

비정질 CoFeSiB 자유층을 갖는 자기터널접합의 스위칭 특성

황재연 · 이장로 *

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

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

스위칭 특성을 향상시키기 위하여 비정질 강자성 CoFeSiB 자유층을 갖는 자기터널접합 (MTJ)의 스위칭 특성을 연구하였다. 자기터널접합의 구조는 Si/SiO₂/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO_x/CoFeSiB (*t*)/Ru 60 (nm)이다. CoFeSiB는 560 emu/cm³의 낮은 포화자화도와 2800 erg/cm³의 높은 이방성 상수를 가졌다. 이러한 특성이 자기터널접합의 낮은 보자력(H_c)과 높은 자장 민감도를 갖게 한다. 이것은 또한 Landau-Lifschitz-Gilbert 방정식에 근거한 미세자기 전산시뮬레이션을 통하여 submicrometer-sized elements에서도 확인하였다. CoFeSiB 자유층 두께를 증가함으로써 스위칭 특성은 반자화 자기장의 증가로 인하여 더욱더 나빠졌다.

주제어 : 자기터널접합, 터널자기저항, 스위칭 자기장, 비정질 물질, CoFeSiB

I. 서 론

자기터널접합(MTJ)은 실온에서 큰 터널링자기저항(TMR) 효과의 발견으로 인하여 자기 읽어내기 헤드와 비휘발성 자기기억소자 (MRAM)에 응용 가능성이 높아 큰 흥미를 갖게 되었다 [1, 2]. MTJ는 일반적으로 2개의 얇은 절연층으로 분리된 강자성층으로 구성되며, 이 두 강자성층의 자화가 전환 (스위칭)될 때 자기저항효과가 일어난다. 낮은 스위칭 자기장 (H_{sw})을 얻는 일이 MRAM을 이용한 정보기록시 기록용량과 관련하여 중요한 인자 중 하나가 된다. Stoner-Wohlfarth의 단자구 모델에 의하면 H_{sw}는 포화자화도(M_s)와 형상이방성에 의존한다 [3]. 낮은 H_{sw}를 얻기 위하여, M_s와 형상이방성은 작아야 한다. 그러나 낮은 종횡비(aspect ratio)는 MRAM에 적합하지 않은 다자구 구조를 만들게 된다.

따라서 물질의 이방성 상수(K_u) 값이 크면 쉽게 다자구 구조가 아니면서 종횡비를 낮출 수 있기 때문에, 낮은 H_{sw}를 얻기 위하여 물질이 갖는 이방성과 함께 M_s를 고려하여 MTJ의 자유층으로 비정질 강자성 CoFeSiB를 사용하였다. 최근 비정질 물질은 MTJ에 강자성층으로 많이 사용되고 있다 [4, 5]. 3d 천이금속에 B, Si, Zr과 같은 준금속이 첨가된 비정질 합금은 M_s와 H_c가 작고 자기변형이 거의 0이다. 또한 CoFeB와 같은 비정질 물질을 강자성층으로 사용한 MTJ에서 터널자기저항비가 훨씬 높게 나타났다 [6]. 본 연구에서는 비정질 CoFeSiB를 자유층으로 사용한 새로운 구조를 갖는 MTJ의 스위칭 특성을 조사하였다.

II. 실험 방법

DC 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 2×10⁻⁸ Torr 이하 진공에서 자기장 100 Oe를 걸어주면서 Si/SiO₂/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO_x/CoFeSiB (*t*)/Ru 60 (nm) 구조의 MTJ를 제작하였다. 터널장벽은 1.0 nm 두께의 Al층을 load lock 챔버에서 RF 플라즈마 방법으로 산화시켜 형성하였다. 포토리소그래피와 이온빔 에칭을 통해 종횡비가 1인 10×10 μm² 크기의 자기터널접합을 제작하였다. 열처리 5×10⁻⁴ Torr 진공에서 자기장 300 Oe를 걸어주며 200 °C에서 2 시간 동안 진행하였다. 박막의 자기적 특성과 결정구조를 각각 VSM과 XRD로 조사하였으며, MTJ의 자기적 및 전기적 인 특성은 2-탐침법으로 모두 실온에서 측정하였다. 또한 Landau-Lifschitz-Gilbert (LLG) 방정식을 이용한 미세자기 전산시뮬레이션[7]을 통해 H_{sw}의 접합 셀 크기 의존성을 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)의 자화곡선에서 볼 수 있듯이 CoFeSiB의 M_s와 K_u는 각각 560 emu/cm³과 2,800 erg/cm³으로, M_s는 CoFe (1,400 emu/cm³)보다 낮고 K_u는 NiFe(1,000 erg/cm³) 보다 높은 값이다. Fig. 1(b)는 CoFeSiB 박막의 열처리 전 후의 XRD 측정 결과를 보여주고 있는데, 열처리 후에도 비정질 결정구조는 변함이 없음을 알 수 있다.

MTJ의 자유자성층 물질을 CoFe, CoFeSiB, NiFe 등으로 달리하여 스위칭 특성을 조사하였다. TMR비는 스핀 분극된

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

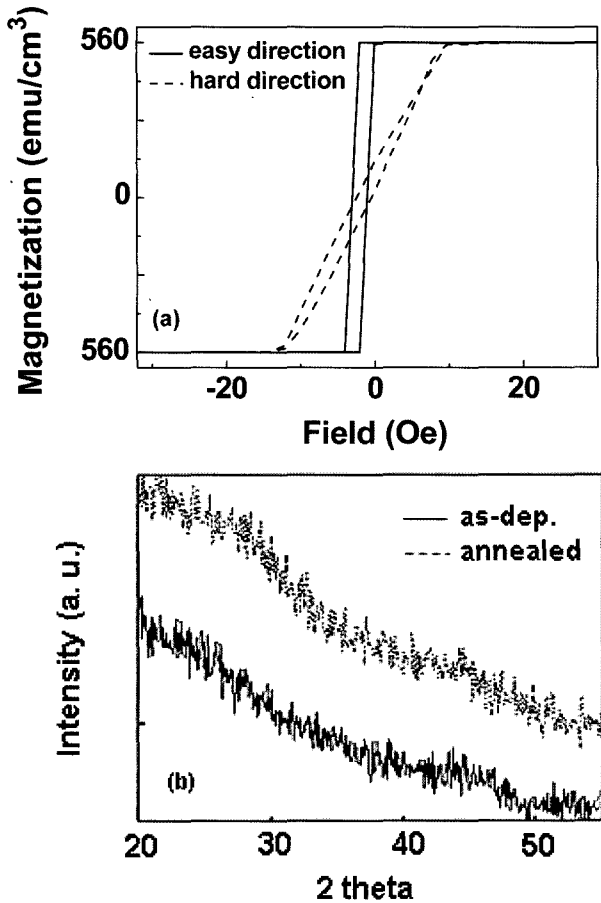


Fig. 1. (a) Magnetization curve and (b) the XRD patterns both as-deposited and annealed state for the unpatterned CoFeSiB film.

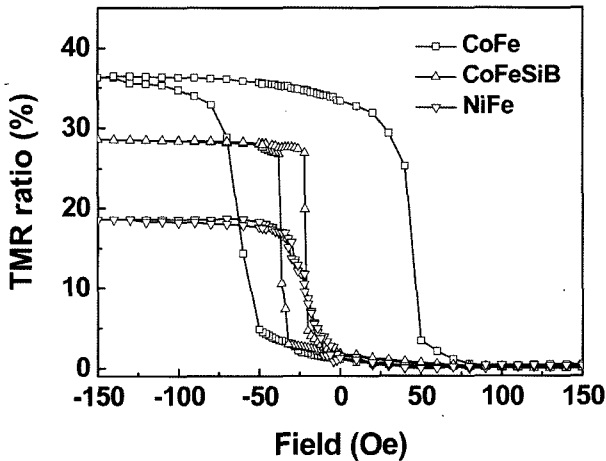


Fig. 2. TMR curves for the CoFe, NiFe, and CoFeSiB used to free layer in MTJs. MTJs consisted of Si/SiO₂/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO_x/CoFe 7, NiFe 7, or CoFeSiB 7/Ru 60 (in nm) with a size of 10×10 μm².

전자의 터널링에 의존하고, 이것은 강자성 전극의 스핀분극도 뿐만 아니라 강자성체/터널장벽 계면 특성에 강하게 영향을

받는다 [8]. Fig. 2에서와 같이, CoFeSiB를 자유층으로 사용한 MTJ의 TMR비는 29%로 CoFe를 자유층으로 사용한 MTJ의 TMR비 36%보다 낮고 NiFe를 자유층으로 사용한 MTJ의 TMR비 18% 보다는 높게 나타났다. 비교적 낮은 TMR비의 원인은 CoFeSiB가 CoFe에 비해서 낮은 스핀분극도를 갖기 때문인 것으로 보인다. 즉 터널장벽 제작 시 동일한 산화조건을 사용하였으므로 강자성층/절연층 계면의 특성을 무시할 수 있어서 이와 같은 TMR비의 차이는 각각의 스핀분극도의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. H_c의 경우에는, CoFe를 자유층으로 사용한 MTJ는 높은 TMR비를 갖고 있지만 H_c가 54 Oe로 매우 크기 때문에 MRAM의 기록 작업 (writing performance)에 문제가 있다. NiFe를 자유층으로 사용한 MTJ는 그것의 연자성 특성으로 인해 H_c가 5 Oe로 작아서 양호한 스위칭 특성을 보이지만 TMR비가 낮고 자장민감도의 특성이 떨어져 고밀도 MRAM에 사용하기에는 부적합하다. 여기에서 흥미로운 사실은, 비록 CoFeSiB를 자유층으로 한 MTJ가 비교적 낮은 TMR비를 갖지만 H_c가 6 Oe로 낮으면서 자장민감도가 큰 가장 우수한 특성을 나타낸다는 것이다.

실제로 MRAM 기술에 사용되는 MTJs의 스위칭 특성을 확인하기 위해 LLG 방정식을 이용한 미세자기 전산시뮬레이션을 통하여 위의 자유층 구조를 갖는 MTJ에 대하여 H_c의 cell 크기 의존성을 조사하였다 [9]. 10×10 μm² 크기의 MTJ에서 실험치와 시뮬레이션 계산치의 값은 각각 CoFeSiB에서는 6 Oe와 13 Oe, CoFe에서는 54 Oe와 40 Oe, 그리고 NiFe에서는 5 Oe와 3 Oe로 두 경우의 값들이 거의 일치했다. Fig. 3에서와 같이 고밀도 MRAM 장치에 이용되는 MTJ 셀 크기인 0.04~0.08 μm에서의 시뮬레이션 결과는 CoFeSiB를 자유층으로 사용한 MTJ의 H_c는 CoFe를 자유층으로 사용한 MTJ의 경우의 반 정도의 작은 값을 나타내었다. MTJ의 크

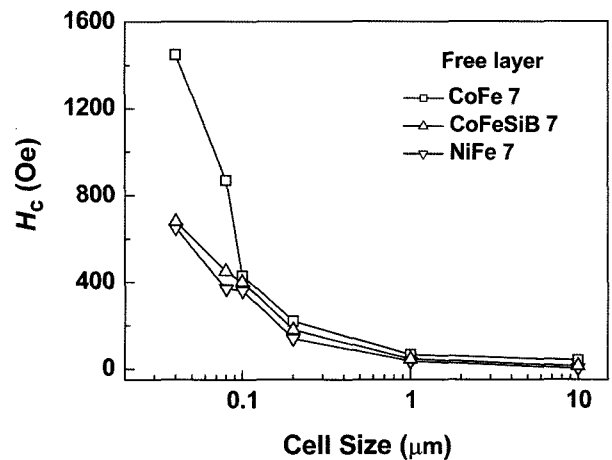


Fig. 3. Cell size dependence of H_c for MTJs with different free layer structures using the micromagnetic simulation.

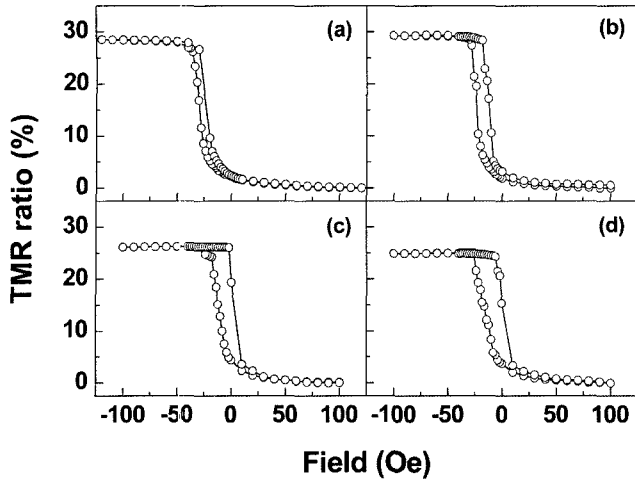


Fig. 4. TMR curves as a function of CoFeSiB free layer thickness. The CoFeSiB free layer/CoFe pinned layer thicknesses are (a) 7/7 nm, (b) 11.77/7 nm, (c) 17.5/7 nm, and (d) 23.3/7 nm (in $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ junctions).

기가 $0.04 \times 0.04 \mu\text{m}^2$ 일 때, CoFeSiB, CoFe 그리고 NiFe를 자유층으로 갖는 MTJs의 H_c 는 각각 650 Oe, 1450 Oe, 680 Oe 이다. 스위칭 특성을 높이기 위하여 낮은 M_s 와 높은 K_u 는 필수적이며 이것은 실험과 전산시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

Fig. 4는 CoFeSiB 자유층의 두께에 따른 TMR 곡선을 나타낸다. 고정층의 $M_s \times t$ (두께) 값과 비교하여 자유층의 두께 효과를 조사하기 위하여, CoFeSiB 자유층과 CoFe 고정층의 각각의 $M_s \times t$ 값을 x 와 y 라고 했을 때, x/y 값이 (a) 2/5, (b) 2/3, (c) 3/3, (d) 4/3인 일련의 MTJs를 제작하였다. Fig. 4는 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 크기의 MTJ에 대한 TMR비의 CoFeSiB 자유층 두께 의존성을 보여 준다. 이 결과에서와 같이 자화

스위칭을 위한 CoFeSiB 자유층/CoFe 속박층의 최적 두께는 7/7 nm이었으며 자유자성층의 두께를 증가시킴에 따라서 반자화 자기장의 증가로 인하여 스위칭 특성이 저하되었다.

IV. 결 론

비정질 강자성 CoFeSiB를 자유층으로 사용한 MTJ의 자화 스위칭 특성과 TMR 효과를 조사하였다. CoFeSiB는 CoFe보다 낮은 M_s 값을 갖고, NiFe보다는 큰 K_u 값을 가진다. CoFeSiB의 이러한 특성은 micrometer는 물론 submicrometer 크기의 MTJ에서도 H_c 를 줄이고 자장민감도를 증가시킴으로 우수한 스위칭 특성을 갖는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey, *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 3273 (1995).
- [2] T. Miyazaki and N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mater.*, **139**, L231 (1995).
- [3] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, **240**, 559 (1948).
- [4] M. Jimbo, K. Komiyama, and S. Tsunashima, *J. Appl. Phys.*, **95**, 3745 (2004).
- [5] M. S. Song, Y. K. Kim, I. J. Hwang, and T. W. Kim, *The Digest of 49th MMM Conference*, 331 (2004).
- [6] D. Wang, C. Nordman, J. Daughton, Z. Qian, and J. Fink, *The Digest of 9th Joint MMM/Intermag Conference*, BD02 (2004).
- [7] LLG Micromagnetics SimulatorTM.
- [8] J. C. Slonczewski, *Phys. Rev. B*, **39**, 6995 (1989).
- [9] J. Y. Hwang, H. I. Yim, M. Y. Kim, J. R. Rhee, B. S. Chun, Y. K. Kim, and T. W. Kim, *J. Appl. Phys.*, **99**, 08T315 (2006).

Switching Characteristics of Magnetic Tunnel Junction with Amorphous CoFeSiB Free Layer

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

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

(Received 12 November 2006, in final form 19 December 2006)

The switching characteristics of magnetic tunnel junctions (MTJs) comprising amorphous ferromagnetic CoFeSiB free layer have been investigated. CoFeSiB was used for the free layer to enhance the switching characteristics. The typical junction structure was Si/SiO₂/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO_x/CoFeSiB (*t*)/Ru 60 (in nm). CoFeSiB has low saturation magnetization (M_s) of 560 emu/cm³ and high anisotropy constant (K_u) of 2,800 erg/cm³. These properties caused low coercivity (H_c) and high sensitivity in MTJs, and it also confirmed in submicrometer-sized elements by micromagnetic simulation based on the Landau-Lifschitz-Gilbert equation. By increasing CoFeSiB free layer thickness, the switching characteristics became worse due to increase of the demagnetization field.

Keywords : magnetic tunnel junction, tunneling magnetoresistance, switching field, amorphous, CoFeSiB