

두께와 외부자기장에 따른 Permalloy 나노선의 자벽 형태와 그 거동에 관한 고찰

이상조*, 김상훈, 고정호, 문준철¹, 주홍렬¹, 홍종일

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

¹연세대학교 이과대학 물리학과, 서울특별시 서대문구 신촌동 134, 120-749

1. 서론

최근 자벽의 다양한 구조에 따른 자벽 거동에 관한 연구[1,2]가 많이 진행되고 있으며, 나노선과 같이 패터닝된 나노구조물에서의 자벽의 스핀 구조와 자벽의 형태 등도 하나의 내용이다[3]. 나노선의 두께와 외부의 자기장의 방향을 조절하여 나노선 내부의 자벽과 자벽이동 관찰에 관한 실험, 나노선의 모양 및 notch 등의 결함을 조절하여 원하는 곳에 자벽을 고정시키는 연구도 진행되고 있다[4-7]. 본 발표에서는 나노선 두께와 외부자기장 방향에 따른 자벽 거동을 AMR 효과를 이용하여 관찰하고 OOMMF 시뮬레이션을 수행하여 나노선 내 스핀이동에 관한 조사함으로써 밝혀낸 원인에 대해 토론한다.

2. 실험방법

나노선은 두 번의 lift-off를 통하여 제작되었다. 첫 번째 lift-off 과정에서 DC-magnetron 스퍼터로 나노선의 구조를 증착 하였다. 그 구조는 Ta 3/NiFe 20 또는 40/Ti 2/Au 3 (nm)로써 E-beam lithography를 사용하여 L-모양 나노선을 패터닝하였다. 그 위에 AMR 효과를 측정하기 위한 전극으로 Pt 100 nm를 같은 방법으로 패터닝 후 증착하였다. AMR 측정은 4-point probe 방법을 사용하여 저항변화를 관찰하였다. 측정조건은 2×10^6 A/cm²의 전류밀도에서 외부자기장을 45°(나노선 곡선방향)와 나노선의 라인 방향으로 가해주면서 저항을 측정하였다. 외부자기장은 최대 1 kOe로 나노선 곡선부분에 자벽을 형성시키기 위해 45° 방향으로 가해준 뒤 측정을 시작하였다. 그리고 측정된 결과를 비교하기 위해 OOMMF 시뮬레이션을 측정과 같은 조건으로 수행하였고 각 고유 상수는 $MS = 8 \times 10^6$ A/m, $A = 1.3 \times 10^{-11}$ J/m, damping 상수는 0.03, 그리고 스핀의 사이즈는 $5 \times 5 \times 5$ nm³ 값을 사용하였다.

3. 실험결과

외부자기장의 방향을 45°로 가해주었을 때 두께에 따라 달라지는 자벽 거동을 확인하였다. 나노선에 1 kOe로 가해주었을 때 자벽은 head-to-head가 형성되었으며 자기장을 -1 kOe까지 가했을 경우 나노선의 두께가 20 nm인 경우 -30 Oe에서 저항이 급격히 증가하였다가 -60 Oe에서 저항이 다시 감소하였다. 반면, 나노선의 두께가 40 nm인 경우 -10 Oe에서 저항이 급격히 증가하였다가 -110 Oe에서 저항이 다시 감소하는 경향을 보였다. 이 같은 저항 변화는 외부 자기장이 증가하면서 곡선부분에 있던 자벽이 이동하여 저항이 증가하였다가 외부에서 새로운 자벽이 들어오면서 저항이 감소하는 것이고 자벽이동시의 자기장 값의 차이는 두께에 따라 자벽의 형태가 달라지기 때문에 나타나는 현상으로 해석된다. 그리고 외부자기장이 line 방향으로 가해질 경우 1 kOe까지 가했을 때 자기장에 따른 저항변화는 나노선의 두께가 20 nm일 때 60 Oe에서 저항이 증가하였지만 두께가 40 nm일 때 90 Oe에서 저항이 증가하였다. 시뮬레이션 결과에서 두께가 20 nm일 경우 transverse 자벽이 형성되고 40 nm일 경우 twisted vortex 자벽이 형성되는 것을 확인하였다. 이것은 자벽 형성 시 magnetostatic energy와 두께에 따른 demagnetization energy간의 상호작용을 통하여 최소한의 에너지를 가지게 되는 형태인 것으로 해석된다. 두께에 따라 형성되는 자벽 형태가 달라지고 이것에 의하여 자벽에 미치는 에너지의 영향이 다를 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

4. 고찰

자벽의 형태는 에너지의 상호작용에 의해 결정된다. 구체적으로 20 nm일 때 형성된 transverse 자벽은 두께가 증가하면서 magnetostatic energy가 증가하고 demagnetization energy는 크게 변하지 않는다. 하지만 전체 에너지는 증가하게 된다. 두께가 40 nm에서 형성된 vortex 자벽은 자벽내에 twisted vortex core가 형성되면서 demagnetization energy는 커지지만 magnetostatic energy를 감소시키면서 전체적인 에너지가 감소하게 된다. 또한 자벽이동에 영향을 주는 Zeeman 에너지는 외부자기장이 커지면서 다른 에너지에 비해 영향력이 커지게 되고 두께에 관계 없이 Zeeman 에너지를 최소화하기 위한 자벽이 형성되면서 이동을 하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 발표에서는 L-모양의 나노선 내에 존재하는 자벽의 거동에 외부조건이 어떻게 영향을 주는지에 대하여 토론한다. 외부자기장 방향이 일정할 경우 두께에 따라 depinning 과 pinning point가 다르게 나타난다. Line 방향의 자기장에서 20 nm 의 depinning point는 40 nm 보다 낮은 자기장값을 가지고, 45° 방향의 자기장에서는 20 nm 의 depinning point가 40 nm 보다 높고 pinning point는 20 nm에서 낮게 나타났다. 시뮬레이션의 결과를 통해서 두께가 20 nm에서는 transverse 자벽, 40 nm에서는 vortex 자벽이 형성됨을 확인하였다. 이 거동은 Demagnetization, magnetostatic 그리고 Zeeman 에너지간의 경쟁을 통한 최소에너지 도달 과정에 기인된 현상으로 OOMMF 시뮬레이션을 결과를 통하여 확인할 수 있었다.

6. 감사의 글

이 논문은 2006년 교육인적자원부 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2006-312-C00257).

7. 참고문헌

- [1] M. Hayashi, L. Thomas, R. Moriya, C. Rettner, and S. S. P. Parkin, *Science* **320**, 209 (2008).
- [2] E. Saitoh, H. Miyajima, T. Yamaoka, and G. Tatara, *Nature* **432**, 203 (2004).
- [3] M Klaui. *J. Phys.: Condens, Matter* **20**, 313001 (2008).
- [4] Guido Meier, Markus Bolte, and Rene Eiselt, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 187202 (2007).
- [5] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, *Science* **320**, 190 (2008).
- [6] M. Klaui, C. A. F. Vaz, and J. A. C. Bland, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 108 (2002).
- [7] D. Bedau, M. Kläui, U. Rüdiger, C. A. F. Vazb, J. A. C. Bland, G. Faini, L. Vilac, and W. Wernsdorfer, *J. Appl. Phys.* **101**, 09F509 (2007).