

# 수직자기이방성을 갖는 MgO/Co/Pd 구조에서 열처리에 의한 스핀-궤도 결합 변화에 대한 연구

김민석\*, 김상훈, 홍종일

연세대학교 공과대학 신소재공학과, 서울특별시 서대문구 신촌동 134, 120-749

## 1. 서론

산화물/강자성체/비자성 금속 구조의 박막은 계면에서 나타나는 수직자기이방성, 스핀-궤도 토크 효과, Dyaloshinskii-Moriya interaction (DMI)와 같은 물리적 현상들로 인하여 자구벽 메모리 소자와 같은 응용분야에서 많은 주목을 받고 있다.[1-3] 최근에는 외부자기장의 보조 없이 전류에 의하여 자구벽의 속도가 수백 m/s에 이르며 낮은 임계 전류를 갖는 연구 결과가 보고되었다.[4] 이러한 스핀-궤도 토크 효과와 DMI는 계면에서의 스핀-궤도 결합과 밀접한 관련이 있으므로 계면의 구조는 이와 같은 물리적 현상에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 하지만 계면의 구조변화에 따른 효과에 대해서는 연구가 부족한 상황이다. 본 발표에서는 수직자기이방성을 갖는 MgO/Co/Pd 구조에서 열처리에 의한 계면의 구조 변화가 스핀-궤도 결합에 미치는 영향에 대하여 논의한다.

## 2. 실험방법

MgO 5/Co t/Pd 3(nm) 구조의 박막은 UHV DC-magnetron 스퍼터링 시스템( $<2.0 \times 10^{-9}$  torr)을 이용하여 증착하였으며, Co 층의 두께를 0.8 nm부터 2.4 nm까지 0.2 nm씩 증가시켰다. 열처리 조건에 따른 수직자기이방성 및 계면 구조의 변화를 관찰하기 위하여 200, 300, 400 °C에서 1시간 동안 4.5 kOe의 외부 자기장을 가하여 열처리를 진행하였다. 열처리를 통한 자성 특성의 변화는 VSM (vibrating sample magnetometer)을 통하여 확인하였으며, XMCD (X-ray magnetic circular dichroism)측정은 포항가속기연구소 2A 빔라인을 이용하여 측정을 진행하였다.

## 3. 실험결과

MgO/Co/Pd 구조에서 열처리 후 나타나는 수직자기이방성의 변화는 자화용이축 및 곤란축에서 측정된 hysteresis loop 면적의 차이를 통해 관찰하였다.[5] 그 결과, 열처리 온도가 증가함에 따라 보다 강한 수직자기이방성이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 열처리 온도가 300 °C에서는 포화 자화가 약 35%정도 높게 나타나는 반면에 열처리 온도가 400 °C로 높아진 경우에는 가장 강한 수직자기이방성을 보였다. 그러나 포화 자화는 오히려 열처리 전 (1,400 emu/cc)보다 작은 1,200 emu/cc를 가지는 것을 확인하였다. 이는 높은 열처리로 인하여 Co/Pd 계면에서 CoPd alloy형성의 결과이며, CoPd (200) peak이 검출된 XRD측정 결과가 이를 뒷받침 한다. 또한 XMCD측정에서 궤도 모멘트의 기여는 sum rule을 통하여 구하였으며, 궤도 모멘트의 기여가 스핀-궤도 결합과 밀접한 관련이 있다는 것은 많은 보고가 되어있다.[6-8] 열처리에 의한 궤도 모멘트 기여의 변화를 확인한 결과, 열처리 온도가 증가함에 따라 높은 값을 가지는 것을 관찰하였으며, 열처리 온도 400 °C의 경우 열처리 전과 비교하여 궤도 모멘트 기여가 160% 높아진 것을 확인하였다.

## 4. 고찰

열처리 온도를 400 °C로 높인 경우, 300도에 비하여 포화 자화가 급격히 감소하는 것은 두 가지 원인으로 볼 수 있다. 하나는 XRD측정 결과에서도 확인한 Co/Pd 계면에서의 CoPd alloy형성에 의한 것이고 다른 하나

는 MgO/Co 계면에서 Co 산화물이 생성되어 나타나는 결과로 보인다. 또한 수직자기이방성은 계면과 체적에 의한 영향으로 나누어 볼 수 있으며, 본 연구에서는 열처리 후 자기탄성 효과로 인하여 체적의 기여가 급격히 변하여 강한 수직자기이방성을 보이고 있다. 자기탄성 효과는 열처리 후 XRD 측정결과 MgO (100) peak의 이동을 통하여 Co 층과 MgO층에서 계면방향으로의 변형율이 같다는 가정 하에 구하였다.[9] 그 결과 열처리 온도가 증가함에 따른 자기탄성이방성의 차이는 수직자기이방성의 체적 기여도 차이와 비슷한 결과를 얻었으며, 이는 열처리에 따른 수직자기이방성의 변화가 자기탄성 효과에 의한 것임을 알 수 있다. XMCD 측정 결과도 마찬가지로 열처리 온도 400 °C에서 가장 높은 궤도 모멘트 기여가 나타나고 있다. 따라서 400 °C 열처리 시편의 계면에서 강한 스핀-궤도 결합이 형성되어 있음을 알 수 있다. 그러나 열처리 온도 400 °C에서는 계면에서 CoPd alloy가 형성되기 때문에 높은 궤도 모멘트 기여를 갖지만 높은 스핀-궤도 토크를 갖는지는 추가적으로 확인이 필요하다.

## 5. 결론

열처리 효과에 따른 MgO/Co/Pd 구조에서 계면의 상태변화가 수직자기이방성 및 스핀-궤도 결합에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 열처리 온도가 증가함에 따라 수직자기이방성 및 스핀-궤도 결합이 보다 강해지는 것을 확인하였다. MgO/Co/Pd 구조 및 열처리 효과가 외부 자기장이 없는 스핀-궤도 토크에 의하여 전류만으로 자화반전이 가능한 자구벽 메모리 소자 및 p-MTJ 등에 응용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 6. 참고문헌

- [1] E. Martinez et al Appl. Phys. Lett. **103**, 072406 (2013)
- [2] S. Emori et al. Nature Mater. **12**, 611 (2013)
- [3] K. Garello et al. Nature Nano. **8**, 587 (2013)
- [4] K.-S. Ryu et al. Nature Nano. **8**, 527 (2013)
- [5] P. Bruno and J.-P. Renard Appl. Phys. A **49**, 499 (1989)
- [6] C. T. Chen et al. Phys. Rev. Lett. **75**, 152 (1995)
- [7] G. Y. Guo et al. Phys. Rev. B **T0**, 3861 (1994)
- [8] R. Wu, D. Wang, and A. J. Freeman Phys. Rev. Lett. **73**, 1994 (1994)
- [9] G. H. O. Daalderop et al. Phys. Rev. B **41**, 11919 (1990)