

교환바이어스 원인과 형성기구

김상국¹, J. B. Kortright², 정종률³, 장성호^{1,4}, 김광윤⁴, 신성철³

¹서울대학교 재료공학부

²미국로렌스버클리국립연구소

³한국과학기술원 물리과 및 스핀정보물질연구단

⁴한국과학기술연구원 나노소자연구센터

1. 서론

교환바이어스(exchange bias)현상은 강자성과 반강자성의 접합계면에서 강한 상호교환결합력(exchange force)에 의해 발생하는 것으로 알려져 왔다. 이 현상은 1956년 Meiklejohn과 Bean[1]에 의해 코발트 산화(CoO)층으로 둘러 쌓인 Co 입자에서 발견된 이후, 최근에 들어 더욱 많은 관심 속에 연구되어왔다. 이는 강자성/반강자성박막의 교환바이어스 특성을 이용하여, 강자성박막의 스핀방향을 고정시킬 수 있기 때문이다. 잘 알려진 바와 같이 하드드라이브의 고밀도 자기헤드는 두 강자성박막의 상대적인 스핀 방향(같은 방향과 반대방향)에 따른 자기저항비를 이용하여 자구비트를 판독한다. 이때, 강자성박막의 스핀방향을 고정하기 위해 바로 반강자성박막을 사용한다. 또한, 이 특성을 이용하여 비휘발성 자기메모리소자에 응용하기도 한다. 이와 같이 경제적 가치를 갖는 기술적인면과 교환바이어스라는 독특한 자기특성의 학문적 가치 때문에 세계적으로 많은 과학자들과 기술자들이 이 분야에 집중적인 투자와 연구를 하고 있다. 특히, 학문적인 면에서는 교환바이어스현상의 정확한 원인과 형성 기구에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 강자성과 반강자성박막의 단거리 상호 교환결합력에 의한 교환바이어스 원인 규명은, 계면의 원자구조, 자기구조, 및 단원소 혹은 각 자기층의 자화반전에 대한 실험데이터 부재로 더 이상의 진척을 보지 못하고 있다. 다만, Mauri et al. (1987) [2], Malozemoff et al. (1987) [3], Koon (1997) [4], Takano et al. (1997) [5] 의 기존 모델들과 최근의 방사광 가속기를 이용한 PEEM(photoemission electron microscopy)의 국부자구 관찰결과가 반강자성과 강자성간의 강한 상호결합력을 갖고 자구형태를 형성하고 있음을 뒷받침하고 있을 뿐이다[6, 7]. 본 연구에서는, 반강자성박막과 강자성박막의 계면 스핀구조와 각 층의 자화반전을 독립적으로 관찰함으로써, 그리고 교환바이어스 형성과정을 in-situ 관찰함으로써 교환바이어스의 실체를 이해하고, 기존의 모델보다 발전된 모델을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

시편은 6 타겟 DC 스퍼터링장비로 NiFe/FeMn 박막을 제조하고, 이 기판 위에 Co 강자성박막층을 증착하며 자화반전을 in-situ 관찰하기 위해, 이 반강자성박막을 초고진공 자기광측정 챔버(UHV SMOKE chamber)로 옮겨, 초고진공상태에서 Co 증착 및 자화반전 관찰, FeMn 반강자성박막의 Blocking 온도 이상에서 field cooling, 혹은 잔류자화 상태에서 시편의 온도를 냉각하며 교환바이어스 형성과정을 관찰하였다.

교환바이어스 형성과정을 관찰한 후 제조한 시편 ...NiFe/FeMn/Co/Pd 박막은 두 강자성박막 NiFe과 Co의 잔류자화 방향이 서로 반대인 상태에서 Blocking 온도에서 냉각하여 일방향 이방성을 FeMn의 양쪽 계면에서 반대로 형성시켰다. 이 때, 교환바이어스 field shift는 서로 반대방향이 되어, NiFe과 Co층의 자화이력곡선이 중앙($H=0$)에서 서로 반대쪽으로 형성된다. 이 시편을 이용하고, 방사광 가속기의 특정원소 선택성을 이용하여 Co, Ni, Fe, Mn의 자화이력곡선을 측정하였다. 또한 소프트 X-선의 입사각을 3-10도 까지 조절하여 FeMn의 양쪽 각 계면에서 uncompensated 스핀층의 자화이력곡선을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

초고진공 챔버에서, 제작된 NiFe/FeMn/Co 삼층 자기박막을 FeMn박막의 Blocking 온도까지 올려 NiFe과 Co강자성박막의 잔류자화방향이 서로 반대방향인 상태에서 냉각하여 일방향이방성이 서로 반대인 스핀구조를 얻을 수 있었다. 이 결과는, 교환바이어스를 형성하는데 있어서 Blocking 온도이상에서 냉각시 강자성박막의 스핀 방향이 반강자성박막의 스핀방향을 좌우하며, 이 스핀 구조에서 온도를 더욱 낮추면 반강자성박막의 스핀방향이 고정된다. 이 고정된 스핀들이 다시 강자성박막의 스핀방향을 고정시키는 역할을 함으로서 실내온도에서 교환바이어스현상을 보임을 알 수 있었다.

이와 같이 교환바이어스 형성 과정을 조사하고, 그 원인을 조사하기 위해, 방사광 소프트 X-선의 특정원소 선택성을 이용, Fe, Ni, Mn, Co 및 각 계면에서의 자화반전이력곡선을 관찰했다. 이 결과를 보면, Fe의 *uncompensated* 스핀구조가 FeMn의 양 계면에서 분명히 관찰되었고, 이 스핀층은 FeMn의 bulk 스핀구조와 다름을 보였다. 또한 자화이력곡선에서 Co와 NiFe의 자화반전시와 비슷한 교환바이어스 자기장(exchange bias field)을 보였다. 이는 NiFe과 Co강자성박막의 자화반전시 Fe의 *uncompensated* 스핀층도 함께 반전됨을 보여주는 것으로써, 기존의 교환바이어스 모델과 다름을 보여준다. 즉, 기존의 모델은 적어도 반강자성의 계면 *uncompensated* 스핀은 강자성층에 일방향 이방성을 주기 위해 자화반전시 고정되어야 한다는 가설을 제시하고 있다. 하지만, 본 실험결과는 강자성층과 반강자성층의 *uncompensated* 스핀들이 함께 자화반전함을 보여 기존의 모델이 수정되어야 함을 알 수 있었다. 기존의 교환결합형 강자성/반강자성의 bulk 스핀구조를 가정했을 때, 교환바이어스 자기장의 세기가 실험치의 수 십에서 백배까지 차이가 나는 것은 계면의 완충층을 고려하지 않았기 때문이다. 즉, FeMn의 *uncompensated* 스핀층은 bulk 스핀구조와는 달라, 서로 다른 스핀구조를 갖는 강자성층과 반강자성층 사이에서 완충 역할을 하는 것이다. 즉, 교환바이어스의 실험치는 반강자성박막과 강자성박막의 교환결합력에 의한 것이 아니고, 완충층과 bulklike 반강자성층의 교환결합력임을 말해 준다.

4. 결론

반강자성/강자성 박막의 단거리 상호교환결합력에 의한 교환바이어스 현상은 상호계면에서의 각층의 스핀구조와 자장의 변화에 의한 자화반전을 직접관찰 했을 때 정확한 원인을 이해 할 수 있다. 본 연구에선, 방사광 가속기의 특정원소 선택성이란 독특한 특성을 이용하여, 한층의 반강자성박막에 양쪽 계면에 접한 서로 다른 강자성박막(NiFe과 Co)에 일방향 이방성을 반대 방향으로 형성하여, 교환바이어스현상을 이해하는데 결정적인 단서를 제공한다. 특히, 반강자성박막의 계면에서의 Fe *uncompensated* 스핀의 존재를 확인하였으며, 이 스핀구조가 강자성박막의 자화반전시 함께 스위칭하는 것을 관찰하였다. 이는 반강자성과 강자성 박막사이에 두 박막의 bulk 성질과는 다른 층이 형성되어 바로 이 중간층이 반강자성층과 강자성층의 서로 다른(강자성 스핀 배열과 반강자성 스핀배열)스핀구조를 완충시키는 역할을 함을 할 수 있다. 또한, 본 실험결과는 교환바이어스현상에 의한 field shift의 실험값이 각각 자성층의 bulk 스핀배열을 모델로 하였을 때의 이론값보다 수 십배(많게는 약 백배) 적게 관찰되는 이유를 설명할 수 있다.

5. 참고문헌

- [1] Meiklejohn and Bean, Phys. Rev. **102**, 1413 (1956).
- [2] D. Mauri, H. C. Siegmann, P. S. Bagus, and E. Kay, J. Appl. Phys. **62**, 3047 (1987).
- [3] A. P. Malozemoff, Phys. Rev. B **35**, 3679 (1987).
- [4] N. C. Koon, Phys. Rev. Lett. **78**, 4865 (1997).
- [5] K. Takano et al., Phys. Rev. Lett. **79**, 1130 (1997).
- [6] F. Nolting et al., Nature (London) **405**, 767 (2000).
- [7] H. Ohldag et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 2878 (2001); H. Ohldag et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 247201 (2001).