

교환바이어스 된 NiFe/FeMn 구조의 방위각에 따른 자화 역전과 rotatable anisotropy

최혁철^{1*}, 유천열¹, 김기연²

¹인하대학교 물리학과, ²한국원자력연구원

1. 서론

교환 바이어스는 강자성 (F: ferromagnet)과 반강자성 (AF: antiferromagnet) 사이의 계면에서 비보상 AF 스핀(uncompensated spin)과 F 스핀 사이의 교환 결합(exchange coupling) 의해 일어나는 현상으로 거시적으로 자기장 축을 따라 원점에 대한 자기이력곡선(M-H loop)의 변위 및 폭의 증가가 나타나며 교환바이어스 세기와 보자력의 증가를 동반 한다 [1]. 교환 바이어스된 F/AF 구조를 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 측정을 통하여 교환 결합력에 대한 자기이방성에너지 특성을 분석할 경우 교환 자기이방성에너지 외의 isotropic resonance field 가 아래 (negative)로 이동하는 현상이 관측되는데 이를 rotatable anisotropy 라고 한다 [2-3]. 하지만 rotatable anisotropy 원인은 아직까지도 명확하게 규명되지 않고 있다. 본 연구에서는 Vector-MOKE (Magneto-Optical Kerr Effect) 측정으로 NiFe/FeMn 2층 구조를 갖는 교환바이어스 된 박막들의 자기이방성 및 자화 역전(magnetization reversal)을 인가 자기장의 방위각에 따른 자기이력곡선들을 통하여 분석하였다.

2. 실험방법

교환 바이어스 된 NiFe/FeMn 구조를 제작하기 위해서 Si 기판 위에 강자성 NiFe 두께를 5 nm로, FeMn 두께는 교환바이어스가 나타나는 임계 두께인 5 nm로 하였다. 그리고 이들 2층 박막 구조의 결정 성장을 증진시키기 위해서 씨앗층으로 Ta(5 nm)/Cu(5 nm)를 증착하였으며 시료들의 산화를 방지하기 위해 Ta(5 nm)로 방지막 처리를 하였다. 모든 시료의 제작은 인가된 자기장(~300 Oe)안에서 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 증착하였다. 제작된 박막 시료들을 vector-MOKE로 반시계방향(counterclockwise, CCW)으로 방위각을 5도씩 회전하면서 longitudinal 과 transverse MOKE를 측정한 후 다시 시계방향(clockwise, CW) 회전으로 측정을 진행하여 각각의 방위각에 따른 자기장에 평행한 자기이력곡선과 박막 면내에서 수직(transverse)한 자기이력곡선을 구하였다. 교환 바이어스된 NiFe/FeMn의 자기이력곡선을 방위각의 변화에 따라 5회씩 반복 측정하여 training effect가 사라진 것을 확인한 후 자화곡선이 자기장축과 만나는 두 보자력값 (H_{LC} , H_{RC})으로부터 교환바이어스 값(H_{ex})과 보자력(H_C)을 각각 $H_{ex}=(H_{LC}+H_{RC})/2$, $H_C=(H_{RC}-H_{LC})/2$ 으로 계산하였다. 이것으로부터 자화의 pinning direction (PD)과 자화 역전의 위상 및 자기이방성을 분석하였다.

3. 결과 및 논의

그림 1은 교환 바이어스 된 NiFe/FeMn 시료에서 방위각을 반시계방향(CCW)과 시계방향(CW)으로 회전시키면서 각각의 방위각에 대한 MOKE 신호로부터 얻어낸 교환바이어스 값이다. 반시계방향과 시계방향에 대한 교환바이어스 값들은 일치하지 않으며 중심(180도)으로부터 좌우 비대칭적인 형태를 나타낸 반면 보자력의 경우 비대칭성이 명확하지 않다. 그리고 0도와 한 바퀴 회전한 360도에서의 교환바이어스 값이 서로 다르다. 이는 각각의 방위각에서 자기이력곡선 측정이 끝났을 때 F 자화방향의 일방향 자화용이축(PD)이 반시계 방향과 시계 방향 사이에서는 서로 다른 각도 의존성을 보여준다. 그리고 pinning direction 회전의 손대칭(chirality) 변화는 변화된 방위각을 갖는 외부 자기장에 의해 F의 자화가 역전될 때 교환결합에 의해 비보상 AF 스핀들에 일정한 토크가 가해지게 되는데 외부자기장의 방향이 기존의 PD 방향과 다를 경우 pinned 비보상 AF 스핀들

이 새로운 local energy minimum으로 thermally activated 비가역적 전이를 일으켜 그 결과 PD의 변화가 일어난다. 이러한 실험 결과는 교환바이어스 세기(H_{ex})와 연관된 pinned 비보상 AF 스핀 구조가 일반적으로 여기는 static, fixed 구조가 아니라는 사실을 보여준다.

그림 2는 방위각의 변화에 따른 transverse 자기이력곡선의 변화를 나타낸다. 첫 번째로 모든 방위각에서 F의 자화가 180도 이내에서 회전이 일어나며 360도 회전은 관측되지 않았다. 이는 일축 자기이방성에너지(uniaxial anisotropy)와 일방향 자기이방성에너지(unidirectional anisotropy)의 상대적인 크기에 따라서 달라진다고 보고된 바 있다. 두 번째로 반시계방향의 자화역전 위상은 0도에서 (-)이나 360도에서는 (+)로 바뀌어 있는데 이는 특정한 임계각도에서 위상 전이가 일어남을 알 수 있으며 시계방향의 데이터에서도 마찬가지로 위상이 반대로 나타난다. 그리고 두 회전방향의 측정에서 반시계방향 측정에서는 160도에서 165도로 방위각이 진행될 때 자화역전 위상이 변하나 시계방향 측정에서는 170도에서 175도로 방위각이 진행될 때 위상이 변함을 알 수 있다. 즉 전이가 일어나는 임계각이 회전 방향에 따라 서로 다르다. 또 transverse loop이 사라지는 부분이 PD라고 한다면 방위각의 회전 방향에 따라서 PD가 다르다는 것을 의미한다. 이는 CCW 및 CW 사이의 방위각에 따른 교환바이어스 값의 이력곡선 현상과도 밀접한 연관이 있다고 생각할 수 있다. 이와 같은 실험 결과는 rotatable anisotropy의 명확한 증거로 보인다.

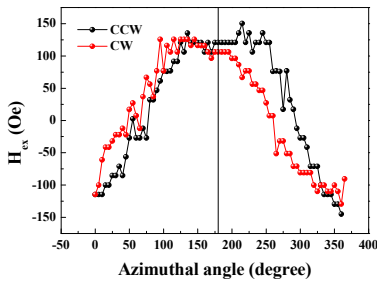


그림 1. CCW 와 CW 사이의 방위각에 따른 교환바이어스의 hysteresis

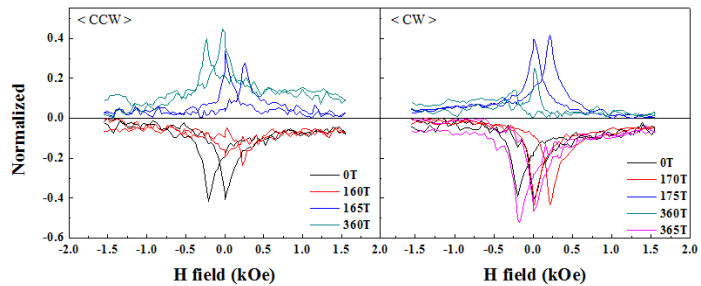


그림 2. 반시계방향과 시계 방향의 방위각에 따른 transverse 자기이력곡선

4. 결론

본 연구에서는 교환바이어스된 NiFe/FeMn 이종접합 구조를 vector-MOKE 측정으로 인가 자기장의 방위각 회전 방향에 따른 자기이력곡선을 통하여 pinning direction과 자화역전의 위상을 분석하였다. 방위각에 따른 교환바이어스 세기는 반시계방향과 시계방향이 서로 비대칭을 이루며 다른 각도 의존성을 나타냈다. 그리고 pinning direction의 회전의 변화는 자화 회전에서 기인함을 보였다. 또 교환바이어스를 갖는 구조에서는 rotatable anisotropy가 존재함을 자화역전 위상을 통하여 확인하였다.

5. 참고문헌

- [1] J. Nogués *et al.*, JMMM **192**, 203-232 (1999).
- [2] R. D. McMichael, M. D. Stiles, P. J. Chen and W. F. Egelhoff, Phys. Rev. B **58**, 8605 (1998).
- [3] M. D. Stiles, R. D. McMichael, Phys. Rev. B **59**, 3722 (1999).