

강자성 비정질 NiFeSiB 자유층을 갖는 자기터널접합의 스위칭 특성

황재연 · 이장로 *

숙명여자대학교 물리학과, 서울 용산구 청파동 2가 53-12, 140-742, 서울

(2006년 11월 11일 받음, 2006년 12월 19일 최종수정본 받음)

비정질 강자성 NiFeSiB 자유층을 갖는 자기터널접합 (MTJ)에 대하여 연구하였다. 비정질 자유층이 MTJ의 스위칭 특성에 미치는 영향을 알아보는데 역점을 두어 기존의 CoFe와 NiFe층 대신에 NiFeSiB 자성층을 사용하였다. Ni₁₆Fe₆₂Si₈B₁₄는 Co₉₀Fe₁₀보다 더 낮은 포화자화도 (M_s : 800 emu/cm³) 그리고 Ni₈₀Fe₂₀보다 더 높은 이방성 상수 (K_u : 2700 erg/cm³)를 갖는다. Si/SiO₂/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO_x/NiFeSiB t/Ru 60 (nm) 구조는 그 자체의 낮은 포화자화도와 높은 일축 이방성을 가짐으로 인하여 보자력(H_c)을 감소시키고 스위칭 각형을 증가시키게 함으로서 MTJ의 스위칭 특성에 유리한 것으로 조사되었다. 더욱이 미소두께(1 nm)의 CoFe층을 터널장벽/NiFeSiB 경계면에 삽입하면 TMR비와 스위칭 각형이 증가하고 개선되었다.

주제어 : 자기터널접합, 터널자기저항, 스위칭 감도, 비정질 물질, NiFeSiB

I. 서 론

자기터널접합(MTJ)은 상당히 큰 터널자기저항 (TMR)비를 나타내기 때문에 고밀도 판독헤드와 비휘발성 자기메모리 (MRAM)에 유망한 것으로 보고되고 있다[1-3]. 일반적으로 MTJ는 강자성 속박층/절연 터널장벽층/강자성 자유층 구조로 되어있다. 터널장벽층을 통과하는 터널전류는 두 강자성층의 자화도의 상대적인 방향에 따라 달라진다. 두 개의 강자성층 (속박층, 자유층) 사이의 상호작용이 특히 submicrometer 크기의 MTJ 셀(cell)을 갖는 고밀도 MRAM의 스위칭 특성에 매우 중요하다.

그러나 MTJ 셀의 크기가 감소함에 따라 submicrometer 크기의 소자 모서리에서 큰 기록전류를 생기게 하는 커다란 반자기장의 발생 효과로 큰 스위칭자기장(H_{sw})이 생기게 된다. Stoner-Wohlfarth의 단자구 모델에 의하면 H_{sw} 는 포화자화도(M_s), 형상이방성 및 자성체의 두께에 따라 달라지며 [4], 낮은 H_{sw} 를 얻기 위해서는 M_s 와 형상이방성이 작아야 한다. 그러나 낮은 종횡비(형상이방성)는 불안정한 셀 스위칭을 야기시키는 단자구 구조가 생기게 한다[5, 6].

그러므로 TMR비는 그대로 유지하면서 낮은 H_{sw} 값을 얻기 위하여 M_s 값은 낮고 비교적 큰 이방성을 갖는 새로운 물질을 찾아내야 한다. 낮은 종횡비는 물질의 이방성상수 (K_u)가 충분히 크면 별 문제없이 얻을 수 있다. 이러한 물질의 필요성을 고려할 때 장거리 규칙도를 가지지 않는 비정질 금속 합금은 결정자기이방성 및 탄성자기이방성의 결여로 일반적으로 낮은 보자력(H_c)을 나타내기 때문에 비정질 물질이

MTJ의 자유층에 가장 적합할 것이라고 생각하였다[7, 8]. 비정질 CoFeB 자유층을 갖는 MTJ는 높은 스핀분극도 때문에 높은 TMR비를 나타내는 것으로 보고되었다[9]. 본 논문에서는 여러가지 비정질 물질 중에서도 Co₉₀Fe₁₀보다도 낮은 M_s 를 갖고 Ni₈₀Fe₂₀보다는 높은 K_u 를 갖는 비정질 Ni₁₆Fe₆₂Si₈B₁₄을 MTJ의 자유층으로 사용하였다.

II. 실험 방법

자기터널접합 Si/SiO₂/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO_x/자유층 t/Ru 60 (nm) 구조는 6개의 타겟이 장착된 DC 마그네트론 스퍼터링 장치를 사용하여 진공도 5×10⁻⁸ Torr 이하에서 제작되었다. 증착하는 동안 일축 자기이방성을 유도하기 위하여 강자성층에 자기장 100 Oe를 걸어주었다. 터널장벽층은 약 1.0 nm 두께의 Al층을 load lock 챔버 내에서 rf 플라즈마 방법으로 산화시켜 만들었다. 포토리소그래피 방법과 이온 빔 에칭 방법을 통하여 자기터널접합을 제작하였다. 시료는 접합의 종횡비가 1인 10 μm×10 μm에서 100 μm×100 μm 크기로 하였다. 열처리하는 진공도 5×10⁻⁴ Torr에서 자기장 300 Oe를 걸어주며 200 °C에서 2시간 동안 진행하였다. 자기이력특성은 시료진동형자기계(VSM)를 사용하여 조사하였으며, MTJ의 자기수송 특성은 외부자기장을 발생할 수 있는 2탐침 장치를 사용하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

MTJ의 자유층에 비정질 NiFeSiB를 사용하기 앞서, Si/SiO₂ 기판에 제작한 두께 30 nm 단일막 NiFeSiB에 대한 미

*Tel: (02) 710-9404, E-mail: jrrhee@sookmyung.ac.kr

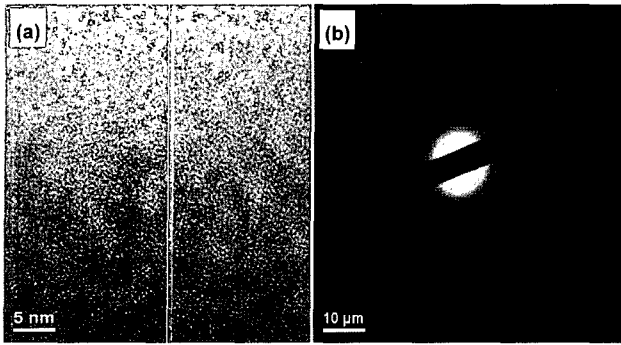


Fig. 1. Microstructure of a 30 nm thick as-deposited NiFeSiB film on an Si/SiO₂ substrate: (a) an in-plane TEM image, and (b) a SAD pattern. The microstructure of the NiFeSiB shows amorphous characteristics.

세구조 및 자기이력 특성을 조사하였다. Fig. 1은 NiFeSiB의 결정구조가 비정질이라는 것을 보여주는 (a) 투과 전자 현미경(TEM)의 평면 관찰상과 (b) 하나의 넓은 halo ring을 갖는 선택부분회절(SAD) 패턴을 나타낸다. 200 °C에서 2시간 동안 열처리 한 후에도 이것의 미세구조는 변함이 없이 유지되었다.

패턴하지 않은 시료에 대하여 NiFeSiB의 자기 특성을 확인하기 위하여 M-H 곡선을 측정하였다. 그 결과, $M_s = 800 \text{ emu/cm}^3$ 이며 $K_u = 2700 \text{ erg/cm}^3$ 을 얻었으며 이 시료의 M_s 는 CoFe($1,400 \text{ emu/cm}^3$)보다 낮은 값이고, NiFe(800 emu/cm^3)와는 거의 동일한 값이다. K_u 의 경우는 NiFe(1000 erg/cm^3) 보다 더 높은 값을 확인하였다. NiFeSiB의 M_s 값이 낮은 것은 자기적 특성이 대개는 단거리 규칙도의 함수에 따라 달라지는데 이것은 장거리 규칙도를 가지지 않을 뿐만 아니라 Si와 B와 같은 비금속 원자가 포함되어 있기 때문이다. H_c 의

경우와 같은 자기적 특성은 자성층의 두께에 의존한다. 이것을 확인하기 위하여 Ta 5/NiFeSiB, NiFe, CoFe 7/Ta 5 (nm) 3층을 제작하였다. Fig. 2에서와 같이 NiFeSiB, NiFe 및 CoFe의 H_c 는 각각 3, 3 및 140 Oe를 나타내었다. NiFeSiB 내의 비금속(Si와 B)이 이 합금의 용융점을 낮출 수 있게 할 수 있어서, 비정질상을 형성하는데 충분할 정도로 이 합금을 유리화 온도를 지나서 급속히 냉각하는 것이 가능하다. 그 결과, 화학적 혹은 구조적 이질물을 제외하고, 자구벽 운동을 강력하게 방해하는 이 불순혼합물의 대부분은 용액 내에 남아 있으려고 한다. 이러한 화학적 혹은 구조적 이질물(결정립계, 침전(precipitates), 위상 분리(phase segregation))의 크기는 2 혹은 3 nm보다 작은 크기를 갖는다. 결과적으로, 비정질 합금의 자구벽은 넓고 그 결합은 좁기 때문에 결합에 의한 자구벽의 속박이 거의 없게 된다. 그래서 H_c 가 매우 작은 값을 가질 수 있다[7, 8].

NiFeSiB 자유층의 두께를 8.2, 12.3, 16.3 nm로 달린 Si/SiO₂/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO_x/NiFeSiB (t)/Ru 60 (nm) 구조의 자기터널접합에 대해 R-H 곡선을 측정하여 TMR비와 H_{sw} 를 조사하였다. Stoner-Wohlfarth의 단자구 모델에 의하면, H_{sw} 는 자성체의 M_s 와 두께(t)에 따라 달라지므로, x/y (x 와 y 는 각각 자유층 NiFeSiB과 속박층 CoFe의 $M_s \times t$ 값) 전극, 즉 x/y 가 2/3, 1/1 및 4/3으로 구성되는 일련의 자기터널접합을 제작하였다. Fig. 3에서와 같이 NiFeSiB 자유층의 두께를 증가함으로써 TMR비는 41%까지 올라갔다. TMR비는 스핀분극도에 따라 달라지며 또 이것은 자성체의 정자기에너지에 의존한다[10]. 자유층의 두께를 증가하면 유효 정자기에너지가 증가하여 TMR비의 증가를 가져오게 한다. 자기꼬임(kinks)과 같은 자화 비균일성은 소용돌이(vortex)

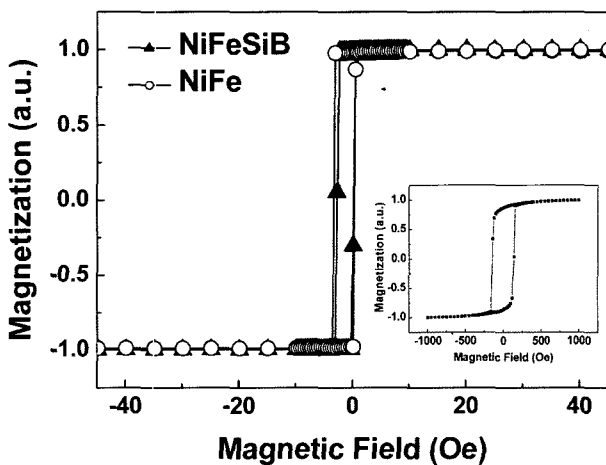


Fig. 2. Magnetization curves for 7 nm NiFeSiB, NiFe, and CoFe (inset) films. The H_c values of NiFeSiB, NiFe and CoFe were 3, 3 and 140 Oe, respectively.

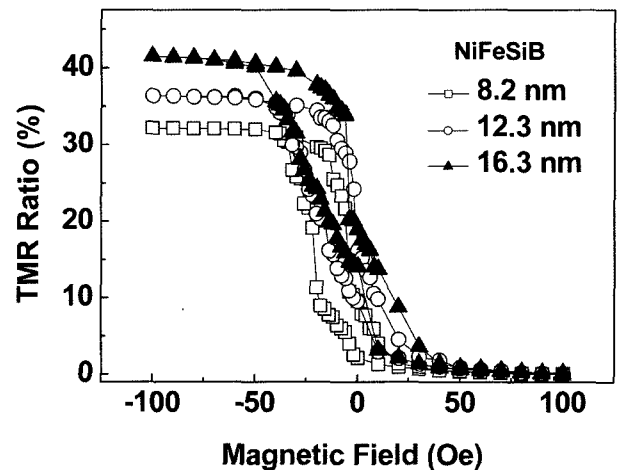


Fig. 3. Tunneling magnetoresistance curves for 8.2, 12.3, and 16.3 nm NiFeSiB-based MTJs with a size of $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$. The TMR ratios are 33, 37, and 41 %, respectively.

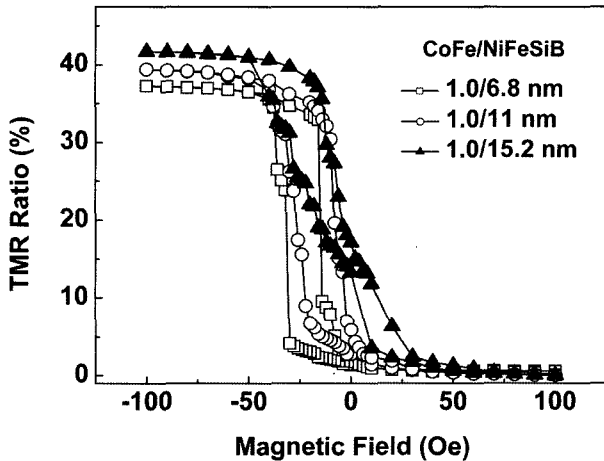


Fig. 4. Tunneling magnetoresistance curves for 6.8, 11, and 15.2 nm NiFeSiB-based MTJs with a 1 nm CoFe layer. The TMR ratios are 36, 38, and 41 %, respectively.

혹은 2π -자벽 자구 형성에 의해 생길 수 있는데, 이것들 모두 자화의 부분적인 스위칭을 초래하게 되어 굉장히 큰 H_{sw} 과 강렬한 스위칭의 원인이 될 수 있다. 따라서 여기에서의 자유층이 너무 두꺼운 경우, 반자기장이 강해지고 스위칭 특성이 강자성층 두께에 대략적으로 비례하기 때문에 H_{sw} 는 증가하고 스위칭 각형은 더 나빠져 스위칭 특성은 더욱 나빠지게 되었다.

기대했던 바와 같이 자유층 NiFeSiB을 갖는 MTJ는 앞서의 3중층의 H_c 와 비슷한 값을 가지면서 종래의 자유층 CoFe를 갖는 MTJ보다 더 낮은 H_{sw} 를 나타내었다. 이렇게 낮은 H_{sw} 는 MRAM, 특히 MTJ 셀의 크기가 100 nm보다 작은 경우인 1 Gb를 초과하는 기억밀도의 경우의 기록 작동 시 전력 소모를 줄이는데 필요하다.

TMR비와 스위칭 각형을 개선하기 위하여 터널장벽/NiFeSiB 경계면에 미소두께 CoFe층(1 nm)을 삽입하였다. Fig. 4에서와 같이, TMR비와 스위칭 각형은 CoFe 1.0/NiFeSiB(6.8~11 nm) (즉, $x/y = 2/3 \sim 1/1$) 경우에는 개선되었다. CoFe가 $M_s = 1400 \text{ emu/cm}^3$ 이고 $K_u = 30,000 \text{ erg/cm}^3$ 인 값을 갖는 것은 잘 알려져 있다. 결국 CoFe는 NiFeSiB보다 높은 스핀분극도와 K_u 를 갖기 때문에 미소두께 CoFe층 삽입이 TMR비와 스위칭 각형을 증가하고 개선하는데 유리한 것으로 확인되었다. 그러나 NiFeSiB의 두께가 15.2 nm(즉, $x/y =$

4/3)로 증가할 때 이것의 추가적인 개선은 없었다. 즉 NiFeSiB층이 너무 두꺼운 경우에는 CoFe 미소층 삽입 효과가 무시되었다. 따라서 터널장벽/NiFeSiB 경계면에 NiFeSiB 자유층보다 비교적 더 얇은 CoFe층을 삽입하더라도 TMR비와 H_{sw} 특성은 NiFeSiB층 두께에 의해 우선적으로 좌우되는 것으로 생각된다.

IV. 결 론

비정질 NiFeSiB 자유자성층을 사용한 자기터널접합의 자기 스위칭과 TMR 효과가 조사되었다. NiFeSiB층은 NiFe층보다 더 높은 K_u 를 가지며 CoFe층에 비하여 더 낮은 M_s 를 나타내었다. 이러한 특성은 H_{sw} 를 줄이고 스위칭 각형을 증가시키는데 유리한 것으로 확인되었다. 더욱이, 터널장벽/NiFeSiB 경계면에 미소두께 CoFe층을 삽입함으로써 TMR비와 스위칭 각형이 더욱더 증가하였다.

참고문헌

- [1] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey, *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 3273 (1995).
- [2] S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S-H. Yang, *Nature Materials*, **3**, 862 (2004).
- [3] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, *Nature Materials*, **3**, 868 (2004).
- [4] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, *Philos. Trans. Roy. Soc.*, **A240**, 559 (1948).
- [5] W. Park, I. J. Hwang, T. Kim, K. J. Lee, and Y. K. Kim, *J. Appl. Phys.*, **96**, 1748 (2004).
- [6] Y. K. Lee, B. S. Chun, Y. K. Kim, I. Hwang, W. Park, T. Kim, J. E. Lee, and W. C. Jeong, *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 883 (2005).
- [7] F. E. Luborsky, *Amorphous metallic alloys*, London, U.K.: Butterworths (1983).
- [8] R. C. O'Handley, *Modern Magnetic Materials*, John Wiley & Sons, INC., USA (2000).
- [9] D. Wang, C. Nordman, J. Daughton, Z. Qian, and J. Fink, *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2269 (2004).
- [10] J. S. Moodera and G. Mathon, *J. Magn. Mater.*, **200**, 248 (1999).

Characteristics of Magnetic Tunnel Junctions Comprising Ferromagnetic Amorphous NiFeSiB Layers

J. Y. Hwang and J. R. Rhee*

Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Korea

(Received 11 November 2006, in final form 19 December 2006)

Magnetic tunnel junctions (MTJs), which consisted of amorphous ferromagnetic NiFeSiB free layers, were investigated. The NiFeSiB layers were used to substitute for the traditionally used CoFe and/or NiFe layers with the emphasis being given to obtaining an understanding of the effect of the amorphous free layer on the switching characteristics of the MTJs. $\text{Ni}_{16}\text{Fe}_{62}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ has a lower saturation magnetization (M_s : 800 emu/cm^3) than $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ and a higher anisotropy constant (K_u : $2,700 \text{ erg/cm}^3$) than $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. The Si/SiO₂/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO_x/NiFeSiB t /Ru 60 (in nanometers) structure was found to be beneficial for the switching characteristics of the MTJ, leading to a reduction in the coercivity (H_c) and an increase in the sensitivity resulted from its lower saturation magnetization and higher uniaxial anisotropy. Furthermore, by inserting a very thin CoFe layer at the tunnel barrier/NiFeSiB interface, the TMR ratio and switching squareness were improved more with the increase of NiFeSiB layer thickness up to 11 nm.

Keywords : magnetic tunnel junction, tunneling magnetoresistance, switching sensitivity, amorphous, NiFeSiB