ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 23(1), 7-11 (2013) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2013.23.1.007

TiO_2 씨앗층을 이용한 다양한 기판에서의 Co/Pd 층의 수직 자기 이방성에 대한 연구

강물빛 · 윤정범 · 이정섭 · 유천열*
인하대학교 물리학과, 인천시 남구 용현동 253, 인천 402-751

(2012년 12월 20일 받음, 2013년 2월 8일 최종수정본 받음, 2013년 2월 12일 게재확정)

본 연구에서는 TiO_2/Co/Pd 구조의 다층박막을 마그네트론 스퍼터링으로 GaAs(100), MgO(100), MgO(111), Si(100), glass와 같은 다양한 종류의 기판에 대해 제작하여 수직 자기 이방성에 대해서 연구하였다. 산소 분압 등의 TiO_2 층의 증착 조건과 기판의 종류에 따른 Co/Pd 층의 수직 자기 이방성을 측정하였다. 그 결과, TiO_2 층이 5 nm 이하 일 때는 기판의 종류에 영향을 받지만, 그 이상의 두께에 대해서는 MgO(111)을 제외한 기판의 영향이 크지 않음을 확인하였고, 이는 TiO_2 씨앗층의 성장조건과 계면의 거칠기, 결정방향 등과 관련이 있음을 발견하였다.

주제어 : 수직 자기 이방성, Co/Pd, TiO_2

I. 서 론

최근 스핀 전달 효과를 이용한 고밀도 비휘발성 메모리 소자가 활발히 연구되고 있는데, 소자의 크기가 줄어듦에 따라서 열적 안정성에 대한 관심이 높아지고 있다[1-4]. 비휘발성 메모리 소자의 자유층의 열적 안정성을 확보하기 위해서는 자화 방향이 면에 수직 방향을 가지는 수직 자기 이방성(perpendicular magnetic anisotropy, PMA)이 필요하고, 이에 따라 수직 자기 이방성을 가진 자유층에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다[5-8]. 이때 PMA는 터널링 자기저항의 비전도층으로 사용되는 MgO와의 계면이 필수적이므로, MgO와 같은 산화층과의 계면이 수직 자기 이방성에 어떤 기여를 하는가에 대한 연구는 매우 중요하다[9]. 예를 들어 최근 Rodmacq 등의 연구에 의하면, Pt/Co/AlOx 계면에서의 수직 자기 이방성이 Co-O-Al의 결합에 영향을 받는 다는 사실이 보고된 바 있다[10]. 이에 본 연구에서는 TiO_2/Co/Pd 구조에서의 수직 자기 이방성에 대해서 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 GaAs(100), MgO(100), MgO(111), Si(100), glass와 같은 다양한 종류의 기판과 TiO_2 층의 두께 및 증착 조건을 바꾸어가면서 TiO_2/Co/Pd 구조를 제작하여, 수직 자기 이방성에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 TiO_2 층의 두께가 5 nm 이하 일 때에는 기판의 종류의 영향이 크지만, 그 이상의 두께에서는 기판의 영향이 줄어드는 것을 확인하였다.

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author:
Tel: +82-32-860-7667, e-mail: cyyou@inha.ac.kr

II. 실험방법

본 실험에서 사용된 시료들은 기판/TiO_2/Co/Pd 구조를 가지고 있으며 모두 진공도 10^{-8} Torr의 초고진공 챔버에서 마그네트론 스퍼터링으로 제작되었다. Co, Pd 층의 증착은 3 mTorr의 Ar 분압에서 기판의 온도를 상온으로 유지하면서 각각 100, 50 W의 파워로 증착하였다. 반면 TiO_2 층의 증착을 위해 Ar 가스에 산소를 0, 10, 20, 30 %의 분압으로 각각 조절하며 TiO_2 타겟을 이용해서 rf 스퍼터링으로 증착하였고, 기판의 온도는 200 °C로 설정하였다. 제작된 TiO_2 층의 특성을 관찰하기 위해서 원자 힘 현미경(atomic force microscope)을 이용하여 표면을 관측하였고, X-ray diffraction(XRD)를 이용해서 TiO_2 층의 결정성을 관측하였다. 또, 기판의 종류와 TiO_2 층이 Co/Pd 층에 미치는 영향을 연구하기 위해서 Co 층과 Pd 층의 두께는 각각 0.6, 3 nm로 고정시켜 제작하였고, 제작된 시료의 자기적 특성은 시료 진동 자력계(vibrating sample magnetometer)를 이용하여 면내 수직, 수평 방향의 자기장에 대한 자기 이력곡선을 측정하였다.

III. 실험결과

1. 산소 분압의 변화에 따른 TiO_2 층의 특성 변화

본 연구에서는 TiO_2 층의 증착을 위해서 TiO_2 타겟을 rf 스퍼터링 방법으로 glass 기판 위에 증착하였다. 이때, Ar 만을 이용해서 증착을 할 경우, 시료에 산소가 결핍된 TiO_2 층이 증착되므로, 특성이 좋은 TiO_2 층을 제작하기 위해서는 추가적인 산소의 주입이 필요하다. 산소 분압에 따른 TiO_2

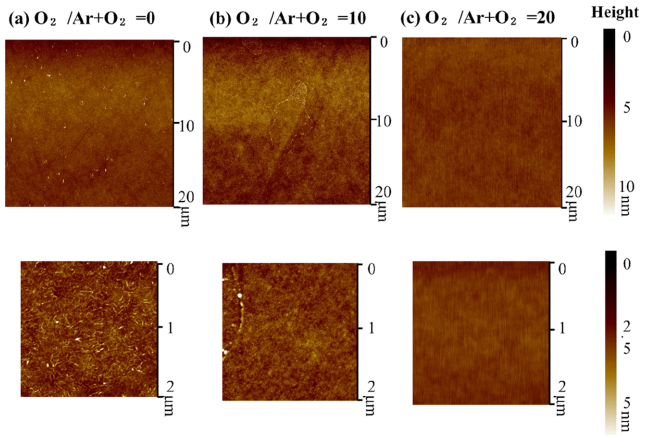

Fig. 1. (Color online) Atomic force microscope images of TiO_2 layer on the glass substrate for various oxygen partial pressures, (a) 0 %, (b) 10 %, and (c) 20 %.

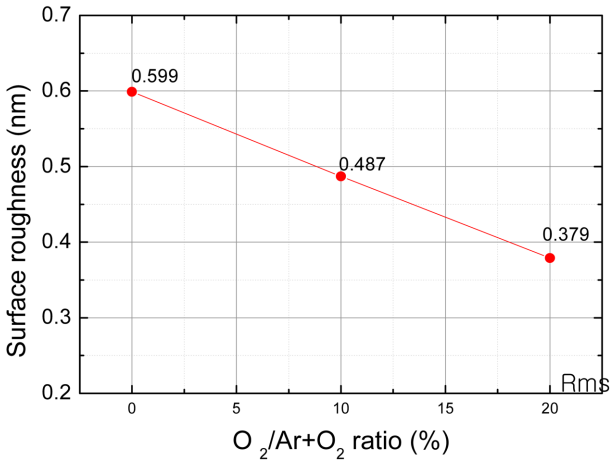

Fig. 2. (Color online) Surface roughnesses of TiO_2 layer for various oxygen partial pressures.

층의 특성 변화를 관측하기 위해서 산소 분압을 0, 10, 20, 30 %로 바꾸어 가면서 시료를 제작하였다. 산소 분압이 증가하면 증착율이 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 30 % 산소 분압의 경우 너무 낮은 증착율로 인해 분석이 가능한 두께의 시료를 증착하는데 어려움이 있었기 때문에, 앞으로의 논의에서는 제외하도록 하겠다. Fig. 1에서는 산소 분압을 변화시켜 가면서 증착한 20 nm 두께의 TiO_2 층의 AFM 이미지를 도식하였고, Fig. 2에는 산소 분압의 변화에 따른 AFM 측정에서 얻는 표면 거칠기를 도식하였다. AFM 이미지와 표면 거칠기에서 20 % 산소 분압에서 제작된 TiO_2 층의의 거칠기가 가장 작음을 확인할 수 있었다. 따라서 앞으로의 실험에서는 산소 분압을 20 %로 고정시켜서 증착하였다.

2. 기판의 변화에 따른 TiO_2 층의 특성 변화

기판의 종류에 따라 TiO_2 층의 결정성의 변화를 관측하기

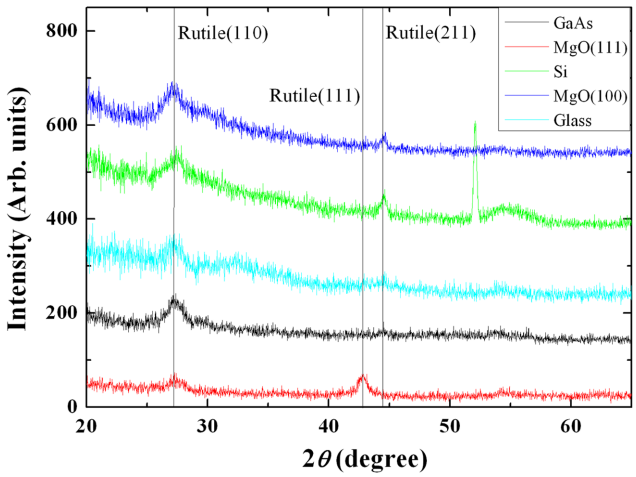

Fig. 3. (Color online) X-ray diffraction results for GaAs(100), MgO(100), MgO(111), Si(100), and glass substrates.

위해서 GaAs(100), MgO(100), MgO(111), Si(100), glass와 같은 다양한 기판에 대해서 증착된 TiO_2 층을 분석하였다. 기판의 온도는 200 °C, 산소 분압은 20 %로 고정한 상태에서 다양한 기판에 대해서 제작된 TiO_2 층의 XRD 결과를 Fig. 3에 도식하였다. 이 측정에서 사용된 박막의 두께가 60 nm 이기 때문에 전체적으로 XRD 신호가 작은 편이지만, 모든 종류의 기판에 대해서 rutile(110) 구조의 결정성을 관측할 수 있었고, 그 결정성의 정도는 기판의 종류에 따라 변화함을 확인할 수 있었다. 한가지 유의할 점은 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 MgO(111) 방향의 기판의 경우에 TiO_2 층의 성장이 rutile(110) 방향 보다는 rutile(111) 방향의 성장이 두드러짐을 확인 할 수 있었는데, 이는 MgO(111) 방향의 결정과 TiO_2 층 rutile(111) 결정의 방향이 잘 일치하기 때문이다. 기판과 TiO_2 층 두께 변화에 대한 자기 이력 곡선 측정 결과 및 수직 자기 이방성에 대한 논의에서 (111) 방향이 수직 자성에 크게 기여함이 발견되었는데, 이에 대해서는 추후 논의하도록 하겠다.

3. 기판의 변화에 따른 Co/Pd 박막의 수직 자기 이방성

기판의 변화에 따른 Co/Pd 층의 수직 자기 이방성에 대한 연구를 위하여, 각 GaAs(100), MgO(100), MgO(111), Si(100), glass 기판 위에 Co(0.6 nm)/Pd(3 nm)를 증착하였다. 이때, 증착 조건은 전술한 바와 같이 Ar 3 mTorr의 조건을 사용하였다. 증착된 시료를 각각 VSM을 이용하여, 면에 수직 방향의 자기장에 대해서 자기 이력 곡선을 측정한 결과를 Fig. 4에 도식 하였다. 보이는 바와 같이, MgO를 제외한 나머지 기판에 대해서는 자기 이력 곡선의 신호가 매우 작아서, 0.6 nm 두께의 Co 층이 섬 구조로 자라면서 초상자성을 형성하거나, 면내 이방성을 가지고 있을 것으로 추측된다. 그러나,

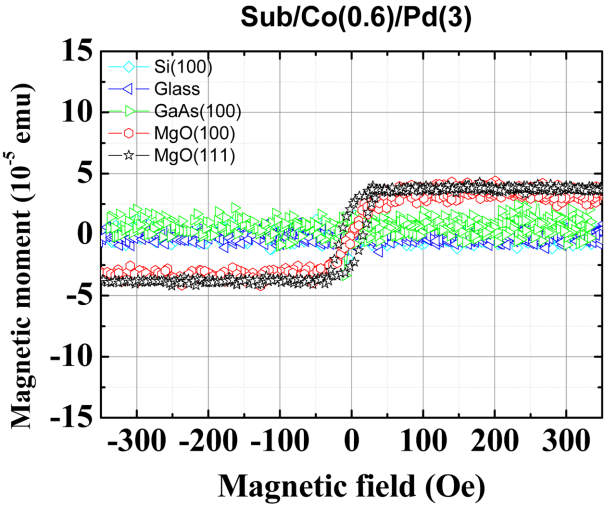

Fig. 4. (Color online) Hysteresis loops for substrate/Co(0.6 nm)/Pd(3 nm) structures, where substrates are GaAs(100), MgO(100), MgO(111), Si(100), and glass, respectively.

MgO(100)이나 (111) 방향의 기판을 사용한 경우, 수직 자기 이방성이 어느 정도 발현되고 있음을 확인할 수 있었다.

4. TiO_2 씨앗층의 두께 변화에 따른 Co/Pd 박막의 수직 자기 이방성

이번에는 각 GaAs(100), MgO(100), MgO(111), Si(100), glass 기판 위에 TiO_2 씨앗층을 3, 4, 5, 10 nm 두께로 증착한 후, Co(0.6 nm)/Pd(3 nm)를 증착하였다. Fig. 5(a)~(d)는 수직 방향 자기장에 대한 자기 이력 곡선을 도식하고 있다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 TiO_2 층이 없을 경우에는 기판의 종류에 따라서 수직 자기 이방성이 아예 없거나, 매우 약하다는 것을 확인하였는데, Fig. 5(a)에서 보이는 바와 같이 TiO_2 씨앗층을 3 nm 증착한 경우 MgO(111), GaAs(100)는 매우 뚜렷한 수직 자기 이방성을 보이고, MgO(100)의 경우 수직 자기 이방성을 보이지만, 매우 작은 보자력을 보이고 있음이 관측되었다. 또한, glass 기판의 경우 약한 수직 자기 이방성을 보이고, Si(100) 기판의 경우 신호가 매우 미약한 것으로 보아, 수직 자기 이방성이 전혀 발현되고 있지 않음을 확인 할 수 있었다. TiO_2 층이 4 nm가 되었을 때의 결과는 Fig. 5(b)에 도식하였는데, MgO(111)의 경우 보자력이 200 Oe이고 squareness가 1이 되는 완벽한 수직 자기 이방성을 보이고, GaAs(100)와 glass 기판은 보자력이 약 100 Oe

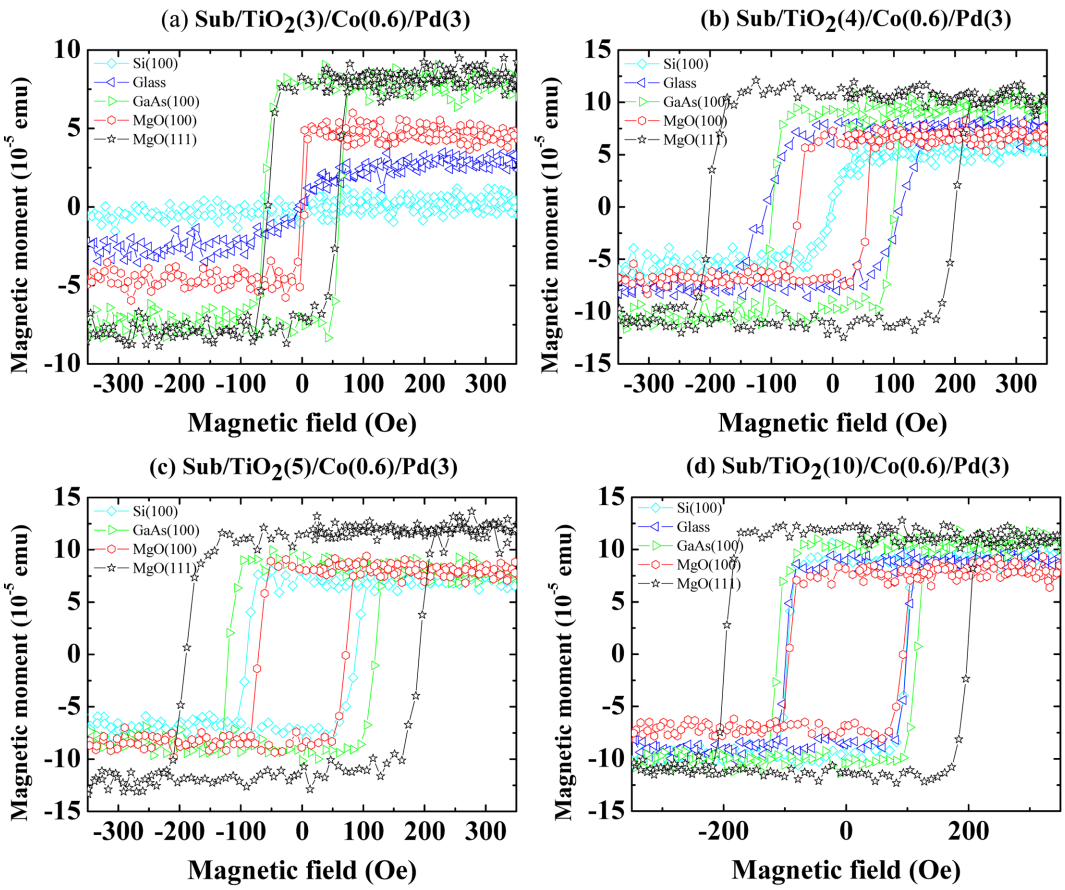

Fig. 5. (Color online) Hysteresis loops for substrate/ TiO_2(t nm)/Co(0.6 nm)/Pd(3 nm) structures, (a) t = 3 nm, (b) t = 4 nm, (c) t = 5 nm, and (d) t = 10 nm.

인 수직 자기 이방성을 보이고 있다. 그렇지만, glass의 경우 자기 이력 곡선이 약간의 기울기를 가지고 있는 것으로 보아 GaAs(100) 기판의 경우와는 다른 자화 역전이 벌어지고 있음을 짐작할 수 있다. 또, MgO(100)의 경우도 수직 자기 이방성이 발현되고 있으나 보자력이 다른 기판들에 비해서 상대적으로 작음(~50 Oe)을 확인하였다. 또, Si(100) 기판의 경우도, 약간의 수직 자기 이방성이 발현된 것으로 보이는데, 보자력의 값이 매우 작음을 확인할 수 있었다. Fig. 5(c)는 TiO_2 층이 5 nm 일 때의 자기 이력 곡선을 보여 주고 있다. 모든 종류의 기판에 대해서 수직 자기 이방성이 관측되었고, 보자력은 MgO(111) > GaAs(100) > Si(100) > MgO(100) 순으로 감소함을 관측하였다. 그러나, TiO_2의 두께가 10 nm인 경우 Fig. 5(d)에 보인 바와 같이 MgO(111) 기판을 제외한 다른 기판의 종류에 따른 자기 이력 곡선은 특성이 구분이 없어지는 것을 확인하였는데, 이는 기판의 특성이 10 nm 두께의 TiO_2 층에 의해 Co/Pd 층의 성장에 미치는 영향이 포화되었음을 의미한다. 그러나, MgO(111) 기판의 경우 Fig. 3의 XRD 결과에서 논의한 바와 같이 MgO(111) 구조에서는 TiO_2 층의 성장이 rutile(110) 방향 보다는 rutile(111) 방향의 성장을 선호하기 때문에, MgO(111) 위에 증착된 TiO_2 층이 다른 기판에서 증착된 TiO_2 층과는 다른 결정구조를 가진다. 또, 이때의 rutile(111) 방향은 Co/Pd(111)의 성장을 촉진시키기 때문에, 결정성이 더 좋아지고, 이는 수직 자기 이방성이 더 커질 수 있는 원인을 제공한다고 생각된다.

IV. 결 론

다양한 종류의 기판(GaAs(100), MgO(100), MgO(111), Si(100), glass) 위에 TiO_2 층을 씨앗층으로 하여 Co/Pd을 성장시켜 수직 자기 이방성에 대해 연구하였다. 연구 결과, 4 nm 이상 두께의 TiO_2 층이 Co/Pd 구조에서의 수직 자기 이방성을 발현 시키는데 크게 도움이 되는 것을 발견하였고, 특히 rutile(111) 방향이 Co/Pd(111) 방향의 결정 성장을 촉진시켜, 수직 자기 이방성을 증가시킴을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의(과제번호 2010-0023798와 2010-0022040) 지원과 원자력연구개발 사업의 지원으로 이루어졌음.

참고문헌

[1] Y. Jiang, T. Nozaki, S. Abe, T. Ochiai, A. Hirohata, N. Tezuka, and K. Inomata, Nature Mater. **3**, 361 (2004).
[2] A. D. Kent, B. Özyilmaz, and E. del Barco, Appl. Phys. Lett. **84**, 3897 (2004).
[3] K. J. Lee, O. Redon, and B. Dieny, Appl. Phys. Lett. **86**, 022505 (2005).
[4] P. M. Braganca, I. N. Krivorotov, O. Ozatay, A. G. F. Garcia, N. C. Emley, J. C. Sankey, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, Appl. Phys. Lett. **87**, 112507 (2005).
[5] S. Mangin, D. Ravelosona, J. A. Katine, M. J. Carey, B. D. Terris, and E. E. Fullerton, Nature Mater. **5**, 210 (2006).
[6] S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsukura, and H. Ohno, Nature Mater. **9**, 721 (2010).
[7] H. Meng and J.-P. Wang, Appl. Phys. Lett. **88**, 172506 (2006).
[8] T. Kishi, H. Yoda, T. Kai, T. Nagase, E. Kitagawa, M. Yoshikawa, K. Nishiyama, T. Daibou, M. Nagamine, M. Amano, S. Takahashi, M. Nakayama, N. Shimomura, H. Aikawa, S. Ikegawa, S. Yuasa, K. Yakushiji, H. Kubota, A. Fukushima, M. Oogane, T. Miyazaki, and K. Ando, IEDM Tech. Dig. 309 (2008).
[9] A. Manchon, S. Pizzini, J. Vogel, V. Uhlîr, L. Lombard, C. Ducruet, S. Auffret, B. Rodmacq, B. Dieny, M. Hochstrasser, and G. Panaccione J. Appl. Phys. **103**, 07A912 (2008).
[10] B. Rodmacq, A. Manchon, C. Ducruet, S. Auffret, and B. Dieny, Phys. Rev. B **79**, 024423 (2009).

Perpendicular Magnetic Anisotropy in Co/Pd Layer with TiO_2 Seed Layer on the Various Substrates

Mool-Bit Kang, Jungbum Yoon, Jeong-Seop Lee, and Chun-Yeol You*

Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received 20 December 2012, Received final form 8 February 2013, Accepted 12 February 2013)

We investigate the perpendicular magnetic anisotropy in TiO_2/Co/Pd on GaAs(100), MgO(100), MgO(111), Si(100), and glass substrates. We find that the roughness of TiO_2 depends on the O_2 partial pressure in the magnetron sputtering process. The perpendicular magnetic anisotropies are found in all substrates with TiO_2 seed layer, and the perpendicular magnetic anisotropy of Co/Pd system is insensitive on the type of the substrate when the thickness of TiO_2 seed layer is thicker than 5 nm. However, MgO(111) substrate promotes TiO_2 rutile (111) structure, and it causes largest perpendicular magnetic anisotropy in TiO_2/Co/Pd(111) structures.

Keywords : perpendicular magnetic anisotropy, Co/Pd, TiO_2