

## CoFeSiB/Ru/CoFeSiB 자유층을 갖는 자기터널 접합의 스위칭 자기장

이선영 · 이서원 · 이장로 \*

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

(2007년 6월 4일 받음, 2007년 6월 18일 최종수정본 받음)

비정질  $\text{Co}_{70.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{10}$ 층을 갖는 자기터널접합(magnetic tunneling junctions; MTJ)을 연구하였다. 비정질 자유층이 MTJ의 스위칭 특성에 미치는 영향을 증점적으로 이해하기 위하여 기존의 사용된 CoFe 그리고 NiFe층들을 대신하여 비정질 강자성체 CoFeSiB를 사용하였다. CoFeSiB는 CoFe과 NiFe보다 각각 낮은 포화자기장( $M_s$ :  $560 \text{ emu/cm}^3$ )과 높은 자기이방성 상수( $K_u$ :  $0.2800 \text{ erg/cm}^3$ )를 갖는다. CoFeSiB층들의 사이에 1.0 nm Ru층 삽입시  $-0.003 \text{ erg/cm}^3$  교환결합에너지( $J_{ex}$ )를 나타내었다. Si-SiO<sub>2</sub>-Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO<sub>x</sub>/CoFeSiB 7 또는 CoFeSiB (t)/Ru 1.0/CoFeSiB (7-t)/Ru 60(in nm) MTJ 구조의 터널접합에 대하여 실험 및 시뮬레이션 결과를 통하여 낮은  $J_{ex}$ 에 기인하는 스위칭 자기장(switching field;  $H_{sw}$ )의 시료 크기 의존성이 나타나는 것을 알 수 있었다. CoFeSiB 합성형 반강자성 구조는 micrometer뿐만 아니라 submicrometer 시료 크기영역에서도 보자력( $H_c$ )의 감소와 민감도를 증가 시킴으로써 자기 스위칭 특성에 유리한 것으로 확인 되었다.

**주제어** : 비정질 강자성, CoFeSiB, 자기메모리(magnetic random access memory; MRAM), 스위칭 자기장, 합성형 반강자성(SAF), 터널자기저항(TMR)

### I. 서 론

자기터널접합(MTJ)은 터널자기저항(tunneling magnetoresistance; TMR) 비가 높게 나타나기 때문에, 고밀도 읽기헤드와 자기메모리(MRAM) 응용에 큰 가능성을 가지고 있다[1]. MTJ는 일반적으로 경자성/절연체/연자성 구조로 구성되고, 두 강자성층(FM)들 사이의 상호작용이 매우 중요한데, 이것은 두 자성층들의 반전(스위칭)에 영향을 미치기 때문이다. 스위칭 특성은 submicrometer 크기의 MTJ 셀(cell)들을 가진 고밀도 MRAM 등에 매우 중요하다. Submicrometer 크기의 셀모서리의 극에서 생긴 커다란 반자기장으로 인하여, 셀의 크기가 작을수록 큰 스위칭 자기장( $H_{sw}$ )을 필요로 하기 때문이다. 따라서  $H_{sw}$ 을 줄이기 위하여 합성형 반강자성 자유층 구조(synthetic antiferromagnetic free layer; SAF)[2]가 등장하게 되었다. Stoner-Wolhlfarth의 단자구(single domain)구조에 따르면,  $H_{sw}$ 는 포화자기장(saturation magnetization;  $M_s$ )과 형상이방성(shape anisotropy)에 따라 달라진다[3]. 낮은  $H_{sw}$ 를 얻기 위해서,  $M_s$ 와 형상자기이방성은 작아야 하나, 시료의 낮은 종횡비는 MRAM 응용에 적합하지 않은 다자구(multidomain) 구조를 만든다.

이런 관점에서, 본 연구에서는 비정질 자성층 CoFeSiB 합성형 반강자성 자유층을 사용한 MTJ를 소개하고자 한다. 낮은  $H_{sw}$ 을 얻기 위하여, 물질 그 자체의 이방성을 사용하기로 하였다. 자기이방성상수  $K_u$ 가 높으면 낮은 종횡비를 얻을 수

있기 때문이다. 최근에 비정질 물질들은 MTJ의 자유층(free layer)과 피속박 자성층(pinned layer)으로 사용되었다[4, 5]. 즉 B, Si 또는 Zr 같은 metalloid계가 첨가된 Co, Fe와 Ni 등은 연자성 특성을 가진 비정질 합금들로서 이것들을 MTJ의 강자성층으로 사용한다[6]. 비정질 강자성물질은 낮은  $M_s$ 와 낮은 보자력( $H_c$ ), 그리고 자기변형(magnetostriction)은 거의 0이다. 또한 자성층으로서 CoFeB 같은 비정질 물질로 만든 MTJ는 높은 TMR 비를 나타내고 있다[7]. 따라서 본 연구에서는  $\text{Co}_{70.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{1.5}\text{B}_{10}$ 로 구성된 SAF 자유층구조의 MTJ에 대하여 스위칭 특성을 조사하는 것을 주목적으로 하였다.

### II. 실험

6개 타겟이 장착된 rf 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여  $2 \times 10^{-8}$  Torr 이하의 진공에서 Si-SiO<sub>2</sub>-Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/Co<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub> 7/AlO<sub>x</sub>/CoFeSiB 7 또는 CoFeSiB (t)/Ru 1.0/CoFeSiB (7-t)/Ru 60(in nm)구조를 갖는 터널접합을 제작하였다. 강자성층에 일축자기이방성을 유도하기 위해 증착하는 동안 자기장 100 Oe를 걸어주었다. 터널 장벽은 1.0 nm의 얇은 Al층을 load lock 챔버내에서 rf 플라즈마 방법으로 산화시켜 형성하였다. 접합의 종횡비는 1로 고정하고 리소그래피 패터닝 과정과 이온빔 에칭을 통해 시료의 크기가 10~100  $\mu\text{m}$  크기인 접합을 제작하였다. 열처리 5  $\times 10^{-4}$  Torr 진공에서 자기장 300 Oe를 걸어주며 200 °C에서 2시간 동안 진행하였다. MTJ의 자기적 특성과 결정구조는 각각 VSM과 XRD를 통하여 조사하였으며, 2-탐침법으로 전기 및 자기적

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

특성을 측정하였다. Landau-Lifschitz-Gilbert 방정식에 근거한 LLG 미세자기 모델 시뮬레이션을 수행하여, SAF 자유층을 갖는 MTJ에 대하여 접합 크기 변화와 물질 특성이 자기수송 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 자화의 국부적 평형은 이 방정식을 적분하여 이루어졌다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. CoFeSiB SAF 구조의 자기적 특성

단일층 CoFeSiB의  $M_s$ 와  $K_u$ 는 각각  $560 \text{ emu/cm}^3$ 과  $2800 \text{ erg/cm}^3$ 로 측정되어 CoFe( $1400 \text{ emu/cm}^3$ )보다 낮은  $M_s$  그리고 NiFe( $1000 \text{ erg/cm}^3$ )보다는 높은  $K_u$ 를 보였다. 비정질 CoFeSiB를 MTJ의 자유층으로 사용하는 것은 이것의 낮은  $M_s$ 와 높은  $K_u$ 가 낮은 스위칭 자기장  $H_{sw}$ 을 얻기 위한 필수적 요소이기 때문이다. Ta 5/CoFeSiB ( $t=1, 1.5, 2, 2.5, 3$ )/Ru ( $d=0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2$ )/CoFeSiB ( $7-t$ )/Ta 5 (in nm) SAF 구조를 제작하고 VSM을 사용하여 이것의 자기적 특성을 조사하였다. Fig. 1에서  $t=1.5$ 와  $d=1.0 \text{ nm}$ 에서 이방성이 가장 잘 나타나고, 자화 반전 시 두 자성층 사이에 반평행한 결합 범위가 길게 나타났다. SAF 특성은  $d=1.0 \text{ nm}$ 를 제외하고 나타나지 않았으며,  $H_c$ 는  $R_u$ 의 두께에 의한 변화는 거의 없었다(모든 경우에서 대략  $3 \text{ Oe}$ ). 정자기에너지와 정자기결합 때문에 SAF 구조의 하부층과 상부층의 두께 차이는  $2 \text{ nm}$ 에서  $3 \text{ nm}$ 이다. 교환 결합에너지( $J_{ex}$ )는 다음과 같이 표현된다[8].

$$H_s = -J_{ex}(M_1 t_1 + M_2 t_2) / \{ \mu_0 (M_1 t_1 - M_2 t_2) \}$$

여기에서  $M_1$ ,  $M_2$ 와  $t_1$ ,  $t_2$ 는 각각 두 강자성층의 자화도와 두께이며,  $H_s$ 는 포화자기장이다. 계산된  $J_{ex}$ 는  $H_s = 50 \text{ Oe}$ ,

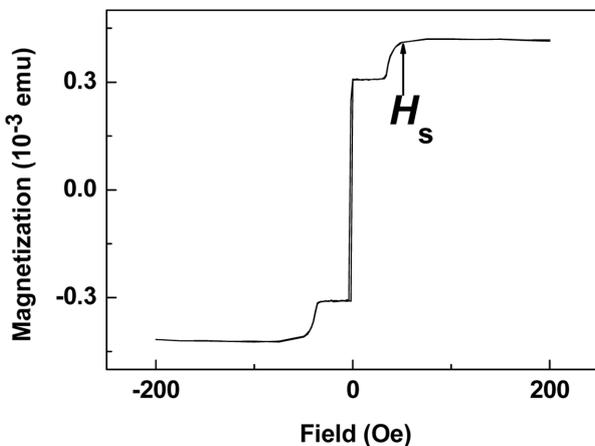


Fig. 1. Magnetization curve of synthetic antiferromagnetic structure Ta 5/CoFeSiB 1.5/Ru 1.0/CoFeSiB 5.5/Ta 5 (in nm).

$M_1 = M_2 = 560 \text{ emu/cm}^3$ ,  $t_1 = 1.5 \text{ nm}$ , 그리고  $t_2 = 5.5 \text{ nm}$ 일 때  $-0.003 \text{ erg/cm}^2$ 이고 이 결과는 CoFe와 CoFeB SAF 구조에서 얻어진 값보다 낮은 값이다[2, 9].

#### 2. 실험에 의한 TMR 비와 스위칭 자기장

자기수송(magneto-transfer)곡선에 대한 SAF 구조의 특성을 조사하기 위하여, CoFeSiB의 단일 및 SAF 자유층을 만들었다. 터널접합의 구조는 Si-SiO<sub>2</sub>-Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO<sub>x</sub>/single (CoFeSiB7) 또는 SAF (CoFeSiB 1.5 or 2.5/Ru 1.0/CoFeSiB 5.5 or 4.5)/Ru 60(in nm)로 하여 제작하였다.

Fig. 2에서 SAF 자유층을 갖는 MTJ는 단일자유층 MTJ보다 낮은 TMR비와  $H_c$ 를 나타내었다. 즉, SAF(1.5/1.0/5.5) : SAF(2.5/1.0/4.5) : 단일층 구조(7)에 대하여 각각 TMR비는 18% : 20% : 28%이고  $H_c$ 는 각각 4 Oe : 5 Oe : 6 Oe이다. 단일 자유층 구조에서 스위칭 자기장(특히  $H_c$ )은 물질의 형상 자기이방성에 의한 특성이 잘 나타났다. CoFeSiB가 낮은  $M_s$ 와 높은  $K_u$ 를 가진 것 때문에 CoFeSiB 단일 자유층 MTJ( $H_{sw} = 6 \text{ Oe}$ , TMR비 = 28%)에서 기존의 CoFe층( $H_{sw} = 54 \text{ Oe}$ , TMR비 = 36%)과 NiFe 층 MTJ( $H_{sw} = 5 \text{ Oe}$ , TMR비 = 19%)보다 우수한 스위칭 특성을 얻을 수 있었다. CoFeSiB 단일 자유층을 갖는 MTJ의 TMR비가 CoFe 자유층으로 갖는 MTJ보다 낮고 NiFe을 자유층으로 갖는 MTJ보다 높게 나타나는 것은 CoFeSiB의 스핀분극(spin polarization)은 CoFe보다 낮고 NiFe보다는 높기 때문이다. CoFe 자유층 MTJ는 TMR비가 높기는 하지만  $H_{sw}$ 가 크기 때문에 고밀도 MRAM의 기록 작업(writing performance)에 문제가 있다. 한편, NiFe을 자유층으로 갖는 MTJ는 TMR비와 민감도가 낮아서 고밀도 MRAM에는 거의 쓰이지 않는다. 따라서, 비록 CoFeSiB 단

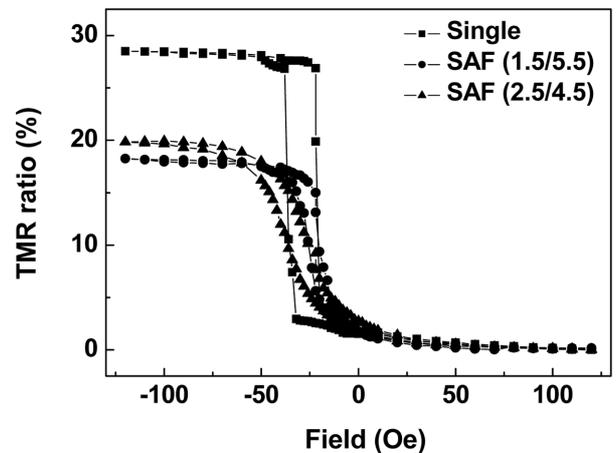


Fig. 2. Magnetoresistance curve for MTJs of the CoFeSiB single and SAF free layer. The tunnel junctions consisted of Si/SiO<sub>2</sub>/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO<sub>x</sub>/single (CoFeSiB 7) or SAF (CoFeSiB 1.5 or 2.5/Ru 1.0/CoFeSiB 5.5 or 4.5)/Ru 60 (in nm).

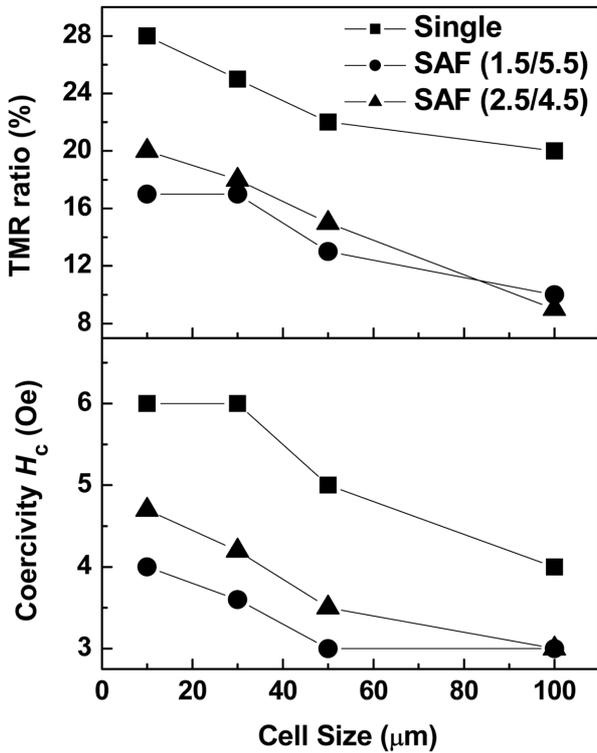


Fig. 3. TMR ratio and  $H_c$  as a function of the cell size for MTJs of the CoFeSiB single and SAF free layer. The tunnel junctions consisted of Si/SiO<sub>2</sub>/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO<sub>x</sub>/single (CoFeSiB 7) or SAF (CoFeSiB 1.5 or 2.5/Ru 1.0/CoFeSiB 5.5 or 4.5)/Ru 60 (in nm).

일 자유층을 갖는 MTJ가 상대적으로 낮은 TMR비를 갖지만  $H_{sw}$ 가 낮고 TMR 곡선의 각형비가 가장 좋은 특성을 나타내는 것은 흥미로운 일이다. CoFeSiB SAF 자유층 MTJ의 경우, 마찬가지로 TMR비는 비교적 낮았으나 TMR 곡선의 각형비가 우수하게 유지되며  $H_c$ 가 더욱 감소하였다.

Fig. 3은 CoFeSiB SAF 자유층과 단일 자유층 구조에 대하여  $H_c$ 와 TMR비를 터널접합 크기의 함수로 나타내었다.  $H_c$ 와 TMR비는 접합크기에 대해 반비례하였고, 시료크기의 모든 범위에서 CoFeSiB 단일 자유층 MTJ는 CoFeSiB SAF 자유층 MTJ의 경우보다 더 높은 TMR비와  $H_c$ 를 보였다.

### 3. 시뮬레이션에 의한 스위칭 자기장

미세자기 모델링 시뮬레이션이 SAF를 자유층으로 한 MTJ의 시료 크기 변화가 자기수송 거동에 미치는 효과를 알아보기 위하여 수행되었다. 약간 시뮬레이션 모델링을 간단화하려는 노력때문에 미세구조의 자세한 부분을 포함하는 것이 어려웠다 하더라도, 시뮬레이션에 의한  $H_c$  값이 각 셀구조의 크기에 대해 각각 상한치라고 생각한다. Fig. 4에서와 같이 CoFeSiB 1.5/Ru 1.0/CoFeSiB 5.5(in nm) SAF 구조에서는 CoFeSiB 단일 자유층 구조와 비교 하였을 때  $H_c$ 는 급격히

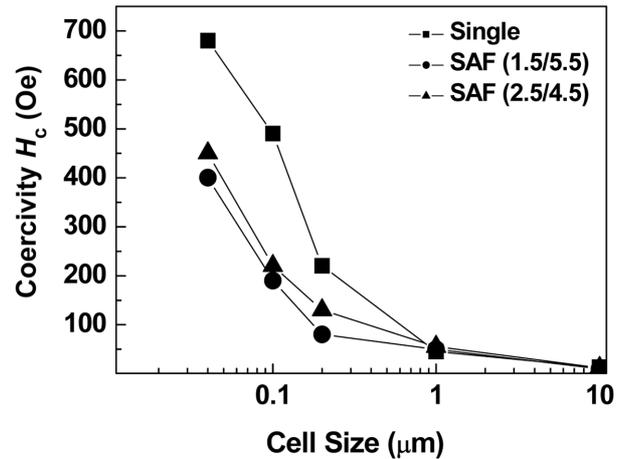


Fig. 4. Cell size dependence of the switching field for MTJs of the CoFeSiB single and SAF free layer by micromagnetic simulation.

감소함을 알 수 있었다.

이러한 SAF 자유층 구조에서, 이방성이 잘 나타나고 자화 반전시 자화의 반평행정렬이 발생하였다. CoFeSiB SAF 구조는 CoFe 그리고 CoFeB SAF 구조에서보다 낮은  $J_{ex}$ 를 갖기 때문에 자화반전시 반강자성 정렬을 유지함으로써 기간접성 회전은 다른 물질로 구성된 SAF 구조의 경우에서보다 약하다. 따라서 이러한 낮은  $J_{ex}$ 는 크기에 의존하는  $H_{sw}$ 를 나타내게 한다. 가장 흥미로운 결과는 이러한 바람직하지 않은  $H_{sw}$ 의 시료 크기 의존성에도 불구하고 CoFeSiB SAF구조는 낮은  $H_c$ 와 높은  $K_u$  때문에 다른 물질로 구성된 SAF구조보다 낮은  $H_c$ 를 보였다는 점이다.

## IV. 결 론

CoFeSiB 단일 자유층과 SAF 자유층으로 한 MTJ에 대하여 micrometer시료 크기 영역과 submicrometer 크기 영역에 대하여 각각 실험과 미세자기 시뮬레이션을 통해 TMR 비와 자기스위칭 특성을 조사하였다. CoFeSiB SAF 자유층으로 한 MTJ에서 총 자기모멘트 또는 정자기 에너지가 낮기 때문에, 단일 자유층의 경우보다 더 낮은 TMR비와 보자력  $H_c$ 를 보였다. 또한 CoFeSiB SAF 구조는 보다 낮은  $J_{ex}$ 를 가지며, 그리하여 스위칭 자기장의 시료크기 의존성이 나타난다. 그러나 CoFeSiB의 낮은  $M_s$ 와 높은  $K_u$ 를 갖는 것과 같은 특성들은 micrometer와 submicrometer 시료크기 범위에서도  $H_c$ 를 줄임으로써 자기스위칭 특성에 유리한 것으로 확인하였다.

## 참고문헌

[1] W. J. Gallagher, S. S. P. Parkin, Yu Lu, X. P. Bian, A. Marley,

- K. P. Roche, R. A. Altman, S. A. Rishton, C. Jahnes, T. M. Shaw, and Gang Xiao, *J. Appl. Phys.*, **81**, 3741 (1997).
- [2] T. Nozaki, Y. Jiang, H. Sukegawa, N. Tezuka, A. Hirohata, K. Inomata, and S. Sugimoto, *J. Appl. Phys.*, **95**, 3745 (2004).
- [3] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, *Philos. Trans. Roy. Soc., Ser.*, **A240**, 559 (1948).
- [4] A. Käufler, Y. Luo, K. Samwer, G. Gieres, M. Vieth, and J. Wecker, *J. Appl. Phys.*, **91**, 1701 (2002).
- [5] M. S. Song, B. S. Chun, Y. K. Kim, I. J. Hwang, and T. W. Kim, *J. Appl. Phys.*, in press.
- [6] F. E. Luborsky, *Amorphous metallic alloys*, London, U.K.: Butterworths (1983).
- [7] D. Wang, C. Nordman, J. Daughton, Z. Qian, and J. Fink, *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2269 (2004).
- [8] H. A. M. van den Berg, W. Clemens, G. Gieres, G. Rupp, M. Vieth, J. Wecker, and S. Zoll, *J. Magn. Magn. Mater.*, **165**, 524 (1997).
- [9] N. Wiese, T. Dimopoulos, M. Rührig, J. Wecker, H. Brückl, and G. Reiss, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2020 (2004).

## Magnetization Switching of MTJs with CoFeSiB/Ru/CoFeSiB Free Layers

S. Y. Lee, S. W. Lee, and J. R. Rhee\*

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

(Received 4 June 2007, in final form 18 June 2007)

Magnetic tunnel junctions (MTJs), which consisted of amorphous CoFeSiB layers, were investigated. The CoFeSiB layers were used to substitute for the traditionally used CoFe and/or NiFe layers with an emphasis given on understanding the effect of the amorphous free layer on the switching characteristics of the MTJs. CoFeSiB has a lower saturation magnetization ( $M_s$ : 560 emu/cm<sup>3</sup>) and a higher anisotropy constant ( $K_u$ : 2800 erg/cm<sup>3</sup>) than CoFe and NiFe, respectively. An exchange coupling energy ( $J_{ex}$ ) of -0.003 erg/cm<sup>2</sup> was observed by inserting a 1.0 nm Ru layer in between CoFeSiB layers. In the Si/SiO<sub>2</sub>/Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/AlO<sub>x</sub>/CoFeSiB 7 or CoFeSiB ( $t$ )/Ru 1.0/CoFeSiB (7- $t$ )/Ru 60 (in nm) MTJs structure, it was found that the size dependence of the switching field originated in the lower  $J_{ex}$  using the experimental and simulation results. The CoFeSiB synthetic antiferromagnet structures were proved to be beneficial for the switching characteristics such as reducing the coercivity ( $H_c$ ) and increasing the sensitivity in micrometer size, even in submicrometer sized elements.

**Keywords** : amorphous ferromagnet, CoFeSiB, magnetic random access memory (MRAM), switching field, synthetic antiferromagnet (SAF), tunneling magnetoresistance (TMR).