

## Element- and depth- resolved exchange bias: likely exchange bias origin

이 기 석<sup>1\*</sup>, 김 상 국<sup>1</sup>, J. B. Kortright<sup>2</sup>, 장성호<sup>1,4</sup>, 김광윤<sup>4</sup>, 신성철<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 재료공학부

<sup>2</sup>미국로렌스버클리국립연구소

<sup>3</sup>한국과학기술원 물리과 및 스핀정보물질연구단

<sup>4</sup>한국과학기술연구원 나노소자연구센터

### 1. 서 론

강자성과 반강자성 재료를 접합할 때 자기이력 곡선의 대칭 중심이 자기장이 0인 지점에서 자기장 축 방향으로 평행하게 이동하는 현상, 즉 교환 바이어스(exchange bias) 현상이 나타난다. 이러한 교환 바이어스 현상은 두 자성체의 접합 계면에서의 강한 상호교환결합력(exchange force)에 의해서 발생한다고 알려져 있다. 1959년 Meiklejohn 과 Bean<sup>1</sup>에 의하여 처음으로 발견된 이 현상은 오늘날 자성을 이용한 기록 매체의 자기 헤드와 같은 다층 박막 소자에 적용되면서, 특히 비 휘발성의 자기메모리 소자에 응용할 수 있기 때문에 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 강자성과 반강자성 박막의 단거리 상호 교환결합력에 의한 교환바이어스의 명확한 이해가 부족하며 이를 밝히기 위해 계면에서의 원자 구조, 스핀 구조, 계면 및 깊이에 따른 자화반전에 대한 관찰이 필요하다. 하지만 실험적으로 이러한 관찰을 수행하기가 매우 어렵기 때문에 이에 대한 실험데이터는 거의 전무한 실정이다. 다만 최근 방사광을 이용한 PEEM (Photoemission electron microscopy)의 국부자구 관찰결과가 반강자성과 강자성간의 강한 상호 작용을 하고 있음을 보고하고 있다<sup>2,3</sup>. 본 연구에서는, 반강자성 박막과 강자성 박막의 계면 스핀구조와 각 층의 계면에서의 자화반전을 독립적으로 관찰하고 이를 바탕으로 교환바이어스의 새로운 모델을 제시하고자 한다.

### 2. 실험 방법

6 타겟 DC 스퍼터링 장비로 Si 기판위에 SiO<sub>2</sub>(150nm)/Ta(5nm)/NiFe(8nm)/FeMn(20nm)/Co(3.5nm)/Pd(1.5nm)의 구조를 가지는 강자성/반강자성/강자성 박막을 제조하고 또 다른 고진공 챔버에서 두 강자성층 간의 반평행(anti-parallel) 교환 바이어스를 형성시켜 방사광 연 X선을 이용한 광자기 Kerr 회전 자기이력곡선을 측정하였다. 연 X선의 에너지를 각 원소의 흡수단 근처 에너지로 조절하여 원소 선택적인, 그리고 입사각을 조절함으로써 깊이에 따른 광자기 Kerr 회전 자기이력곡선을 측정하였다. 이러한 방법을 이용하여 Ni, Fe, Co, Mn의 원소 선택적인 그리고 각 박막층의 계면에서의 자화반전 자기이력곡선을 측정하였다. Kerr회전 자기이력곡선의 실험 결과를 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하였다<sup>4</sup>. 이 결과를 바탕으로 강자성과 반강자성층 사이에 완충층을 삽입하여 교환바이어스 크기와 항자력을 계산하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

방사광 연 X선을 이용한 광자기 Kerr 회전 자기이력곡선으로부터 각 원소와 계면에서의 자화반전을 관찰한 결과 Fe의 uncompensated 스핀 구조가 FeMn의 양 계면에서 명확하게 관찰 되었다. 또한 uncompensated Fe층의 자화반전은 Co와 NiFe의 자화반전시와 같은 교환바이어스 크기를 가짐을 관찰할 수 있었다. 이것은 강자성층의 자화 반전시 강자성/반강자성의 계면에서 반강자성층의 uncompensated 스핀층도 함께 자화반전을 하고 있음을 의미하는 것으로써, 기존의 교환바이어스 모델과는 다른 결과를 얻었다. 기존의 교환바이어스 모델은 반강자성의 계면 uncompensated 스핀은 강자성층에 일방향 이방성을 주기 위하여 자화 반전시 고정되어야 한다는 가설을 하고 있지만 본 실험 결과는 이 가설과는 확연하게 다름을 알 수 있다. 이러한 실험의 결과로부터 반강자성 계면의 uncompensated 완충층이 존재하며 이 층이 교환바이어스의 원인을 설명할 수 있는 중요한 단서라고 결론을 내리고 새로운 모델을 제시 하였다.

이 모델의 핵심은 교환바이어스의 구조에서 강자성층과 접한 반강자성층 사이에 강자성 특성을 갖는 새로운 완충층이 형성되어 강자성층과 교환결합을 이루고 있다는 것이다. 특히 강자성층의 자기 이방성을 완충층의 자기 이방성과 완충층과 강자성층과의 교환 결합력으로 설명하였다.

위의 모델을 기초로 자기이력곡선을 시뮬레이션한 결과, 교환바이어스의 크기는 반강자성층과 완충층의 교환 결합력에 지배적인 영향을 받으며 강자성층의 항자력은 완충층과 강자성층의 교환 결합력에 의해서 결정된다는 것을 확인하였다. 이 새로운 모델은 기존의 모델이 설명하지 못했던, 교환바이어스 자기장 세기의 실험치가 이론치보다 수십에서 수백 배 작게 나타나는 현상을 설명할 수 있다. 즉 실험에서 관찰되는 교환바이어스의 크기는 반강자성층과 강자성층 간의 교환 결합력이 아니라 이보다 작은 크기를 갖는 반강자성과 완충층사이의 결합력에 의한 것임을 모델을 통해서 확인하였다. 또한 자장을 진동하면서 냉각하였을 때 교환바이어스 자기장의 세기는 사라지지만 항자력이 존재하는 실험 결과를 반강자성층과 완충층간의 교환결합력이 존재하지 않아서 교환바이어스 크기가 없더라도 강자성층과 완충층간의 교환 결합력 때문에 항자력이 나타나는 계산 결과로부터 설명할 수 있었다.

#### 4. 결 론

반강자성/강자성 박막의 단거리 상호교환결합력에 의한 교환 바이어스 현상은 각층의 계면에서의 스핀 구조와 자화반전을 관측함으로써 명확한 원인과 메커니즘을 이해할 수 있다. 본 연구에서는 방사광 연 X선의 원소 선택성과 깊이 분해능을 이용하여 NiFe/FeMn/Co 구조의 반평행 교환바이어스 박막의 광자기 Kerr회전 자기이력곡선을 측정하였다. 이 결과로부터 교환 바이어스 현상의 원인에 대한 새로운 단서를 발견하였다. 계면에서의 Fe uncompensated 스핀의 존재를 확인하였으며 이 층의 자화반전이 접하고 있는 강자성층과 함께 자화반전이 이루어지고 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 반강자성층 내의 완충층을 가정한 새로운 교환바이어스 모델을 제시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 기존의 이론에서 교환바이어스 크기가 이론치보다 수십에서 수백 배 작게 나타나는 현상을 설명하지 못했지만 이 모델은 uncompensated 스핀의 완충 작용으로 이러한 현상을 설명할 수 있었으며 완충층과 강자성층의 교환 결합력으로 강자성층의 항자력을 설명할 수 있었다. 본 연구는 반강자성 계면에서의 완충층을 고려한 이 모델이 교환바이어스의 크기와 항자력의 크기를 모두 설명할 수 있는 새로운 모델을 제시한다.

#### 5. 참고 문헌

- [1] Meiklejohn and Bean, Phys. Rev. **102**, 1413 (1956)
- [2] F. Nolting et al., Nature (London) **405**, 767 (2000)
- [3] H. Ohldag et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 2878 (2001)
- [4] Z. Q. Qiu and S. D. Bader, Rev. Sci. Instrum. **71**, 1243 (2000)