

Fe/Al₂O₃/Co 자기 터널링 접합 제작 및 자기수송현상에 관한 연구

최서윤 · 김효진

충남대학교 공과대학 재료공학과
대전광역시 유성구 궁동 220, 305-764

조영목 · 주웅길

한국과학기술원 재료공학과
대전광역시 유성구 구성동 373-1, 305-701

(1997년 12월 29일 받음, 1998년 2월 2일 최종수정본 받음)

스파터링법으로 Si(001) 기판 위에 증착된 Fe(1000 Å)/Al₂O₃(*t* Å)/Co(1000 Å) 자기 삼층 접합들의 터널링 자기저항 성질을 연구하였다. 두께 *t*=50~200 Å의 Al₂O₃ 층을 반응성 rf 스파터링법으로 바닥 자성층 위에 직접 증착하였다. 비교를 위해, Pt/Al₂O₃/Pt 터널링 접합을 제조하여 상온에서 전류-전압(*I-V*) 특성을 측정된 결과, 확연한 비선형 nonohmic 거동을 나타내었다. 이로부터 반응성 스파터링된 Al₂O₃가 상온에서도 pinhole이 없는 훌륭한 절연 터널링 장벽을 형성함을 확인할 수 있었다. Fe/Al₂O₃/Co 자기 터널링 접합들은 Pt/Al₂O₃/Pt 접합들에 비해 상당한 접합저항의 열화를 보였으며, 상온에서 대략 0.1%의 터널링 자기저항비를 나타내었다. Fe를 꼭대기 전극으로 하는 접합들에 비해, Co를 꼭대기 전극으로 하는 대부분의 자기 터널링 접합들이 보다 안정된 *I-V* 및 터널링 자기저항 특성을 보였다. 이러한 실험결과들을 자기 터널링 접합들의 계면구조와 관련지어, Pt/Al₂O₃/Pt 접합과 비교하여 논의하였다.

I. 서 론

자기저항 효과란 자기장 인가시 재료의 전기적 저항이 변화하는 현상으로 컴퓨터 하드디스크 헤드, 자기기록소자(MRAM) 및 자기장 센서 등 여러 분야로의 응용성이 있다. 이러한 현상은 스핀을 갖는 전자가 자화된 매질을 통과할 때 스핀 방향과 자화 방향의 불일치에 따른 산란 현상 때문에 전기적 저항의 변화가 발생하는 것이다. 이러한 특성을 나타내는 재료는 자성다층박막 혹은 granular 박막등의 금속박막이 주종을 이루며, 거대자기저항 효과[1]라 불리는 매우 큰 저항변화 현상을 나타내어 많은 관심을 받아왔다. 자기저항 재료의 경우, 실제 응용에 있어서는 저항변화율에 대한 포화자장의 비로 정의되는 감지도(sensitivity = MR ratio / saturation field)가 중요한 요소가 된다. 일반적으로 위에 언급된 금속자기박막의 경우, 저항변화율이 큰 경우 포화자장도 커지게 되는 적은 감지도를 나타내고 있어 실제 응용에 많은 제한을 받고 있다[2, 3].

최근에, 스핀에 의존하는 전자산란을 일으키는 새로운

재료로서 강자성체/부도체/강자성체의 터널링 삼층 접합구조[4, 5]가 제시되었고, 이 접합구조의 경우 이론적으로 상온에서도 24% 이상의 높은 자기저항비를 나타낼 수 있어 현재 많은 연구가 진행되고 있다[6-10]. 터널링 접합은 양자 터널링 현상이 일어날 수 있을 정도로 얇은 부도체 장벽을 강자성체 박막 사이에 증착하여 터널링 전자의 스핀 의존성 산란에서 기인한 자기저항 효과를 얻는 것이다. 이러한 터널링 자기저항 소자는 상온에서의 높은 자기저항비와 낮은 포화자장 때문에 큰 감지도를 나타내며, 금속박막에 비해 높은 impedance와 적은 interlayer coupling을 갖는 장점을 갖고 있다.

기존의 터널링 접합제작에 있어서는 대부분 산화되기 쉬운 금속을 선택하여 공기중에서 열산화시키는 방법[6-8]이 주종을 이루고 있다. 이 경우, 산화되지 않은 금속층이 남게 되는 문제점이 있다. 실제로 전자 산란이 자성층/비자성층 계면사이에서 일어나는데, 보다 높은 자기터널링 효과를 얻기 위해서는 자성층/비자성층 계면을 금속/부도체 계면과 일치시키는 것이 필요하다[9]. 이에 최근에 들어서는, 반응성 스파터링법 등을 이용하여 첫

번째 자성층 위에 직접 절연층을 증착하는 연구[9, 10]가 이루어지고 있다.

터널링 접합 제작에 있어서의 가장 큰 문제점은 훌륭한 터널링 특성을 나타낼 수 있는 절연층의 재료선택과 제조 기술에 있다. 현재까지 널리 사용되는 부도체는, 좋은 열역학적 안정성과 잘 정의된 화학양론을 가지는 Al_2O_3 과 HfO_2 로서, 특히 Al_2O_3 터널링 접합들에 관한 자기저항 특성 연구가 집중적으로 수행되어 왔다. 하지만, 아직까지 부도체 장벽 자체의 성질 및 자성층/절연층의 계면 성질과 터널링 자기저항 현상과의 연관성있는 연구는 부족한 실정이다. 또한 HfO_2 접합과 달리, 반응성 스파터링된 Al_2O_3 접합에 대한 특성 연구는 매우 드물다.

따라서, 본 연구에서는 Al_2O_3 절연층을 rf 반응성 스파터링법으로 직접 증착하여 증착조건에 따른 터널링 장벽 특성의 조사와 함께 자성층/절연층 계면 성질과 접합의 터널링 자기저항 특성과의 관련성을 연구하고자 한다.

II. 실험 방법

화학적으로 세정된 1 in. \times 1 in. 단결정 Si(001) 기판 위에 마그네트론 스파터링 방법을 사용하여 M/ Al_2O_3 /M 터널링 접합들을 제작하였다. 여기서, M은 dc 스파터링된 자성천이금속(Co 혹은 Fe)이며, Al_2O_3 는 rf 반응성 스파터링법에 의해 증착되었다. 접합들은 설계된 shadow 마스크를 사용하여 접합면적이 0.0625 mm^2 이 되도록 증착하였다. 접합구조에서 각 층은 다른 shadow 마스크를 필요로 하기 때문에 마스크의 교환을 위해 진공 챔버를 대기 중에 노출시켰다. 이때 오염을 줄이기 위하여 각 과정에서 isopropanol을 사용하여 세정하였다. 모든 박막층들은 초기 진공도 5×10^{-7} torr 이하, 증착시 압력은 5×10^{-3} torr에서 상온 스파터링함으로써 증착하였으며, 증착 전력은 경우에 따라 $5 \sim 25\text{ \AA}/\text{min}$ 범위의 증착속도를 얻도록 선택하여 인가하였다. 자성층들은 $500 \sim 1000\text{ \AA}$ 의 두께를 가지며, $50 \sim 200\text{ \AA}$ 두께의 Al_2O_3 층은 순수한 Al 금속 타겟을 사용하여 Ar + O_2 분위기에서 반응성 스파터링함으로써 증착되었다. 터널링 접합의 증착조건을 요약하여 Table 1에 나타내었다.

얻어진 증착층들의 결정구조와 표면미세구조는 각각 X-선 회절(XRD)과 주사전자현미경(SEM)으로 분석하였으며, Al_2O_3 층의 조성비는 wave-length-dispersive X-ray spectroscopy (WDS)를 사용하여 결정하였다. 삼층 접합에서 각 층간의 상호확산 및 M/ Al_2O_3 와 Al_2O_3 /M 계면 분석을 위해 Auger electron spectroscopy (AES)를 이용하여 깊이 변화에 따른 성분 변화(depth profile)

Table 1. Deposition conditions of M/ Al_2O_3 /M (M = Fe or Co) tunneling junctions.

	Fe	Co	Al_2O_3
Base pressure	5×10^{-7} torr		
Method	dc	dc	rf reactive
Working pressure	5×10^{-3} torr		
Sputtering power	17 W	25 W	250 W
Deposition temperature	Room temperature		
Sub. -to-target distance	40 cm		

를 조사하였다. 전기적 및 터널링 자기저항 특성을 조사하기 위하여 전류-전압(I-V) 곡선 및 외부 자기장에 따른 터널링 저항(R)을 상온에서 사단자법으로 측정하였다. 자기장은 박막의 수평방향으로 인가하였다. 자기적 특성은 시료진동형자력계(VSM)를 사용하여 상온에서 자화-자기장 이력곡선(M-H hysteresis curve)를 측정하여 분석하였다. 또한 비교를 위해, Pt/ Al_2O_3 /Pt의 접합구조를 제작하여 I-V 특성 및 계면 특성을 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 상온에서 dc 스파터링법에 의해 증착된 자성 금속 Fe 박막과 Co 박막의 표면 및 단면의 미세구조를 보여준다. 반응성 스파터링법에 의해 제작되는 터널링 접합의 경우, 자성금속박막의 표면 위에 직접 접하여 절연성 터널링 장벽이 형성되기 때문에 자성박막의 표면 형상과 거칠기가 중요하다. 표면사진을 통해 보면 바늘구멍(pin-hole)이 거의 없는 치밀하고 균일한 미세구조를 이루고 있음을 알 수 있으며, 단면사진을 통해 박막이 columnar한 성장을 하는 것을 알 수 있다. 자성금속박막의 경우, 가능한 한 증착 전압을 낮추는 것이 양질의 표면구조 및 얇은 Al_2O_3 층으로의 확산 경향을 줄일 수 있는 것으로 관찰되어, 플라즈마가 형성되는 최저 전압에서 증착 실험을 행하였다. 본 실험 시스템의 경우, 안정적인 플라즈마를 유지하는 전류는 Fe에 대해서는 50 mA, Co에 대해서는 80 mA였다.

Fig. 2는 상온에서 VSM에 의해 얻어진 Fe(1000 \AA)와 Co(1000 \AA) 단층막의 자기이력곡선을 보여준다. 자기터널링을 관측하기 위해서는, 바닥 자성층과 꼭대기 자

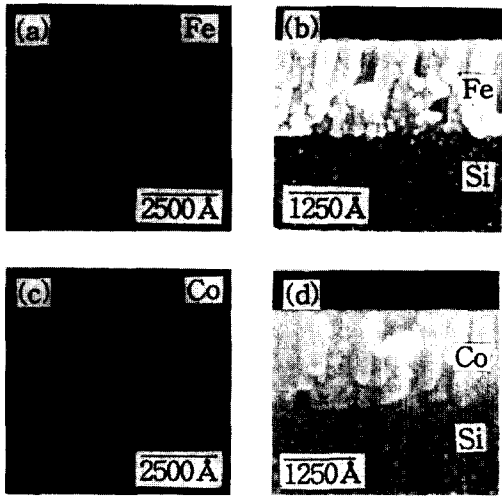


Fig. 1. SEM surface and cross-sectional photographs of the magnetic metal films deposited at 300 K: (a) and (b) Fe, (c) and (d) Co.

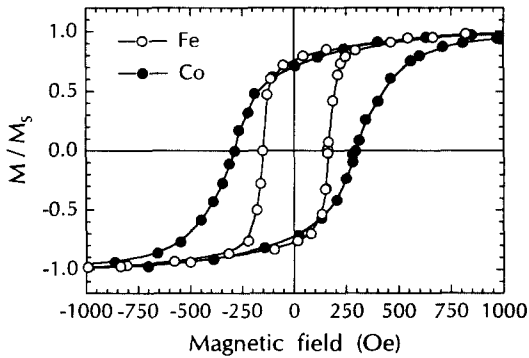


Fig. 2. The hysteresis loops obtained at 300 K of Fe (1000 Å) and Co (1000 Å) thin films grown on Si(001).

성층이 서로 다른 보자력 H_{c1} 과 H_{c2} 를 가짐으로써 $H_{c1} < H < H_{c2}$ 영역에서 평행하고 반평행한 모멘트 배열을 얻을 수 있어야 한다. 본 실험의 경우, Fe와 Co 박막의 측정된 보자력은 각각 $H_{c1} = 150$ Oe와 $H_{c2} = 316$ Oe를 나타내었다. 따라서, 150 Oe와 316 Oe 사이의 자장에서 터널링 자기저항효과가 일어날 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 3은 반응성 스파터링된 절연층 Al₂O₃ 박막의 산소분압에 따른 화학양론의 변화를 wave-length-dispersive X-ray spectroscopy (WDS)로 측정된 결과를 보여준다. Al은 산화경향이 매우 큰 금속(Al₂O₃ 생성열이

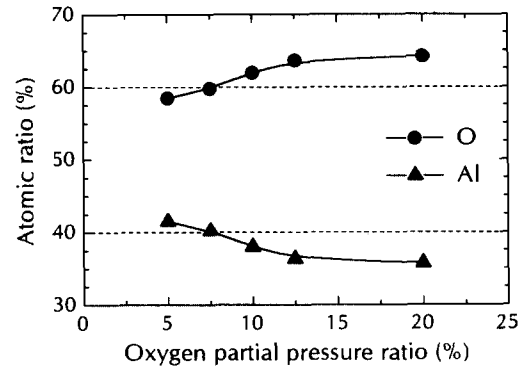


Fig. 3. Variation of the stoichiometry of the reactively sputtered Al₂O₃ thin films at 300 K with the pressure ratio p_{O_2} / p_{tot} in an Ar- O₂ mixture: $p_{tot} = 5 \times 10^{-3}$ torr.

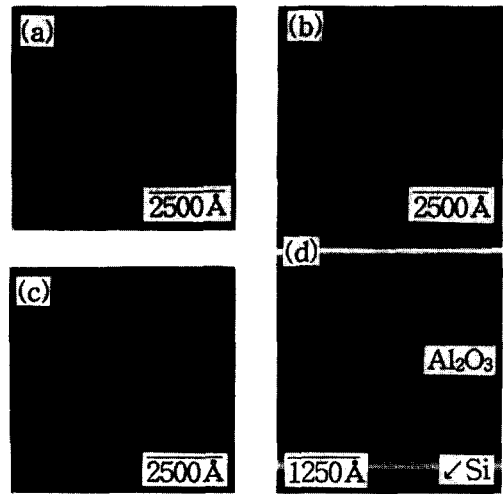


Fig. 4. SEM surface and cross-sectional images of reactively sputtered Al₂O₃ films at 300 K and oxygen partial pressure ratio of (a) and (d) 7.5 %, (b) 10 %, (c) 12.5 %.

-202 kcal/mole임)으로 산소와의 화학양론은 실험적 오차 내에서 비교적 균일하게 유지된다고 말할 수 있으나, 실험결과에 의하면 산소분압의 증가에 따라 산소 조성의 점진적 증가를 볼 수 있다. 화학양론비가, 산소분압이 7.5 %에서 증착된 시편의 경우에 가장 잘 맞는 것으로 나타났으며, 산소분압 5 % 이하의 조건에서 증착하였을 때는 Al₂O₃ 가 아닌 Al이 증착됨을 관측하였다. 한편, 20 % 이상의 산소분압의 경우, 화학양론비는 20 % 시편

의 경우와 동일하였으나 표면 미세구조가 나빠졌다. 산소분압에 따른 Al_2O_3 박막의 표면 및 단면 미세구조를 Fig. 4에 나타내었다. 대략 7.5%에서 12.5% 사이의 산소분압에서 치밀하고 균일한 표면을 형성하는 것을 알 수 있었으며, 단면사진으로부터 Al_2O_3 박막은 columnar 한 성장모드가 아닌 무방향성의 비정질형태를 가짐을 관찰할 수 있다.

Al_2O_3 박막의 구조적 성질을 X-선 회절(XRD) 실험을 통하여 분석한 결과, Fe나 Co와 달리 어떤 뚜렷한 회절 피크를 관찰할 수 없어서 비정질상을 형성함을 알 수 있었다. 기판온도를 200~600 °C로 변화시키면서 측정을 하였으나 Al_2O_3 박막의 결정화는 이루어지지 않았다. 또한 Al_2O_3 박막의 구조는 산소분압에 별로 민감하지 않았다.

자기터널링 삼층접합구조를 구성하는 각 층의 증착조건을 확립한 후, 우선 Al_2O_3 절연층의 터널링 수송특성을 평가하기 위하여 비자성 금속 Pt를 전극으로 Pt/ Al_2O_3 /Pt 접합을 제작하여 전류-전압($I-V$) 특성곡선을 측정하였다. 이를 위해, 접합을 통하여 일정하게 흐르는 전류를 변화시켜 가면서 두 금속전극 사이의 전압강하를 측정하였다. Al_2O_3 층의 증착조건과 두께에 따라 얻어진 Pt/ Al_2O_3 /Pt 접합의 $I-V$ 특성곡선들을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 제작된 접합들이 비선형 $I-V$ 특성곡선, 즉 nonohmic 수송특성을 나타낸다. 또한 절연층의 명목두께를 두 배로 하였을 때, 전류가 지수함수적으로 감소함을 볼 수 있다. 이로부터 Pt/ Al_2O_3 /Pt 접합이 Simmons[11]과 Stratton[12]에 의해 제시된 터널링 특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 0.05 V 이하의 전압에서 접합저항은 대략 100 MΩ의 값을 가지며, 상온에서도 터널링 현상을 나타내는 Al_2O_3 절연층 장벽이 형성됨을 확인할 수 있었다. 한편, 산소분압비 7.5%에서 12.5% 사이에서는 산소분압의 차이에 따른 $I-V$ 특성의 뚜렷한 변화는 관찰되지 않았다.

접합에서의 터널링 수송현상은 절연층/금속 및 금속/절연층의 계면특성, 즉 계면의 거칠기 및 diffuseness에 매우 민감하다. Pt/ Al_2O_3 /Pt 접합에 대한 Auger depth profile을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 원소의 분포 양상이 전형적으로 sharp한 계면을 나타내고 있으며, 측정 장비의 해상도 범위 내에서 분명한 Pt- Al_2O_3 계면 및 Al_2O_3 -Pt 계면을 형성하여 Al_2O_3 절연층이 잘 분리되어 있음을 알 수 있다. 이러한 계면특성으로 인해 Pt/ Al_2O_3 /Pt 접합의 경우, 상온에서도 뚜렷한 터널링 수송 특성을 관측할 수 있게 된다.

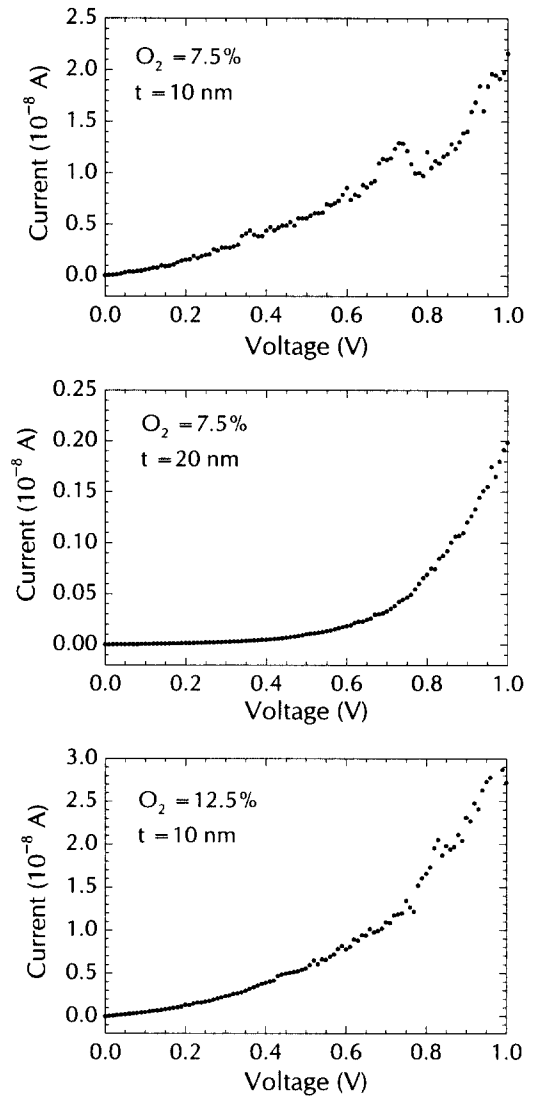


Fig. 5. $I-V$ curves of Pt/ Al_2O_3 /Pt junctions measured at 300 K. Here, t and O_2 denotes the thickness of the Al_2O_3 layer in nm and oxygen partial pressure ratio.

터널링 장벽으로 작용하는 절연층 Al_2O_3 박막의 증착조건을 최적화한 후, 보자력이 서로 다른 자성 전극 Fe와 Co 사이에 샌드위치된 Al_2O_3 층으로 구성되는 자기터널링 접합을 제작하였다. 하지만 터널링 접합 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 상부전극을 Co와 Fe로 바꾸어가며 실험하였다. Fig. 7은 Co/ Al_2O_3 (100 Å)/Fe/Si(001)와 Fe/ Al_2O_3 (100 Å)/Co/Si(001) 접합의 상온에서 측정된 $I-V$ 특성 결과를 보여

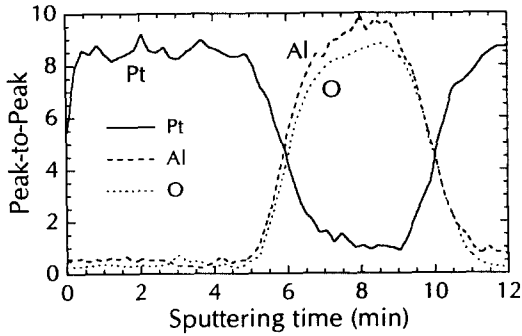


Fig. 6. Auger depth profile of a Pt/Al₂O₃ (100 Å)/Pt junction deposited at 300 K.

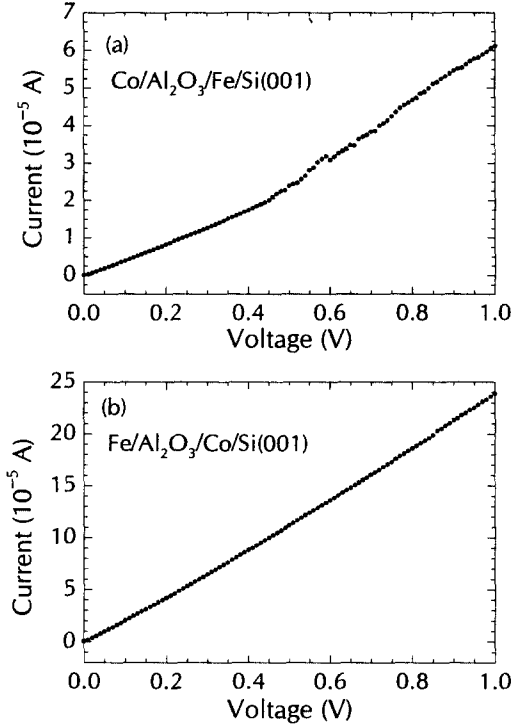


Fig. 7. I-V responses of nominally 100-Å-thick Al₂O₃ junctions with Fe and Co magnetic electrodes measured at 300 K: (a) Co as top electrode; (b) Fe as top electrode.

준다. 0.05 V 이하의 전압에서 상부전극 Co인 접합과 Fe인 접합의 접합저항은 각각 수십 kΩ에서 수백 kΩ 대로 Pt/Al₂O₃ (100 Å)/Pt 접합의 100 MΩ 대에 비하여 대단히 작아 급격한 접합저항의 열화가 일어남을 알

수 있었으며, 또한 터널링 수송특성으로서의 비선형성 nonohmic 거동이 확연히 관측되지 않았다. 이것은, 반응성이 없는 Pt를 전극으로 사용하였을 경우에 비해 Co나 Fe를 전극으로 사용한 경우, 계면에서 상호확산에 의한 intermixing 및 반응물 생성등의 계면구조 열화와 절연성 장벽자체의 열화에 따른 열전자 효과의 증가에서 기인하는 것으로 사료된다. 이를 확인하기 위하여 AES를 행하였다.

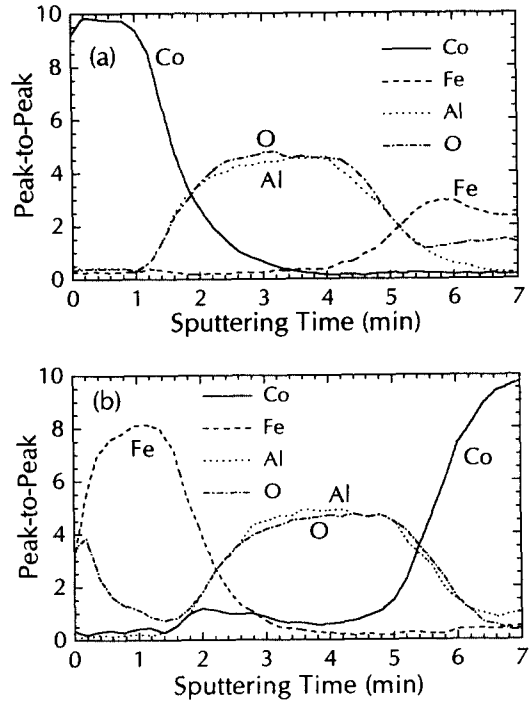


Fig. 8. Auger depth profiles of nominally 100-Å-thick Al₂O₃ junctions with Fe and Co magnetic electrodes: (a) Co as top electrode; (b) Fe as top electrode.

Fig. 8은 Co/Al₂O₃ (100 Å)/Fe/Si(001)와 Fe/Al₂O₃ (100 Å)/Co/Si(001) 접합에 대한 Auger depth profile들을 보여준다. 두 접합 모두, Pt/Al₂O₃ (100 Å)/Pt 접합(Fig. 6)에 비해 diffuse한 계면을 보임을 분명히 알 수 있다. 특히 Al₂O₃ 층 위에 Co를 증착시켰을 때의 Co/Al₂O₃ 계면은 비교적 sharp하지만(Fig. 8(a)) Co층 위에 Al₂O₃를 증착시켰을 때는 Co가 Al₂O₃ 층으로 깊이 확산되어 들어가 intermixing이 이루어짐을 관찰할 수 있다. 또한 바닥층과 Al₂O₃ 층이 만나는 계면에서 FeO 혹은 CoO 등의 산화물 계면층이 생성

됨을 볼 수 있는데, 이는 반응성 스파터링에 의한 Al₂O₃ 층의 증착초기에 바닥층들의 산화에 의한 것으로 사료된다. Fe를 상부전극으로 할 경우, 대기중 산소와의 반응으로 Fe 산화물 표면층이 또한 형성됨을 볼 수 있다.

Fig. 9는 Co/Al₂O₃ (100 Å)/Fe/Si(001)와 Fe/Al₂O₃ (100 Å)/Co/Si(001) 접합의 상온 터널링 자기저항(TMR) 특성의 측정결과를 보여준다. TMR 측정을 위해, 0.1 mA의 일정한 전류를 접합을 통하여 흐르게 한 상태에서 박막의 수평방향으로 인가되는 자기장의 세기를 변화시켜 가면서 두 금속전극 사이의 전압강하를 측정하였다. 이러한 자기터널링 접합들은 상온에서 0.1% 정도의 작은 터널링 저항변화($\Delta R/R_p = (R_a - R_p)/R_p$)를 나타내었다. 여기서 R_p 와 R_a 는 각각 평행한 자기 모멘트 짜임새에서의 저항과 반평행한 모멘트 짜임새에서의 저항을 나타낸다. 전반적으로 상부전극이 Co인 접합들이 Fe인 경우에 비해 다소 높은 값의 자기저항비를 나타내었다. 이론적인 터널링 자기저항비(TMR)는 두 자성층의 스핀 분극(P_1, P_2)으로부터 다음과 같이 예측된다[4, 5]:

$$TMR = \frac{\Delta R}{R_p} = \frac{R_a - R_p}{R_p} = \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2} \quad (1)$$

여기에서 연구된 자기 터널링 접합들의 경우, $P_{Co} = 0.44$ 와 $P_{Fe} = 0.34$ 로부터 이상적인 TMR은 31.5%로 예측된다. 따라서, 측정된 TMR 값이 식 (1)에 의한 예측치보다 훨씬 작음을 알 수 있다.

반응성 스파터링된 자기터널링 접합들에서 관측된 상온에서의 강한 TMR 열화는, $I-V$ 특성(Fig. 7)과 Auger depth profiles (Fig. 8)에서 확인한 것처럼 계면의 열화에 의한 절연층의 유효 장벽 높이(Φ)의 감소에서 주로 기인하는 것으로 사료된다. Slonczewski의 이론[13]에 의하면, 식 (1)과 달리 TMR 비는 스핀 분극에 의존할 뿐만 아니라 절연층의 장벽 높이에도 의존한다. 특히 Fe와 Co를 사용했을 때, Slonczewski가 제안한 식에 의해 계산된 TMR 비가 $\Phi = 0.5 \sim 1$ eV에서 0을 지남을 보여준다[8, 14]. 즉, 접합의 TMR 비는 자성층의 스핀분극 뿐만 아니라 계면의 미세구조에도 지대한 영향을 받게 된다. 또 다른 하나의 이유는, 반자성 산화물 계면층의 형성을 들 수 있다. 반자성 계면층의 존재는 자성층/절연층 계면에서의 스핀 뒤집기 산란을 야기하는 것으로 예측되며[10], 이러한 산란은 터널링 전자의 알짜분극을 감소시키고 따라서

MR 세기를 낮추게 된다.

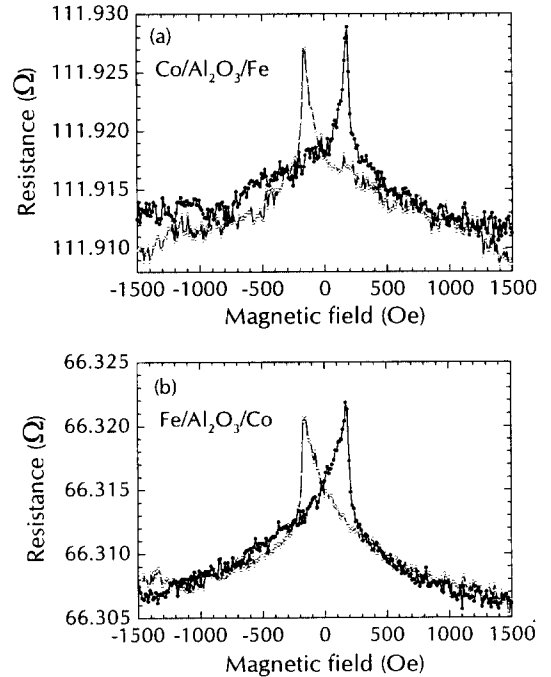


Fig. 9. Magnetoresistance (MR) responses of nominally 100-Å-thick Al₂O₃ junctions with Fe and Co magnetic electrodes measured at 300 K: (a) Co as top electrode; (b) Fe as top electrode.

IV. 결 론

본 연구에서는 반응성 스파터링에 의해 제작된 Fe-Al₂O₃-Co 자기터널링 접합들의 구조적 및 자기저항특성을 연구하였다. 비교를 위해 Pt/Al₂O₃/Pt 접합을 제작하여 Al₂O₃ 절연층의 자체의 특성을 평가한 결과, 반응성 스파터링된 Al₂O₃가 상온에서도 안정적인 절연성 장벽 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 제작된 자기터널링 접합으로부터 상온에서 터널링 MR 현상을 관찰할 수 있었으나, 계면의 열화로 인해 MR 특성의 강한 열화가 일어남을 알 수 있었다. 전반적으로 Fe에 비해 Co를 상부전극으로 사용하였을 때, 보다 안정한 $I-V$ 특성과 보다 높은 MR 특성을 보임을 확인하였으며, 이는 보다 좋은 계면특성에서 기인하는 것으로 확인되었다. 따라서, 본 연구는 각 계면의 미세구조를 개선함으로써 더욱 좋은 터널링 MR 특성을 유도할 수 있음을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(신소재분야)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, N. van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Crezet, and J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2742 (1988).
- [2] R. L. White, *IEEE Trans. Mag.* **30**, 346 (1994).
- [3] J. M. Daughton, *J. Appl. Phys.* **81**, 3758 (1997).
- [4] M. Julliere, *Phys. Lett.* **54A**, 225 (1975).
- [5] S. Maekawa and V. Gafvert, *IEEE Trans. Magn.* **MAG-18**, 707 (1982).
- [6] T. Miyazaki, T. Yaoi, and S. Ishino, *J. Magn. Magn. Mater.* **98**, L7 (1991).
- [7] T. Miyazaki and N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mater.* **139**, L237 (1995).
- [8] T. Miyazaki, S. Kumagai, and T. Yaoi, *J. Appl. Phys.* **81**, 3753 (1997).
- [9] D. J. Keavney, E. E. Fullerton, and S. D. Bader, *J. Appl. Phys.* **81**, 795 (1997).
- [10] C. L. Platt, B. Dieny, and A. E. Berkowitz, *J. Appl. Phys. Lett.* **69**, 2291 (1996); *J. Appl. Phys.* **81**, 5523 (1997).
- [11] John G. Simmons, *J. Appl. Phys.* **34**, 1793 (1963); **34**, 2581 (1963).
- [12] R. Stratton, *J. Phys. Chem. Solids.* **23**, 1177 (1962).
- [13] J. C. Slonczewski, *Phys. Rev. B* **39**, 6995 (1989).
- [14] Equations (2)~(5) appeared in Ref. [6] were used in the calculation.

Tunneling Magnetoresistive Properties of Reactively Sputtered Fe / Al₂O₃ / Co Trilayer Junctions

Seo-Yoon Choi and Hyojin Kim

*Department of Materials Engineering, Chungnam National University,
Taejon 305-764 Korea*

Young-Mok Cho and Woong Kil Choo

*Department of Materials Engineering, Korea Advanced Institute of Science and
Technology, Taejon 305-701 Korea*

(Received 29 December 1997, in final form 2 February 1998)

We have investigated tunneling magnetoresistance (TMR) properties of Fe / Al₂O₃ / Co magnetic trilayer junctions sputtered on single-crystal Si(001) substrates. Al₂O₃ layers with thicknesses of 50~200 Å were deposited directly on the bottom ferromagnetic layer by a reactive rf sputtering. For comparison, we prepared Pt / Al₂O₃ / Pt tunnel junctions whose current-voltage (*I-V*) characteristics measured at 300 K indicates that reactively sputtered Al₂O₃ is a particularly good material for thin insulating barriers and allows us to form pinhole-free tunnel barriers. The magnetic tunnel junctions exhibit changes of tunnel resistance of about 0.1 % at 300 K with an applied magnetic field and it was found that most junctions with Co as a top electrode have rather good *I-V* and TMR characteristics compared to those with Fe as a top electrode. These results were discussed in relation to their interfacial properties on the basis of those for Pt / Al₂O₃ / Pt.