

# 양성자 조사에 의해 환원된 Co/Pd superlattice의 비정상 pseudomorphism과 그에 따른 계면에서의 스핀-궤도 결합의 강화

김상훈<sup>1\*</sup>, 이수길<sup>1</sup>, 이현휘<sup>2</sup>, 박성훈<sup>3</sup>, 박재훈<sup>3</sup>, 이한구<sup>2</sup>, 홍종일<sup>1</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 신소재 공학과, 서울시 신촌동, 120-749

<sup>2</sup>포항가속기연구소, 포항시, 790-784

<sup>3</sup>포항공과대학교 물리학과, 포항시, 790-784

## 1. 서론

강자성체/귀금속 구조의 계면에서 발생하는 스핀-궤도 상호작용은 수직자기 이방성을 비롯하여 최근 실험적으로 관측되고 있는 스핀-궤도 토크 현상이나 Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI)과 같은 다양한 물리적 현상의 근원이 되고 있다[1,2]. 최근 스핀-토크 현상을 이용한 전류 구동형 스핀트로닉스 소자들의 자화방향을  $\sim 10^6$  A/cm<sup>2</sup> 이하의 낮은 전류 밀도를 이용하여 효과적으로 제어하는데 이들 현상이 중요한 역할을 하는 것으로 확인되면서 집중적인 연구가 이루어지고 있다. 스핀 궤도 결합은 1 nm이하의 얇은 강자성체 박막과 높은 전자밀도를 갖는 귀금속 박막이 이루는 계면의 상태에 매우 민감한 것으로 알려져 있다. 그러나 스핀-궤도 결합의 극대화를 위한 인위적인 계면 제어에 관한 연구는 부족한 상황이다. 본 연구는 기존에 보고한 양성자 조사법에 의한 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Pd superlattice의 환원 현상을 이용하여 계면에서의 스핀-궤도 결합을 극대화 할 수 있음을 보고한다. 이는 열처리가 아닌 상온에서의 효과적인 계면 제어를 통해 스핀-궤도 결합을 극대화 할 수 있음을 보여주는 중요한 결과이다.

## 2. 실험방법

[Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> t nm (t=0.2, 0.6, 0.8, 1.0, 1.4, 1.7)/Pd 1.0 nm]<sub>10</sub> 및 [Co t nm (t=0.2, 0.4, 0.5, 0.7, 0.8, 1.0)/Pd 1.0 nm]<sub>10</sub> 인공격자는 초고진공 DC 마그네트론 스퍼터를 이용하여  $4.0 \times 10^{-9}$  torr 이하의 진공에서 증착되었다. 양성자 플라즈마는 2.5 GHz의 microwave power로 형성되었고, 300 eV의 가속전압을 이용하여 산화 인공격자에 조사되었다. X-ray magnetic circular dichroism (XMCD)과 in-plane incidence x-ray diffraction (GIXRD) 실험은 포항 가속기 연구소의 2A 와 5A 빔라인에서 진행하였다.

## 3. 실험결과

우리는 상자성을 갖고 있는 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Pd superlattice에 양성자를 가속시키면 결합 없이 강자성을 띤 Co/Pd superlattice로 상변화 시킬 수 있음을 보고한 바 있다[3]. 특히 환원된 Co/Pd superlattice의 경우 기존 Co/Pd superlattice보다 더 강한 수직자기이방성을 갖고 있음이 실험적으로 확인되었다. 본 연구에서는 강화된 수직자기이방성이 환원된 Co 층과 Pd 층이 이루고 있는 계면의 강한 스핀-궤도 상호작용에 의한 것임을 실험적으로 증명하고자 한다. 투과 전자 현미경의 Fourier filtered image (FFI)의 분석 결과는 환원된 Co 가 5 Å의 두께에서 Pd과 pseudomorphism을 갖고 있음을 보여주었다. Co와 Pd의 격자상수가 다른 것을 비추어 볼 때, 이 결과는 Co와 Pd층의 격자 변형이 형성되어 있음을 의미한다. Superlattice가 갖는 격자 변형은 GIXRD를 통해 정량적으로 계산되었다. 환원된 Co 층은 수직자기이방성이 가장 강하게 나타나는 5 Å의 두께에서 Pd 층으로부터 인장응력(tensile stress)을 받아 약 9%의 격자변형을 보이고 있으며 이 값은 Co와 Pd의 격자상수차이와 동일하다. 기존의 Co/Pd superlattice는 Pd 층 역시 Co 층에 의해 영향을 받아 압축 응력(compressive stress)으로 인해 격자

변형이 생겨 두 원소의 격자상수차이보다 적은 격자변형을 갖게 된다. 즉, 환원된 Co/Pd superlattice의 Co 층은 일반적인 Co/Pd superlattice의 그것에 비해 더 큰 응력을 받고 있음을 의미한다. 또한, 격자변형의 두께 의존성 분석을 통해 계면에서의 격자변형이 갖는 균일성(coherency)이 사라지는 임계 두께가 환원된 Co/Pd superlattice에서 일반적인 Co/Pd superlattice보다 약 35% 더 두꺼운 것을 확인하였다. 계면에서의 극대화된 격자변형은 superlattice가  $\sim 10^6$  erg/cc 크기를 갖는 자기탄성이방성을 갖게 하므로 환원된 Co/Pd superlattice의 수직자기이방성이 DC 스퍼터링이나 thermal evaporation 증착법으로 제작된 일반적인 경우보다 상대적으로 큰 것으로 해석된다. 이에 더하여, 자기이방성의 두께의존성 분석을 통해 계면자기이방성을 정량적으로 계산할 수 있었으며 계면에서의 자기탄성이방성과 더불어 계면이 갖는 특성 중의 하나인 격자의 비대칭성으로 인한 Néel anisotropy 역시 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이는 환원된 Co/Pd superlattice가 깨끗한 계면을 갖고 있음을 확인한 본 연구팀의 기존 결과와 일맥상통한다. 계면에서 발생하는 위와 같은 차이로 인해 환원된 Co/Pd superlattice는 일반적인 경우보다 약 30% 증가된 스핀-궤도 결합을 갖는 다는 것을 XMCD 측정을 통해 확인할 수 있었다.

#### 4. 고찰

이러한 비정상적인 pseudomorphism은 간단한 재배열 모델에 의해 설명될 수 있다. 환원이 되면서 Co 원자들은 산소의 빈자리(vacancy)를 채우게 되는데 이 과정에서  $\text{Co}_3\text{O}_4$ 의 스피넬(spinel)구조로 인해 Pd 층을 씨앗층 삼아 pseudomorphism을 갖게끔 재배열 되는 것으로 해석할 수 있다. 이때의 Pd층이 갖는 표면의 단위 구조(unit mesh) 크기가  $\text{Co}_3\text{O}_4$ 와 거의 비슷하기 때문에 Pd층은 superlattice안에서 압축 응력을 거의 받지 않은 상태이므로 환원 과정 중에 재배열 된 Co 원자들은 마치 견고한 Pd substrate에서 성장한 것과 같은 효과를 보이게 되는 것이다.

#### 5. 결론

우리는 양성자 조사에 의한 환원법이 자성 다층박막의 계면에서 발생하는 스핀-궤도 결합을 인위적으로 제어시킬 수 있는 새로운 방법이 될 수 있음을 보였다. 우리의 연구결과는 앞서 설명한 스핀-궤도 결합에 의한 스핀-궤도 토크 현상이나 skyrmion과 같은 계면에서의 독특한 스핀구조에 대한 연구에 접목될 수 있음을 의미하며, 이 같은 현상들을 이용한 새로운 스핀트로닉스 소자 개발에의 응용이 기대된다.

#### 6. 참고문헌

- [1] I. M. Miron, *et al.* Nature Mater. 10, 419 (2011).
- [2] J. Sampaio, V. Cros, S. Rohart, A. Thiaville and A. Fert, *Nature Nanotech.* 8, 839 (2013).
- [3] S. Kim, S. Lee, J. Ko, J. Son, M. Kim, S. Kang and J. Hong, *Nature Nanotech.* 7, 567 (2012).