/Co/Pt 시료의 자기 이력 곡선은 Fig. 1에 도식하였다. 모든 시료가 직사각형 형태의 자기이력 곡선을 보이고 있으며, 이는 모든 시료가 강한 수직 자기 이방성을 가진다는 것을 의미한다. Co의 두께가 두꺼워지면서 보자장의 크기가 감소하는 경향을 보인다. 이는 Co의 두께가 두꺼워지면서, 수평 자기 이방성을 선호하는 Co의 부피 자기 이방성의 크기가, 계면 자기 이방성에 비해 상대적으로 커지기 때문이다. 특히, 1.3 나노미터의 경우에는 보자장의 크기가 급격히 감소하여, 수평 자기 이방성으로의 전이 두께에 가까워져 감을 확인할 수 있다.

서로 다른 두께의 Co 자성층을 가진 시료의 자성 기본 특

*Tel: (02) 880-9254, E-mail: sugbong@snu.ac.kr

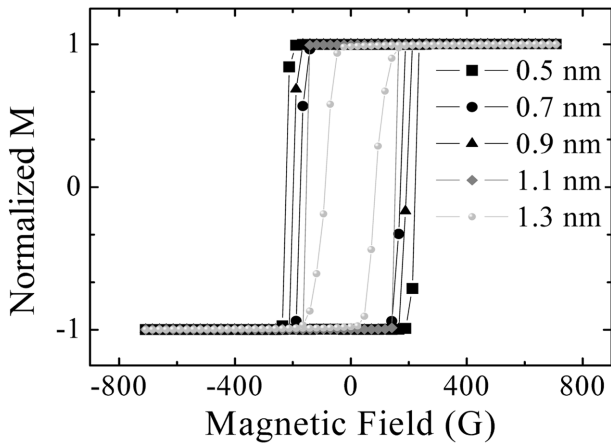


Fig. 1. Hysteresis loops of Pt/Co/Pt thin films measured by polar MOKE, for samples with various Co thickness as denoted.

성을 더 자세히 알아보기 위해, 이방 자기장 H_k 의 크기를 측정하였다. 이를 위하여 수직 방향의 이방 자기장을 측정할 수 있는 홀-효과(Hall effect) 토크 측정 방식을 사용하였다[9]. 이 측정 방식에서는 외부 자기장을 시료의 자화 용이축 근처에 회전시키면서 홀 전압을 측정 후, 측정된 결과를 Stoner-Wohlfarth 이론으로 분석하여, 이방 자기장을 구할 수 있다. Fig. 2는 이 측정 방식으로 측정된 홀 전압과 Stoner-Wohlfarth 이론으로 피팅한 결과를 보여주고 있다. 이러한 방식으로 얇은 박막 시료에서의 이방 자기장을 높은 정밀도로 측정할 수 있다. 각 시료에서 측정된 이방 자기장을 Table I에 정리하였다. 자기 이력 곡선에서 관찰한 바와 같이, Co층 두께가 두꺼워질수록 수직 방향의 이방 자기장 값이 감소하는 경향이 있음을 확인할 수 있다.

극초고속 대역에서 이 시료의 동역학을 알아보기 위해서,

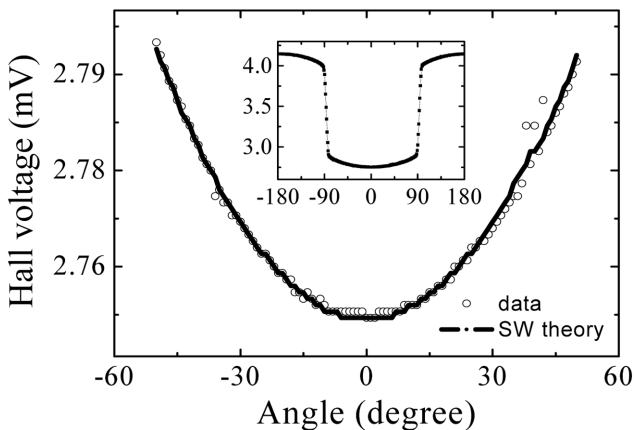


Fig. 2. Typical measurement results for extraordinary Hall voltage with respect to the angle of external magnetic field. The results were measured on 1.1 nm Co sample under an external magnetic field, 1.5 kG. The solid line is best fit by the Stoner-Wohlfarth theory. Inset shows Hall voltage for 1-rotation.

Table I. Perpendicular magnetic anisotropy constant and Gilbert damping constant of Pt/Co/Pt samples

Co Thickness (nm)	Anisotropy field (G)	Damping constant
0.5	10076 ± 906	
0.7	13204 ± 1515	-
0.9	7492 ± 230	
1.1	2430 ± 12	0.115 ± 0.005
1.3	552 ± 15	0.13 ± 0.01

0.1 피코초 대역의 시간 분해능을 갖춘 광자기 커르 효과(MOKE, Magneto-Optical Kerr Effect) 현미경을 개발하였고, 이를 사용하여 극-광자기(polar-MOKE) 신호를 측정하였다. Fig. 3에는 시간 분해능 광자기 현미경 시스템의 모식도를 표시하였다. 이 현미경의 시간 분해능은 최소 0.01 피코초 간격으로 거리 조절이 가능한 시간 지연 스테이지를 구성하여 확보하였다. 광원으로는 파장 780 나노미터의 타이타늄:사파이어(Ti:Sapphire) 레이저를 사용하였고, 펄스 폭은 100 펨토초로 92 메가헤르츠의 반복 주기를 가진다. 펌프-프루브 방식을 위해 펌프 빔은 780 나노미터 파장의 레이저 빔을 직접 사용하고, 프루브 빔은 두배 진동과 생성(SHG, second harmonic generation) 결정을 통해 발생한 390 나노미터 파장의 레이저 빔을 사용하였다. 펌프 빔과 프루브 빔은 각각 1 마이크로미터와 500 나노미터 미만의 직경으로 시료에 조사하여 나노미터 수준의 공간 분해능을 확보하였고, 단위 면적당 공급되는 에너지의 비율은 약 20:1이다. 자기장은 1.7 ± 0.17 킬로가우스(kG)의 세기로 시료 표면과 15°의 각도로 걸어 주어 레이저로 직접 가열된 스핀의 세차 운동을 유도하였다. 그리고 광탄성 변조기(PEM, Photo-Elastic

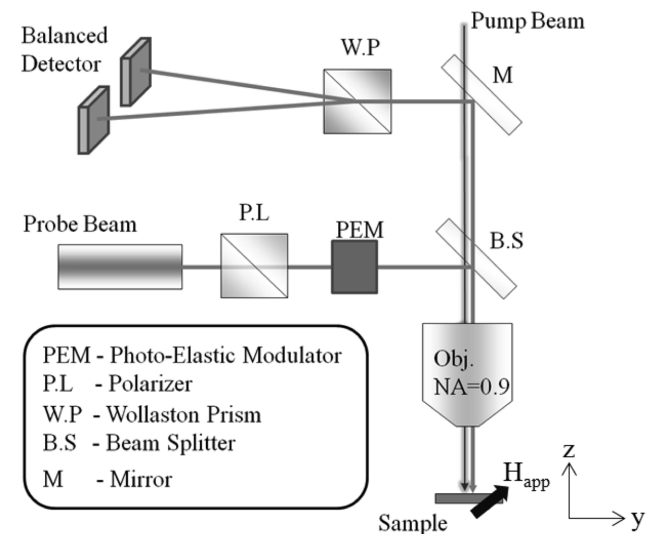


Fig. 3. Schematic diagram of the time-resolved MOKE microscope system.

Modulator)와 위상-고정 증폭기(Lock-in amplifier)의 동기화 및 평형 검출기(balanced detector)의 사용으로 측정 결과의 잡음 대비 신호 비율(SNR, signal-to-noise ratio)을 높였다. 실험의 정확성을 높이기 위해 펄프-프루브 빔의 지연시간을 바꾸어 가며 10회씩 측정한 값의 평균을 취하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 본 실험에서 제작한 Pt/Co/Pt 시료들의 자성 동역학 측정 결과를 나타낸다. 레이저의 직접 가열로 자화가 변하는 형태가 명확하게 구분되는 5 피코초 미만의 영역과 수 백 피코초 영역을 나누어 표시하였다. 실험에 사용한 모든 시료에서 열로 인한 탈자화가 ~1.5 피코초 시간 영역에서 일어났고 이후 시료 전체로의 열 확산이 일어나 자화가 천천히 회복되는 경향을 보여주고 있다. 100 피코초 이상의 시간 영역에서는 Co 두께에 따라 서로 다른 양상을 보이고 있다. Co 두께가 얇은 0.5~0.9 나노미터 시료에서는 시간에 따라 자화가 천천히 회복되는 것 이외의 다른 현상은 관찰되지 않

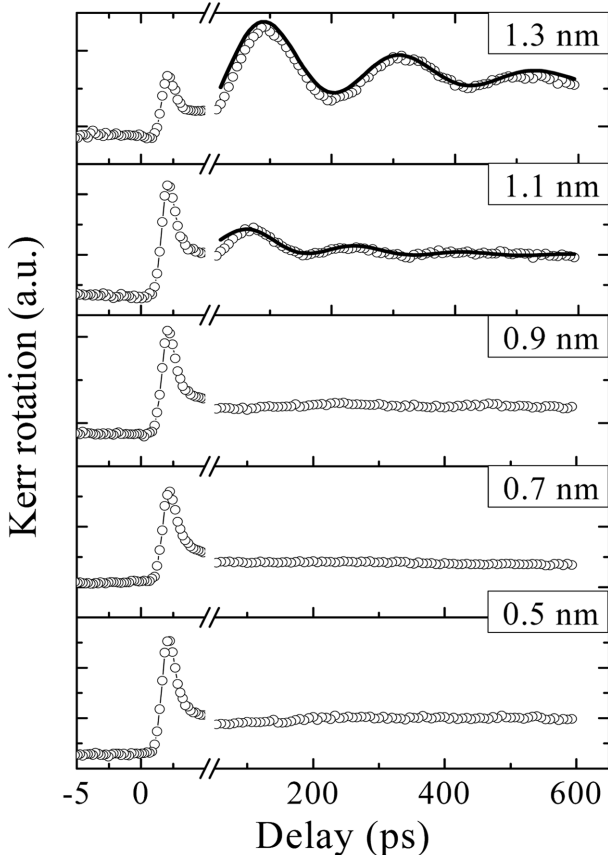


Fig. 4. Kerr rotation angle with respect to the delay time, for samples with various Co thickness as denoted. The solid lines are best fit with the solution based on Eq. (1) and (2).

는다. 반면, 1.1 나노미터 두께 이상에서는 시간에 따라 주기적으로 진동하는 형태도 추가적으로 확인할 수 있다. 이는 자화가 외부 자기장에 의해 세차 운동을 한다는 것을 의미한다.

홀-효과 토크 측정 방식으로 측정한 이방 자기장과 비교하여 보면(Table I), 1.1 나노미터 이상의 두께인 시료에서는 이방 자기장이 외부 자기장의 세기 1.7 킬로가우스와 비슷하거나 더 작은 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 시료에서는 자화가 외부 자기장에 의해 큰 각도로 회전하리라 예상한다. 반면에 Co 두께가 0.9 나노미터 이하인 경우에는 이방 자기장이 외부 자기장에 비해 수 배 이상 크기 때문에, 상대적으로 자화 방향의 회전이 작고, 대체로 수직 방향으로 정렬할 것으로 예상된다. 따라서 전자의 경우에는 레이저에 의한 에너지 공급으로 인해 온도가 올라 이방 자기장이 감소했을 때 기존 정렬 방향에서 자화가 많이 기울 수 있어서, 시료의 온도가 내려가 이방 자기장이 회복되었을 때 세차 운동을 할 수 있는 조건을 갖추게 된다. 그러나 후자의 경우는 이방 자기장이 감소하여도 외부 자기장보다 크기 때문에 자화가 수직 방향에서 거의 벗어나지 않아 세차 운동을 하지 못하고 볼 수 있다.

세차 운동을 보다 정량적으로 분석하기 위해서 자성 동역학을 기술하는 란다우-리프슈츠-길버트(LLG, Landau-Lifshitz-Gilbert) 방정식을 사용할 수 있는데, 여기에 사용될 자화 벡터를 구면 좌표계의 각도(θ , ϕ)와 Fig. 3에 표시된 외부 자기장 성분을 사용해 란다우-리프슈츠-길버트 방정식을 정리하면[10] 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\theta} = \frac{\alpha\gamma}{1 + \alpha^2}(H_{app,y}\cos\theta\sin\phi - H_{app,z}\sin\theta - H_k\cos\theta\sin\theta) + \frac{\gamma}{1 + \alpha^2}H_{app,y}\cos\phi \quad (1)$$

$$\sin\theta\dot{\phi} = -\frac{\gamma}{1 + \alpha^2}(H_{app,y}\cos\theta\sin\phi - H_{app,z}\sin\theta - H_k\cos\theta\sin\theta) + \frac{\alpha\gamma}{1 + \alpha^2}H_{app,y}\cos\phi \quad (2)$$

여기서 γ 는 자기회전비율(gyromagnetic ratio)로서 상수로 주어진다. 실험에서 사용된 외부자기장 H_{app} 과 홀-효과 토크 측정 방식으로 구한 이방 자기장 H_k 의 값은 알고 있으므로, 미지수는 감쇠 상수 α 만이 남게 된다. 감쇠 상수 α 가 임의의 값으로 주어진 경우, 식(1)~(2)의 연립 미분 방정식을 오일러(Euler) 방법으로 풀면 시간에 따른 자화 방향의 함수를 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 자화 방향의 함수와 Fig. 4의 측정 결과를 비교함으로써, 최적 피팅이 되는 감쇠 상수 α 를 구할 수 있다. 최적 피팅 결과는 Fig. 4에 실선으로 나타내었

고, 최적 감쇠 상수는 Table I에 정리하였다. 이 감쇠 상수는 NiFe, CoFe 등 수평 자기 이방성 시료에 비해 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 유사한 구조의 수직 자기 이방성 시료에서 일반적으로 나타나는 현상으로서[11], 수직 자기 이방성을 유도하기 위해 도입된 계면의 효과가 크게 작용한다고 알려져 있다.

IV. 결 론

자성 동역학 측정을 위해 펌프-프루브 방식의 자성 현미경을 개발하였다. 펄스 레이저를 사용해 0.1 피코초의 시간 분해능을 확보하였고, 높은 배율의 대물 렌즈를 사용해 수백 나노미터의 공간 분해능도 확보하였다. 개발된 현미경을 이용하여 Pt/Co/Pt 구조의 박막에서의 자성 동역학을 측정하였다. 펄스 레이저로 순간적인 온도 변화를 유도하였을 때 Co 두께가 1.1 나노미터 이상인 시료에서는 외부 자기장에 의해 자화가 세차 운동한다는 것을 확인하였다. 그러나 이방 자기장이 외부 자기장보다 수 배 이상 큰 Co 두께 0.5~0.9 나노미터 시료의 경우에는 수직 방향의 자화 상태가 유지되어 탈자화는 일어났으나 세차 운동은 하지 않았다. 세차 운동을 란다우-리프쉬츠-길버트 방정식으로 분석하여 감쇠 상수 α 가 대략 0.12임을 구하였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한

국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0056952, No. 2009-0084542).

참고문헌

- [1] J.-C. Lee, K.-J. Kim, J.-S. Ryu, K.-W. Moon, S.-J. Yun, G.-H. Gim, K.-S. Lee, K.-H. Shin, H.-W. Lee, and S.-B. Choe, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 067201 (2011).
- [2] X. M. Cheng, S. Urazhdim, O. Tchernyshyov, and C. L. Chien, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 017203 (2005).
- [3] J.-C. Lee, K.-S. Lee, C.-G. Cho, K.-W. Moon, K.-H. Shin, and S.-B. Choe, *IEEE Trans. Magn.* **46**, 2009 (2010).
- [4] P. J. Metaxas, J. P. Jamet, A. Mougin, M. Cormier, J. Ferre, V. Baltz, B. Rodmacq, B. Dieny, and R. L. Stamps, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 217208 (2007).
- [5] N. Fujita, N. Inaba, F. Kirino, S. Igarashi, K. Koike, and H. Kato, *J. Magn. Magn. Mater.* **320**, 3019 (2008).
- [6] E. Beaurepaire, J.-C. Merle, A. Daunois, and J.-Y. Bigot, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 22 (1996).
- [7] G. Malinowski, F. Dalla Longa, J. H. H. Rietjens, P. V. Paulskar, R. Huijink, H. J. M. Swagten, and B. Koopmans, *Nature Phys.* **4**, 855 (2008).
- [8] M. R. Freeman and W. K. Hiebert, *Spin Dynamics in Confined Magnetic Structures I*, Springer, New York (2002) pp. 93~126.
- [9] K.-W. Moon, J.-C. Lee, S.-B. Choe, and K.-H. Shin, *Rev. Sci. Instrum.* **80**, 113904 (2009).
- [10] M. Mansuripur, *J. Appl. Phys.* **63**, 5809 (1988).
- [11] G. Malinowski, K.C. Kuiper, R. Ravrijesen, H.J.M. Swagten, and B. Koopmans, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 102501 (2009).

Precessional Motion of Ferromagnetic Pt/Co/Pt Thin Film with Perpendicular Magnetic Anisotropy

Sang-Jun Yun, Jae-Chul Lee, and Sug-Bong Choe*

Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

Kyung-Ho Shin

Spin Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

(Received 21 November 2011, Received in final form 19 December 2011, Accepted 20 December 2011)

We developed a time-resolved magneto-optical Kerr effect microscope system to investigate ultrafast magnetization dynamics. Based on the pump-probe method, 0.1-ps time resolution was achieved by use of a fs Ti:Sapphire laser. The magnetization dynamics was then measured on Pt/Co/Pt thin films with various Co thicknesses. All the samples exhibited ultrafast demagnetization within a few ps by direct heating of pump laser. Some thicker samples showed precessional motion of magnetization, from which the Gilbert damping constant was determined based on the Landau-Lifshitz-Gilbert equation.

Keywords : ultrafast, TR-MOKE, precessional motion, perpendicular magnetic anisotropy, damping constant