

# 비정질 n-형 Si 박막을 이용한 자기터널 트랜지스터 특성 연구

상지대학교 이상석\*, 이진용, 함상희, 김순섭, 유호진, 김보경, 황도근  
고려대학교 이궁원, 단국대학교 김선옥, 숙명여자대학교 이장로

## Characteristics of Magnetic Tunnel Transistors Using the Amorphous n-Type Si Films

Sang-Ji University S.S. Lee\*, J.Y. Lee, S.H. Ham, S.S. Kim, H.J. Yoo, B.K. Kim, D.G. Hwang  
Korea Univ. K. Rhie, Dankook Univ. S.W. Kim, Sookmyung Women's Univ. J.R. Rhee

### 1. 서 론

스핀전자소자 연구 분야의 가장 큰 관심은 전하와 스핀의 자유도를 동시에 고려하여 메모리 및 논리용 자기터널 트랜지스터 (magnetic tunnel transistor; MTT)를 구현하려는데 있다. S. S. P. Parkin 연구팀에 의해 개발된 자기터널링 접합 (magnetic tunneling junction; MTJ)형 또는 스핀밸브 (spin-valve; SV)형 MTT 소자들은 이미터/베이스 전압( $V_{EB}$ )의 변화에 따라 주입된 hot 전자들의 에너지 차이를 이용한 MTJ의 고정층을 이미터로 자유층 CoFe를 베이스로 기판 n-GaAs 반도체를 콜렉터로 적용한 것과 Cu나 Au 공간층을 이미터로 터널링 장벽층  $Al_2O_3$ 를 통과한 SV를 베이스로 기판 n-GaAs 반도체를 콜렉터로 적용한 것 등 두 가지이다. 이들 모두 베이스에 도달한 hot 전자들의 감쇄길이 (attenuation length;  $\lambda_{maj}$ )가  $V_{EB}=1.0\sim 1.8$  V에 대하여  $\lambda_{maj}=60\sim 90$  Å가 되므로 베이스를 지나는 이미터 전류( $I_E$ )와 콜렉터 전류( $I_C$ ) 비인 전달비 (transfer ratio;  $I_C/I_E$ )가 약  $10^{-4}$ 로 유지됨을 보고하였다[1]. 또한 베이스 층의 두께가 120 Å 까지 MTT의 자기전류 (magneto-current; MC)인 콜렉터 전류  $I_C$  값은 외부의 자장에 따라 이미터와 베이스간의 자화벡터 배열이 평행 및 반평행이 될 때  $I_C$ 의 백분율인 MC는 65%에서 1250%까지 상온에서 관측하여 MTT 소자로서 개발할 수 있도록 새 장을 열었다[1]. 본 연구는 기존의 반도체 기판을 콜렉터로 하는 하부층 구조에서 벗어나 상부층이 비정질 n-형 Si 반도체 박막으로 이용한 새로운 MTT 구조를 소개하고 상온에서 얻은 MC 특성을 조사하여 보고하였다.

### 2. 실험방법

FIG. 1(a)에 도식한 에너지 개략도를 갖는 MTT의 제작은 상온에서  $5\times 10^{-9}$  Torr인 UHV 챔버에 Kaufman 소스와 직경 3-인치 크기의 6개 타겟이 장착된 이온빔 증착 (ion beam deposition; IBD)법을 이용하였다. 4가지 형태의 금속 마스크 (FIG. 1(b), (c) 참조)가 사용되었다. FIG. 1(d) 처럼 유리 기판 위에 Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/FeMn(100 Å)/NiFe(40 Å)/Co<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub>(30 Å)를 이미터 층으로 하였고  $Al_2O_3$ (20 Å) 장벽층을 지나 Co<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub>(30 Å)을 베이스 층으로 하였다.  $Al_2O_3$  장벽층 제작방법은 Al을 20 Å 증착 한 후, 전자 사이클로트론 공명 (electron cyclotron resonance; ECR) 챔버로 옮겨와서 7 min 30 s 동안 1 mTorr 분위기에서 산소 플라즈마 처리를 하였다. 특히 콜렉터인 Si 박막 증착은 3인치 n-형 Si 타겟을 사용하였다. FIG. 1(c)는 금속 마스크에 의한 200  $\mu$ m 선폭을 갖고 6개의 전극을 형성한 실제의 접합소자를 찍은 사진이다. 중앙에 n-Si박막의 100 Å-두께에 의한 모습이 보인다. 대각선 형태의 전극용 Al(100 Å)

박막은 비정질 n-Si 박막과 넓은 접합 면적에서 쇼트키(Schottky) 장벽을 형성하지 않고 보았다. FIG. 1(d)는 전체의 다층구조를 도시화하였고 TMR 접합저항( $\sim 10$  k $\Omega$ 정도)과 top 층과 Si 박막 사이의 저항은 약 10  $\Omega$  정도이었으며 실제 MTJ의 MR 측정시는 bottom층인 Ta/NiFe/FeMn/NiFe/CoFe과 Al 전극층에 인가전압에 의한 전류단차를 택하였고 bottom층과 top층 단자에 전압을

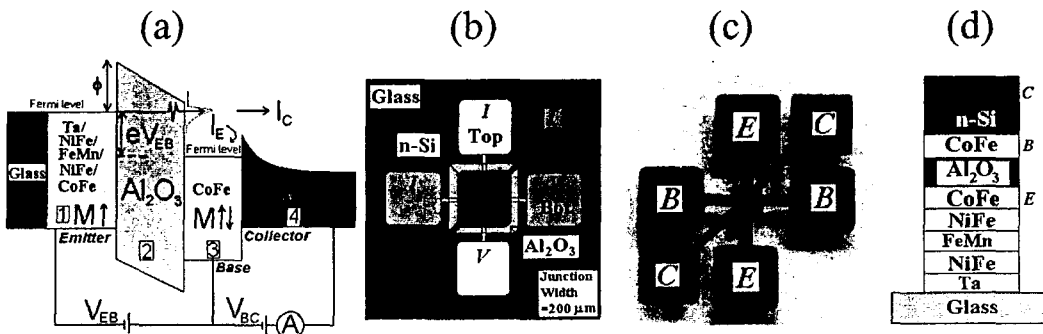


FIG. 1. (a) Schematic energy diagram of the magnetic tunnel transistor. Region 1 is emitter, region 2 is the  $Al_2O_3$  tunneling barrier, and region 3 is the base. The collector is the n-type Si films. (b) Schematic and (c) photo of the active area of a MTT. (d) Multilayer structure of a MTT.

측정하여 터널자기저항의 특성을 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

FIG. 2(a)는 MTJ인 이미터-베이스의 TMR 측정곡선이다. 인가전압이 50 mV에서 TMR=17.5%로 나타났다. TMR의  $V_{EB}$  전압에 대한 의존성은 600 mV일 때 5%으로 감소하는 전형적인 MTJ 특성을 갖고 있었다. 한편 FIG. 2(b)는 비정질 n-형 Si 박막의 두께 100 Å을 콜렉터로 하고  $\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}$ (30 Å)층을 베이스로 하였을 때 MTT에 대한 콜렉터 전류( $I_C$ )의 자기장에 대한 의존성을 보여주고 있다. MTT의 베이스 자기모멘트의 상대적인 방향에 따라  $V_{BE}=0.65$  V에서 15 Oe의 외부 자기장의 변화에 의해 이미터와 베이스의 자기모멘트가 스위칭 역할을 하면서  $I_C=76$  nA에서  $I_C=99$  nA까지 변화하였다. 계산된  $MC = (I_{C,P} - I_{C,AP}) / I_{C,AP}$ 는 30% 정도로 비교적 큰 값을 얻을 수 있었다.

한편 MC의  $V_{EB}$ 에 대한 의존성을 FIG. 3(a)에 나타내었다.  $V_{EB}=0.4$  V 이하에서 MC값이 적은 것은 Parkin 그룹의 MTT의 MC 특성과 마찬가지로 선풍이 200~250  $\mu\text{m}$ 인 그림자 형 금속 마스크로 제작된  $\text{Co}_{75}\text{Fe}_{25}$  베이스와 비정질 n-형 Si 콜렉터 박막 사이에 있는  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 의 접합면적 크기에 의해 상대적인 누설 전류효과로 생겼기 때문으로 보인다. 누설 전류가 무시되고 hot 전자의 전류가 급격히 증가하는  $V_{BE}$ 가 0.5 V 이상일 경우, 자성체와 반도체 계면에 존재하는 쇼트키 장벽으로 인해 이미터로부터 주입된 전자들이 Fermi 에너지 준위 근방에서 콜렉터로 흐르는 자기터널 전류를 갖게되어 0.6 V 근방에서 외부 자장에 의해 조절되어 30% 이상의 최대 MC가 존재하게 된다. 그러나  $V_{EB}$ 가 0.7 V 이상일 때 급격히 감소하는 이유는 접합의 불균일이나 기하학적인 효과 또는 비정질 n-형 Si 박막의 특성에 기인한다고 볼 수가 있다. FIG. 3(b), (c), (d)는 MTT의  $I_C/I_E$ 인 전달비나 콜렉터에 도달하는 hot 전자의 집속 및 투과 효율 특성을 갖는  $I_C$ ,  $I_E$ ,  $I_C/I_E$ 의 이미터/베이스 인가전압에 대한 의존성을 나타낸 것이다. 여기서  $V_{EB}=0.6$  V 이상일 때,  $I_C/I_E$ 는  $10^{-5}$  근방의 값으로 나타났으며, 터널 전류는  $I_E$ ,  $I_C$ 들은 Sir mons 공식을 적용할 때 지수적으로 증가함을 알 수 있었다.

### 4. References

[1] S. van Dijken, X. Jiang, and S. S. P. Parkin, "Spin-dependent hot electron transport in  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  and  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  films on GaAs(001)", Phys. Rev. B **66**, 094417 (2002). "Comparison of magnetocurrent and transfer ratio in magnetic tunnel transistors with spin-valve bases containing Cu and Au spacer layers", Appl. Phys. Lett, **82**, 775 (2003).

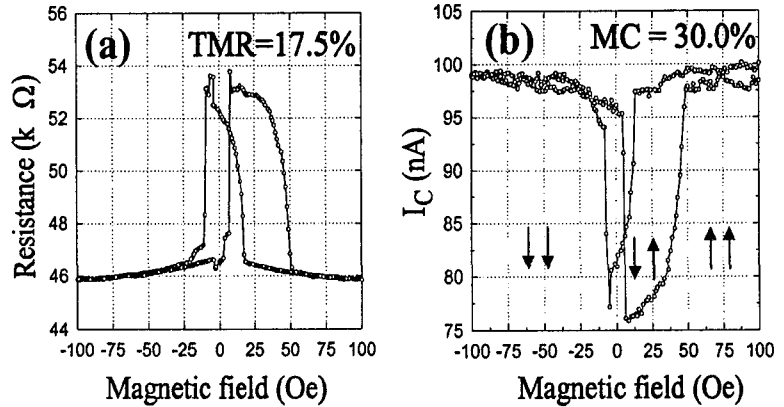


FIG. 2. (a) TMR measurement on a Ta(50 Å)/NiFe(120 Å)/FeMn(100 Å)/NiFe(40 Å)/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ (20 Å)/CoFe(30 Å) MTJ structure. (b) Collector current of an MTT as a function the applied magnetic field showing a magnetocurrent of 30% at room temperature. The emitter/bias voltage is 0.65 V.

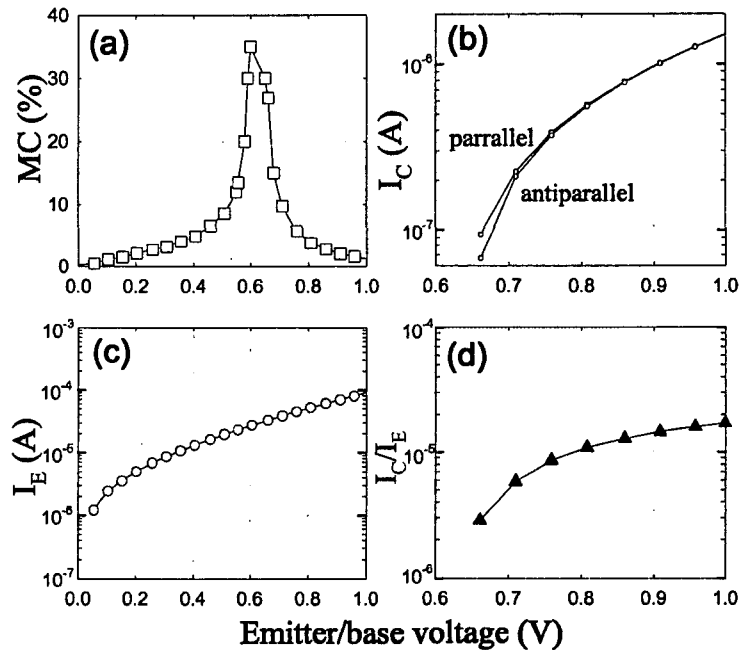


FIG. 3. The emitter/base bias dependence of (a) the magnetocurrent, (b) the collector current for parallel and antiparallel alignment of the emitter and base magnetic moments, (c) the emitter current, and (d) the transfer ratio  $I_C/I_E$  at room temperature.