

자연산화 Al_2O_3 장벽층을 갖는 스핀의존 터널링 접합에서 자기저항특성의 접합면적 의존성

이상석 · 이금원*

강원도 원주시 우산동 상지대학교 컴퓨터전자물리학과, 220-702

*충청남도 조치원 고려대학교 물리학과, 339-700

(2001년 7월 21일 받음, 2001년 10월 3일 최종수정본 받음)

자연산화 Al_2O_3 층이 형성된 허부형태 터널링 자기저항 다층박막이 기본진공도 10^{-9} Torr을 유지하는 UHV 챔버내에서 이온빔 스퍼터링과 dc 마그네트론 스퍼터링 법으로 증착되었다. 제작된 스핀의존터널링(SDT) 접합소자의 최대 터널링 자기저항(TMR)과 최소 접합저항과 면적곱(RA)은 각각 16~17%와 $50\sim 60 \Omega\mu m^2$ 이었다. 자기장하에서 열처리한 SDT 접합에 대한 TMR 향상과 RA 감소의 변화는 미미하였다. 접합면적이 $81 \mu m^2$ 에서 $4 \mu m^2$ 까지 접합크기가 작아짐에 따라 TMR이 증가하고 RA 이 감소하는 의존성이 관찰되었다. 이러한 현상을 허부층 단자의 판흐름 저항값 의존효과와 스핀채널효과로 설명하였다.

주제어 : 자연산화, 스핀의존터널링(SDT), 접합저항(R_j), 스핀 채널효과

I. 서 론

자기터널접합연구는 대표적인 자기정보저장소자의 응용으로서 최근까지 비휘발성 자기기억장치(MRAM)와 고밀도 기록매체의 자기 판독헤드로 개발을 위해 빠르게 발전되어왔다[1]. 특히 자기기록면적 밀도의 급속한 증가는 새로운 판독헤드 SDT 접합소자의 출현이 요구되었다. SDT 접합소자구조에서 중요한 Al_2O_3 장벽층은 금속 Al 층을 어떻게 산화시키는가에 따라 TMR과 접합저항이 커다란 차이를 갖게된다. 높은 접합저항으로서 자기터널링 헤드 소자개발에 걸림돌이자 여러 가지 단점들인 신호처리에 따른 노이즈 발생, 측정 및 신호처리·응답 기기와 소자간의 임피던스 불일치, 외부전압에 대한 접합소자의 손상, 신호처리의 반응 시간지연 등의 문제를 극복하기 위해 RA 가 수백 $\Omega\mu m^2$ 정도의 값 아래인 낮은 접합저항과 20% 이상의 TMR을 갖는 SDT 접합소자 개발이 절실히 요구된다. 우선적으로 낮은 터널링 접합 저항을 갖기 위해서는 장벽층인 Al 층의 플라즈마 산화 방법보다 자연산화 방법이 훨씬 용이하며 실험결과를 많은 연구 그룹에서 발표되어 왔다[2-5].

본 논문에서는 자연산화법으로 이루어진 Al_2O_3 장벽층의 산화 방법을 소개하며 이온빔과 dc 스퍼터링법으로 증착되었고 일반적인 광 리소그라피 패터닝 과정으로 제작

된 SDT 접합소자의 자기저항 특성결과를 논의하였다. 또한 SDT 다층박막의 표면형상구조와 Al_2O_3 장벽층 계면구조를 원자현미경(AFM)과 투과전자현미경(TEM)으로 관찰한 결과로 계면거칠기가 자기터널링 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 바닥층 전극의 판흐름 저항과 스핀채널효과를 접합면적에 의존하는 터널링 자기저항의 특성인 높은 TMR과 낮은 RA 값을 갖는 SDT 접합소자로서 갖는 근본 원인을 규명하기 위해 실험결과를 토대로 하여 제시하였으며, 또한 고품성 자기헤드 소자로서 개발가능성을 제시하였다.

1.1. SDT 접합의 낮은 R_j 와 높은 열적안정성 조건:

SDT 접합을 구성하는 대표적인 장벽층으로 계면에서 도핑효과가 없을 뿐만 아니라 재료학적으로 미세 구조적 안정성을 갖는 산화층 Al_2O_3 의 두께가 접합저항(R_j)의 크기를 결정짓는다. 낮은 R_j 가 되기 위해서는 10 Å 정도 두께의 박막이 접합면 전체에 국소적인 뚫림 현상이 없는 균일한 두께로 덮여져야 한다. 이러한 특성을 가질 때만이 중요한 전기적 수송특성을 유지한 채 스핀의존 터널링 현상을 일으키므로 자연산화법을 이용한 Al_2O_3 층 형성이 유리하게 된다. 한편 SDT박막이 높은 열적 안정성을 유지하기 위해서는 높은 Neel 온도를 갖는 반강자성층을 이용하거나 CoFe/Ru/CoFe으로 이루어진 인공합성 반강자성층으로 고정층으로 선택하여야 한다. 또한 스핀 편극전도도가 큰 강자성층이나 합금형태의 강자성층이 장벽층을 사

*Tel: (033) 730-0415, E-mail: sslee@chiak.sangji.ac.kr

이에 두고 위치하여야만 한다. 이외에도 UHV 챔버내에서 다층박막기술을 적용하여 증착하는 것이 필요하고 박막을 제작후 접합소자 패터닝과정 중 공정온도가 미친 자성층의 자화 이완현상을 바로잡기 위한 반강자성층의 Neel 온도 정도까지 요구되는 열처리과정이 필수적이다[6].

1.2. 플라즈마 산화법으로 만든 장벽층 Al₂O₃의 SDT 접합소자 특성 :

RF 스퍼터링법으로 기판 Si/SiO₂(3000 Å) 위에 증착한 바닥층 구조인 Ta(5)/NiFe(10)/FeMn(30)/NiFe(7)/Al₂O₃(1.3-1.5)/NiFe(50)/Ta(5) (nm)를 180 °C에서 자장열처리 1 시간 후 비교적 평탄한 장벽층을 이루고 있는 Al₂O₃의 계면 모양을 보여주는 TEM 사진이 그림 1a에 나타내었다. 접합 크기 2 μm×3 μm로 소자제작 후 열처리과정을 거쳐 얻은 장벽층 두께에 다른 TMR 값과 R_JA의 의존성을 보여준 그림 1b에서 플라즈마 산화법으로 완전 산화된 Al₂O₃ 두께에 따라 지수적으로 R_JA가 증가하는 경향을 보여준다. 삽입된 자기저항곡선 그림에서 TMR 값이 Al₂O₃ 두께가 13~14 Å로 변함에 따라 23~24 %로 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 특히 그림 1c에서 15 Å일 때 전형적인 비선형 형태를 갖는 I-V 곡선은 Simmon의 모델 피팅에서 얻은 2.6 eV의 장벽높이 에너지와 14.7 Å의 장벽두께의 값이 대체적으로 산화시킨 두께와 비슷함을 제시한다. 여기서 접합면적에 대한 TMR과 R_JA 값이 거의 변함이 없으므로 플라즈마로 처리된 완전 산화층에 해당함

$$R_J = \rho \frac{l}{A} \quad \text{or} \quad R_J A = \rho l \quad (1)$$

경우에 맞게 접합면적이 크게 변하더라도 일정한 값으로 유지하는 R_JA 값의 특성을 갖고 있게 된다. 식 (1)에서 ρ는 SDT 구조의 고유 접합 비저항, l은 접합의 높이이다.

1.3. 자연산화법으로 이루어진 SDT 다층박막구조 :

플라즈마 산화법으로 제작한 SDT 다층구조 박막과 비슷한 구조로 자연산화 처리된 Al₂O₃을 갖는 Ta(5)/NiFe(10)/FeMn(30)/NiFe(7)/Al₂O₃(1.0)/NiFe(35)/Ta(5) (nm)을 기본진공도 2.0×10⁻⁹ Torr인 UHV 챔버에서 Ar 부분압 4.0×10⁻⁴ Torr, 혹은 Xe일 경우 부분압 3.0×10⁻⁴ Torr로 하여 이온빔 스퍼터링법으로 증착을 하였다. 이온빔 스퍼터링으로 증착되는 박막은 마그네트론 스퍼터링과 달리 작업진공도 10⁻⁴ Torr에서 증착할 수 있을 뿐만 아니라 일정방향 이방성을 주기 위해 자장하에서 두께가 보다 균일한 한 박막을 얻을 수 있고, 또 보다 향상된 결정 미세 조적밀도를 얻기에 좋은 증착 특성을 갖는 장점이 있다. 자장의 크기를 80 Oe로 하여 Ta, NiFe, FeMn 금속은 이온빔 전압 800 V와 전류 6.0 mA로 각각 0.3 Å/sec로 증착되었다. Al 금속은 이온빔 전압 500 V와 전류 5.0 mA로 보다 증착율을 낮게 하여 증착시간 조절 및 증착율에 따른 거칠기 유도현상을 최대한 억제하였다. 하부 전극층 일부인 반강자성체 FeMn 층이 γ상의 (111) 결정조직을 유도하기 위해 버퍼 Ta층과 고정층의 높은 교환결합을 향상시켜 교환결합자세를 크게할 수 있는 씨앗층 NiFe를 이용하였으며 Al층을 10 Å 정도 증착 후 자연산화를 위해 시료를 1×10⁻⁶ Torr load-lock 챔버로 이동한 후 4N의 고순도 산소 20 Torr 분위기 하에서 최적 산화시간인 약 20 분 정도로 산소처리를 하여 자연산화 시켰다. 그리고 다시 주 UHV 챔버로 이동한 후 상부 자유층 강자성체 NiFe를 증착하였다.

1.4. Ni₄₅Fe와 Ni₈₀Fe을 강자성체로 이용한 SDT 박막의 자기적 특성 :

SDT 구조에서 강자성체 NiFe 퍼멀로이 합금은 Ni의 화학 조성비에 따라 스핀편극 정도가 다르다. Ni₈₀Fe은 32%의 스핀편극 Ni₄₅Fe는 자기왜곡이 상대적으로 크다는 단점이 있지만 스핀편극이 45%로 이론적으로 TMR 값이 크게 나타난다[1]. 여기서 비교 분석한 자기적 특성은 Ni₄₅Fe인 경우 그림 2b와 같이 Al=10.8 Å일 때 Al₂O₃를 사이를 준 Ni₄₅Fe 층의 상호 결합세기는 거의 없고, 보

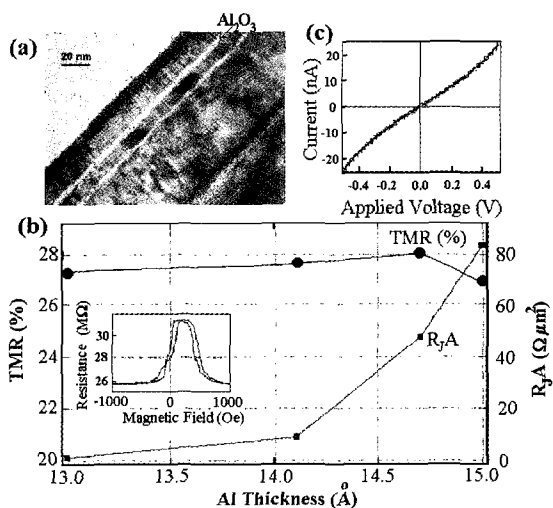


Fig. 1. Typical SDT junction with plasma oxidation Al₂O₃ barrier: (a) TEM picture, (b) Al thickness dependence of TMR and R_JA, (c) I-V curve.

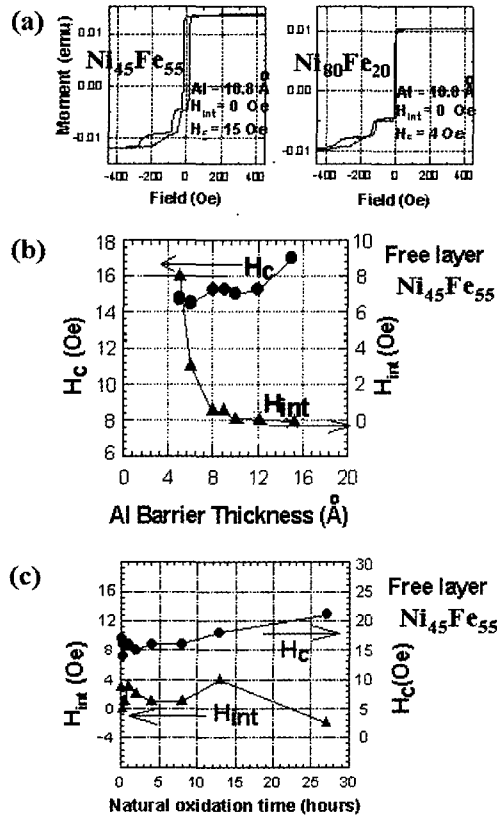


Fig. 2. Natural oxidation SDT junction: (a) MH loops for SDT structure with Ni₄₅Fe and Ni₈₀Fe ferromagnetic layer. (b) Interlayer coupling field and coercivity of Ni₄₅Fe versus Al thickness. (c) Interlayer coupling field and coercivity of Ni₄₅Fe versus natural oxidation time.

자력이 15 Oe 정도이고, Ni₈₀Fe일 때 보자력은 4.0 Oe로 Ni₄₅Fe 보다 훨씬 작아 그림 2a에서 처럼 씨앗층, 고정층 그리고 자유층이 뚜렷하게 구별된 히스테리시스 루프 모양을 보여준다. Ni₄₅Fe인 경우 산소 20 Torr에서 자연산화된 Al₂O₃의 두께에 따른 고정층과 자유층의 상호결합과 자유층에 대한 보자력의 관계는 그림 2c에 나타내었다.

상호결합세기는 Al₂O₃ 장벽층의 두께가 작을수록 두께에 반비례하게 증가하나 보자력은 15 Oe 근처에서 미미한 변화를 보여준다. 산소 20 Torr 분위기에서 시간에 따른 상호결합과 보자력의 변화량은 그림 2에서 볼 수 있듯이 산화시간이 10분에서 30시간까지 변화에 따라 상호결합은 4 Oe 이내로 비교적 안정된 값을 갖으나 보자력은 15 Oe에서 20 Oe로 증가함을 보여준다. 이러한 현상은 불균일한 과산화층이 형성되었거나 또는 단순한 두께 감소효과가 아니라 Ni 보다 Fe가 빨리 산화되어 조성이 바뀌어

산화물이 연자성 NiFe 속에 있어서 손상된 pinning 효과를 초래한 것으로 사료된다. 외부자장의 스위칭에 따라 자유층의 자화반전 현상에 기여하는 자연산화 시간이 20분이 충분한 시간임을 알 수 있다.

1.5. SDT 접합제작 :

자연산화층을 갖는 SDT 접합 소자 제작은 일반적인 자체 정렬된(self-aligned) 리소그래피의 lift-off 과정을 이용하였다. PR은 SPR 3612와 liftoff용 PR은 LOL2000, LDD26W developer와 1165 PR remover를 각각 사용하였으며, 패터닝후 dry 에칭과 SiO₂ 증착은 카프만 소스 이온건을 이용하였다. 특히 밀링과 증착시 시료홀더는 접합면에 재증착과 모서리 손상을 최대한 막아주기 위해 물로 냉각되면서 회전하였고, 밀링 하고자 하는 같은 두께를 갖는 박막을 MgO 기판 위에 박막을 증착한 후 밀링과 동시에 원하고자 하는 두께가 밀링되면 MgO 기판에서 Ar 이온에 충돌하여 방사되는 녹색 빛으로 밀링두께를 조절하였다. 소자 제작 공정시 가장 중요한 과정 중 SiO₂ 보호층막이 빠른 시간 안에 liftoff가 쉽게 일어나기 위해 PR의 developing 시간을 조절하여 접합면 모서리 부분이 이중 PR layer 형성이 되었는지 광학 현미경으로 조사하였다. 상부전극은 순수 박막을 이온빔 스퍼터링으로 약 3000 Å 증착하였으며 전극 패터닝과 Al 박막 wet 에칭과정을 통하여 최종 SDT 접합소자를 완성하였다. 그림 3a는 위에서 설명한 제작공정을 상세히 도시하였으며 그림 3b는 소자 제작 후 접합소자 단면을 도시하였고, 그림 3c는 한 개의 접합소자 batch 안에 5종류의 접합모양과 소자의 크기가 다른 (9 μm×9 μm, 4 μm×9 μm, 4 μm×4 μm, 2 μm×3 μm, 2 μm×2 μm) 것을 보여준 광학현미경 사진이다.

1.6. SDT 접합소자의 TMR 특성 :

TMR의 bias 전압 의존성을 살펴볼 때, Ta/Ni₄₅Fe/Ferromagnetic/NiFe/Al₂O₃/NiFe/Al 구조를 갖는 SDT 접합소자의 자연산화된 Al₂O₃ 두께 및 RA에 따른 TMR 결과를 그림 4a에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 TMR을 갖는 자연산화 Al₂O₃ 두께는 약 10 Å부근이며, 그림 4b에서의 RA가 200 Ωμm²이내에서 최대 TMR을 보일 수 있다는 것을 제시한다. 또한 소자제작 공정 중 150 °C의 baking 온도에서 이방성 자화가 이완 될 수 있고, 모서리에 의한 손상으로 작은 접합크기에서 발생할 수 있는 자화반전 형성이 열처리에 의한 용이 축 방향으로 이방성의 정렬을 요하게 된다. 이때 열처리 조건은 10⁻⁷ Torr 진공

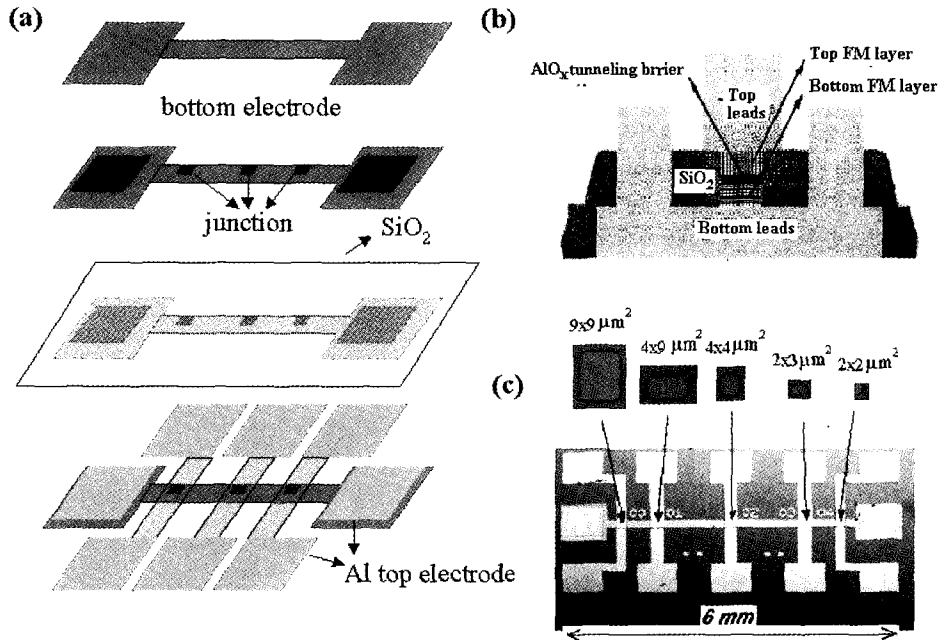


Fig. 3. (a) Patterning process of natural oxidation SDT junction device. (b) Schematic drawing of a junction structure in cross sectional view. (c) Optical patterns and 5 different junction sizes.

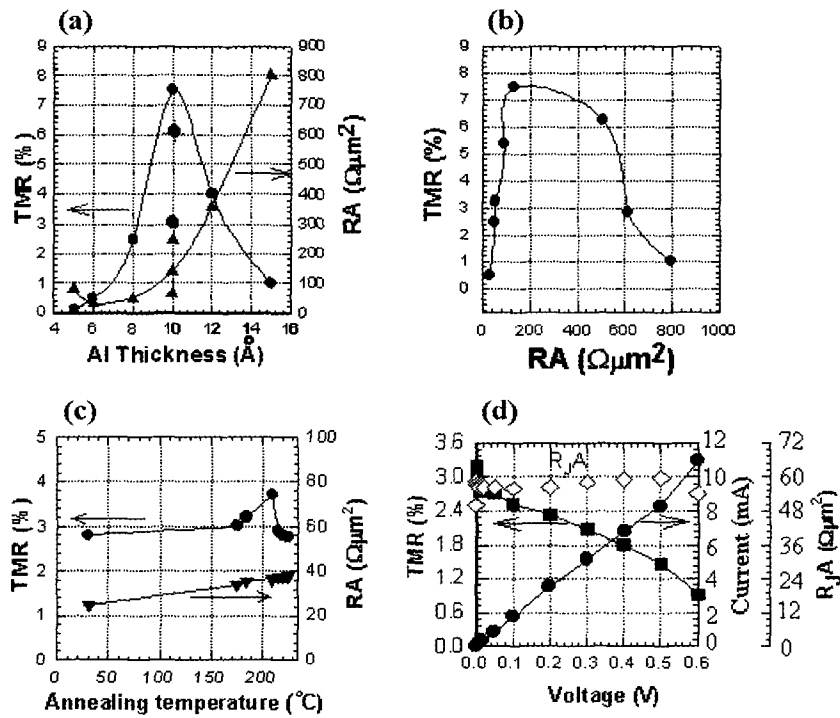


Fig. 4. (a) Thickness dependence, (b) RA dependence, (c) annealing effects, and (d) bias voltage dependence of natural oxidation SDT junction.

으로 5 kG 일정한 자기장 하에서 온도상승(2 °C/min)과 원하는 열처리 온도에서 1시간 머무른 후 온도하강(2 °C/min)을 하였다. 따라서 열처리 온도에 따라 TMR과 R_A 에 따라 의존성을 나타내는 그림 4c에서 R_A 는 열처리온도의 증가에 따라 조금씩 증가하나, TMR은 FeMn의 Neel 온도 보다 높은 210 °C까지 서서히 증가하다가 그 이상의 온도에서 Al_2O_3 층과 NiFe 층간의 계면확산에 따른 주요 요인으로 인해 감소함을 보여준다. 그림 4d는 bias 전압에 의존하는 TMR과 전류, R_A 를 모두 나타낸 그림으로서 bias 전압이 0.5 V일 때 TMR에 거의 1/2 정도로 감소하고 있다. 한편 I-V 곡선은 거의 선형적으로 나타나 있어 절연층으로 터널링하는 것보다 금속과 얇은 산화층이 혼합된 상태로 터널링 수송 효과가 이루어진다고 볼 수 있다. 장벽층이 완전한 산화가 되지 않고 우선적으로 grain의 경계를 통해 산화된 계면이 형성되므로 후반부에서 다시 설명하겠지만, 장벽층의 높이와 두께는 실제 높이나 두께보다 훨씬 줄어든 값으로 나타난다. 한편 R_A 는 bias 전압의 변화에 거의 일정한 것이 비교적 안정된 장벽층을 갖는 접합소자임에 비해, TMR이 감소하므로 R_A 변화량이 감소한다. 일반적인 I-V 곡선에서 장벽 높이가 보다 낮을 때 선형적인 옴의 법칙을 따르나, 높은 bias 전압에서는 비선형 I-V 특성을 갖고 있음으로 TMR의 bias 전압 의존성을 살펴볼 때 의존성에 대한 다양한 요인들이 존재한다 [1]. 예를 들면, bias에 따른 전도도 증가, 들뜬 magnon들의 거동, 밴드구조 효과에 기인된 스핀편극의 에너지 의존성 등이다.

1.7. SDT 접합의 TMR과 R_A 의 접합면적 의존성 :

바닥층 전극에 의한 판 흐름 저항효과를 줄이기 위하여 Ta/Ni₈₀Fe층을 한번 더 삽입한 Ta(5)/NiFe(10)/Ta(5)/NiFe(10)/FeMn(10)/NiFe(8)/Al₂O₃(1)/NiFe(35)의 TMR 곡선과 그림 4c에 보여준 5개의 접합면적 크기의 변화에 따른 TMR과 R_A 의 의존성을 관찰하였다. 그림 5a, b는 접합소자를 제작한 후 열처리 전과 후(190 °C에서 1시간에 각각 얻은 TMR 곡선을 나타내었다. 2 μm×3 μm 접합소자에서 TMR은 5.3%이고 R_A 는 53 Ωμm²으로 TMR의 값은 적지만 자기헤드 소자로서 이용 가능한 저 접합저항의 특성을 보여 주고 있다. 그러나 열처리 전과 후(190 °C에서 1시간 머무름) 고정층과 자유층의 자화방향이 반대일 때 최대 TMR이 안정된 값을 유지하고 있으나, 스퍼터링 방법으로 증착되고 플라즈마 산화법으로 처리된 Al₂O₃ 장벽층을 갖는 SDT접합 소자의 열처리 후 TMR

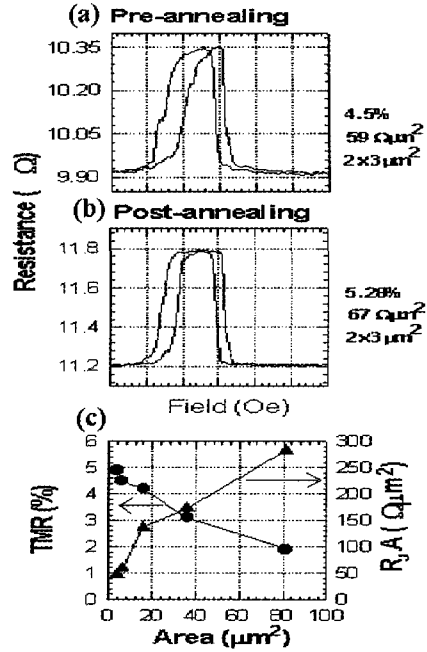


Fig. 5. TMR curves of natural oxidation SDT junction: (a) Pre-annealing, (b) post-annealing (1 hr at 190 °C), and (c) TMR and R_A dependence versus junction area

항상비 보다 훨씬 못 미치고 있다. 이것은 얇은 Al₂O₃ 두께의 계면거칠기나 자연 산화법에 의한 실효 장벽두께 감소 등의 요인으로 후반부에 설명하기로 한다. 그림 5c는 접합 면적의 감소에 따라 TMR은 크게 증가하는 반면에 R_A 가 크게 감소함을 하였다. 이러한 현상은 FeMn의 반강자성체로 하고 계면 전자스핀 의존성 향상을 위해 NiFe와 Al₂O₃ 층 사이에 CoFe 삽입하여 TMR을 많이 증가시킨 경우에도 그대로 나타난다.

1.8. CoFe가 삽입된 자연산화층을 갖는 SDT 접합소자의 특성 :

Co₈₀Fe 층이 UHV 챔버 내에 다른 각도에 장치에 설치된 dc 마그네트론 스퍼터링 전으로 증착을 1.2 Å/s로 2.5 mTorr에서 NiFe와 Al₂O₃층 사이에 삽입되어 증착이 되었다. 다층구조는 Ta(5)/NiFe(10)/Ta(5)/NiFe(10)/FeMn(10)/NiFe(8)/CoFe(2)/Al₂O₃(1, 1.2)/CoFe(2)/NiFe(35) (nm)로 그림 6a에 나타내었다. 물론 Al₂O₃는 자연산화법으로 최적조건 산소 20 Torr에서 20분간 이루어졌으며 SDT 접합소자 제작후 2 μm×2 μm의 접합크기에서 얻은 MR 곡선이 그림 6b에 나타내었다. Al₂O₃의 두께가 10 Å일 때, TMR 값이 열처리 전 14.6 %일 때 보다 열처리 후(190

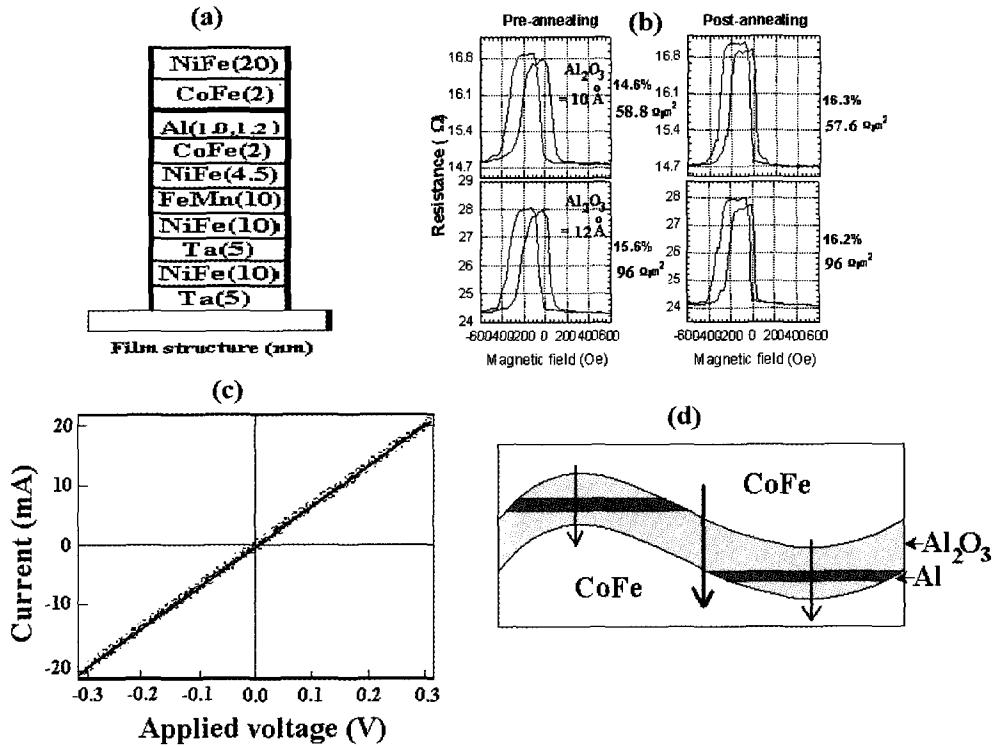


Fig. 6. (a) Film structure, (b) TMR curves (pre- and post-annealing), and (c) I-V curve of natural oxidation SDT junction with inserted CoFe layer and two different Al₂O₃ barriers (10 Å, 12 Å). (d) The barrier structure of natural oxidized Al₂O₃ with roughness. The length of arrow means the magnitude of tunneling spin-polarization.

°C에서 1시간)에 16.5%로 약간 증가하였으며 반면에 RA는 60.8 Ωμm²에서 57.6 Ωμm²로 약간 감소하였다. 또한 I-V 곡선은 그림 6c에서 보면 장벽높이와 방벽두께가 1.65 eV, 6.1 Å으로 Simmon 모델 피팅 결과 나타나 실제두께 10 Å으로 40% 이상 적게 나타났다. 플라즈마법에 의한 Al₂O₃ 산화층의 두께가 15 Å일 때 비선형 I-V 곡선은 Simmon의 모델 피팅에서 얻은 14.7 Å의 장벽 두께의 값이 대체적으로 산화시킨 두께와 비슷함을 그림 1c에서 보였으므로, 자연산화법에 의한 장벽 Al₂O₃의 모든 두께가 산화가 이루어졌다고 사료된다[7]. 따라서 자연산화의 경우 Al 층과 CoFe 층의 계면 거칠기로 인한 Al 박막의 grain 경계나 얇은 Al층 두께 영역부터 먼저 Al₂O₃ 산화층이 형성될 수 있다. 자연산화법이 자성층까지 과도한 산화를 형성하지 않은 반면에 Al₂O₃층의 내부는 산화가 되지 않은 불 균일한 상태로 남아 있을 것으로 사료된다. 이러한 계면 산화 형성조건을 거칠기의 파동형태로 하여 그림 6d에 나타내었다. 비교적 균일한 산화층으로 통하는 스핀편극 터널링 정도를 큰 화살표로 표시하

였고 산화층이 불 균일한 곳으로 통하는 스핀편극 터널링 정도를 스핀산란이나 스핀필터링에 의한 정보 상실로 인해 작은 화살표로 표시하였다. 열처리 후에도 이러한 자연산화법으로 조성된 불 균일한 산화 Al₂O₃층 계면 상태가 열처리 전과 크게 다르지 않다고 볼 수 있다. 한편 플라즈마 산화의 경우 비록 계면거칠기가 존재하지만 모든 부분이 산화가 된 상태임으로 평균적으로 균일한 산화층 두께를 유지하여 스핀편극 터널링이 크다고 한다면, 180°C 이상의 열처리 온도에서 과산화와 결핍 영역간에 산소 재배열의 가능성과 미세 열적 요동으로 계면 평활도 증가에 의한 스핀의존터널링이 크게 향상 될 것으로 사료된다.

1.9. 자연산화된 Al₂O₃ 장벽층의 미세구조 :

위에서 언급한 얇은 장벽층 두께의 주기적 파동 형태를 확인시켜 주는 TEM 사진이 열처리 전후에 관찰한 사진이 그림 7a, b이다. Al₂O₃ 장벽층이 열처리한 후 사진에서 보면 선명하게 약 10 nm 정도의 파동형태를 그대로 유지한 것을 알 수 있다. 열처리 후 SDT 박막의 표면형상

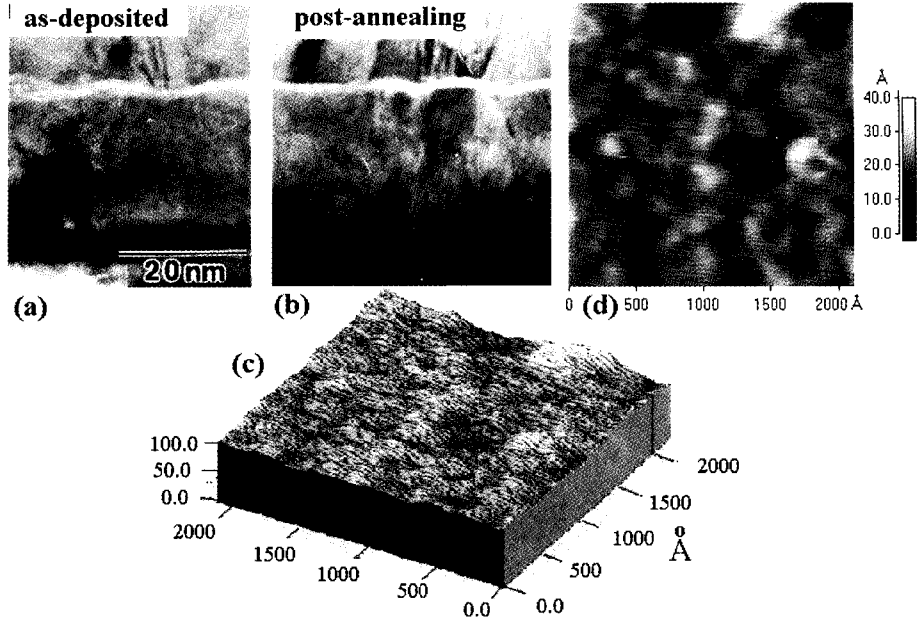


Fig. 7. TEM images of (a) as-deposited and (b) post-annealing of natural oxidation SDT junction. (c) 3-dimensional and (d) 2-dimensional AFM images.

구조를 관찰한 원자현미경 3차원 사진과 2차원 사진이 그림 7c, d에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 높이가 약 10 Å이고 폭이 수백 Å를 갖는 주기성이 관찰된다. 이러한 주기성을 보인 계면 거칠기는 하부전극 SDT 접합의 다층구조 박막 형성에 대한 일반적인 미세 형상구조의 특징이라고 볼 때 [8], 각 파형의 배와 마디에서 쉽게 이루어지는 grain 형성으로 계면 사이로 산화층 형성이 쉽고 또한 산화층과 강자성층 계면에 산화가 쉽게 이루어진다. 이와 반대로 산화계면으로 둘러싸인 내부에는 결핍된 산화층이 남아 있어 I-V 곡선에서 장벽두께의 감소, 자연산화법에 의한 Al₂O₃층을 갖는 SDT 접합에서 TMR과 R_A의 접합면적 의존성 결과가 이러한 현상을 뒷받침 할 것으로 사료된다.

1.10. 자연산화층의 SDT 접합소자의 접합면적에 따른 TMR과 R_A의 접합면적 의존성의 근본 원인 규명과 그 응용성 :

CoFe층이 삽입된 SDT 박막 구조의 열처리 전후 TMR과 R_A의 접합 면적 의존성을 그림 8a에 나타내었다. TMR은 열처리 후 접합면적에 관계없이 전반적으로 증가하였고, R_A는 감소하였다. 여기서 얻은 최대 TMR은 2 μm×2 μm의 접합크기에서 16.5 %이고 최소 R_A는 2

μm×2 μm의 접합크기에서 52 Ωμm² 이었다. 그림 8 1a에서 보여주는 접합면적 의존성의 근본 원인을 두 가지로 다른 효과임을 제시하고 이러한 의존성을 이용하여 개발 가능한 자기헤드로서의 SDT 접합소자 개발을 제시하고자 한다.

첫 번째 원인 규명은 TMR 측정시 전류흐름을 고려할 때 상부 전극과 하부 전극의 수직으로 흐르는 전류에 기여하는 저항은 접합저항 R_J에 비해 무시할 정도로 작다고 볼 수 있으므로, 실제로 접합저항에 기여하는 저항은 그림 8b와 같이 접합에 기여하는 저항체계의 등가회로를 표시할 수 있다. 이에 대한 실험적인 저항을 R_{eff}라 하면 식 (2)으로 등가 저항을 나타낼 수 있게 된다.

$$R_{eff} = R_J \frac{1 + R_s/2R_J}{1 + R_s/4R_J} \quad (2)$$

여기서 R_s는 바닥전극의 수평방향 전류에 기여하는 판 흐름 저항이다. 그림 8b에서 접합저항 R_J가 두 개의 저항 2R_J로 표기한 것은 접합구조상 판 흐름저항 R_s이 고려될 때와 안될 때 적용되는 병렬 등가회로를 적용시키기 위한 것이다. 또한 등가회로에서 상부의 판 흐름저항 R_s이 존재하지 않은 이유는 상부전극인 Al 금속층이 300 Å로 두꺼워서 R_s 저항 값은 하부의 R_s 보다 매우 작아 무시할

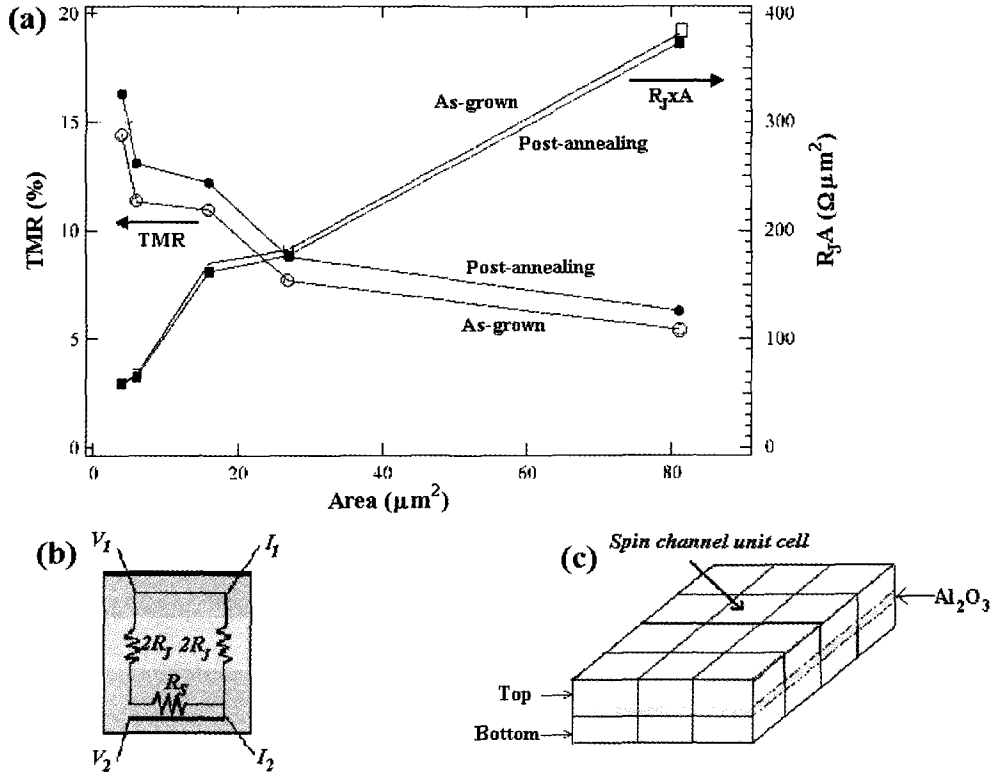


Fig. 8. (a) TMR and R_A dependence versus junction area in natural oxidation SDT junction. (b) Equivalent circuit for sheet resistance and junction resistance. (c) A schematic view for spin channel unit cell.

수 있으며 측정시 전류 흐름의 경로를 볼 때 측정 전압 값에 기여하지 못하기 때문이다. 플라즈마 산화법인 경우 완전 산화층이 이루어졌다고 볼 때, $R_j \gg R_s$ 이므로 R_{eff} 는 거의 R_j 로 같게 된다. 따라서 식 (1)에서 보듯이 R_j 값은 접합면적이 작아질 경우 증가하나, R_A 는 상관없이 일정한 값을 유지한다. R_j 이 R_s 보다 조금 크거나 거의 같다고 보면 식 (2)에서 R_{eff} 는 R_j 보다 약간 크게 나타나며 접합 면적이 작아지면 작아질수록 R_j 는 일정하나 R_s 의 값이 줄어들어 식 (2)의 R_{eff} 은 실제 R_j 값에 천천히 근접하지만 R_A 값은 현저하게 줄어들게 된다. 이에 따라 TMR은 ΔR 보다 R_{eff} 의 감소로 증가할 수 있게 된다. 따라서 접합면적에 대한 TMR의 증가 R_A 값의 감소가 되는 의존성을 설명할 수 있다.

두 번째로는 스핀 채널효과에 의한 것이다. 8절에서도 언급했듯이 자연산화법에 의한 Al₂O₃층의 파동형태 존재는 grain 사이의 산소 투입으로 Al₂O₃층의 표면이 산화가 되고 아래 계면이 산화가 이루어지면서 내부 산화가 불균일 가능성을 예상할 수 있다. 이에 따라 접합면적의 이상

적인 스핀 터널이 가능한 채널 단위의 개수를 나타내는 N의 숫자로 구획을 지을 수 있다고 가정한다면, 독립된 스핀의존 터널링 경로(spin-dependent tunneling path)의 수를 의미한다. 그림 8c를 참조하면 쉽게 이해를 할 수 있으며, 실험결과와 부응한 관계식 (3)을 유도할 수 있다.

$$\frac{TMR}{R_A} \propto \frac{1}{N} \quad (3)$$

따라서 접합면적이 작을수록 N는 줄어들게 되어 식 (3)에 의해 TMR의 증가 R_A 의 감소가 되는 의존성을 설명이 가능하다. 이렇게 제시한 두 가지 효과에 따라 바닥층의 R_s 를 줄이기 위해 보다 저항이 작은 Cu, Au, Pt등 박막을 적층으로 제작하면 될 것으로 보이며, 얇은 장벽층의 존재로 계면거칠기에 의한 스핀채널 모델만이 근본원인으로 작용할 것으로 보인다. 낮은 접합저항을 갖는 SDT 접합소자 개발을 위해 자연산화법으로 장벽층을 형성한 경우 이러한 의존성을 응용할 수도 있다. 나노크기의 스핀채널 단위 격자를 계속해서 줄여서 TMR을 크게 증가시키

고 접합저항을 매우 작게 유도하여 자기헤드 소자 개발에 매우 유용하게 된다.

II. 결 론

자연산화 Al₂O₃ 층이 형성된 터널링 자기저항 다층박막 구조로 Ta(5)/NiFe(10)/Ta(5)/NiFe(10)/FeMn(10)/NiFe(8)/CoFe(2)/Al₂O₃(1)/CoFe(2)/NiFe(35) (nm)가 기본진공도 10⁻⁹ Torr을 유지하는 UHV 챔버내에서 이온빔 스퍼터링과 dc 마그네트론 스퍼터링 법으로 증착되었다. 제작된 SDT 접합소자의 최대 TMR와 최소 R_A은 각각 16~17%와 50~60 Ωμm²이었다. 자기장하에서 열처리한 SDT 접합에 대한 TMR과 R_A의 변화는 미미하였다. 접합면적이 81 μm²에서 4 μm² 까지 접합크기가 작을수록 TMR의 급격한 증가와 R_A의 큰 감소를 나타내는 의존성 현상을 하부층 단자의 판흐름 저항값 의존효과와 스핀채널효과를 이용하여 설명하였다. 두 가지 효과에 따라 저항이 작은 Cu, Au, Pt 등 박막을 적층으로 제작하여 R_A 의존성을 없앨 수 있으나, 얇은 장벽층의 존재로 계면거칠기에 의한 스핀채널 효과를 낮은 접합저항을 갖는 SDT 접합소자 개발을 나노크기의 스핀채널 단위 격자를 계속해서 줄여서 TMR을 크게 증가시키고 접합저항을 작게 하는 자기헤드 소자 개발에 응용할 수 있다.

감사의 글

SDT 박막제조와 소자제작 및 측정에 도움을 주신 스텐포드대학의 Shan. X Wang 교수님과 Read Rite회사의 박창만 박사님께 감사를 드리며, 또한 TEM 사진을 관찰하여 주신 한양대학교의 김창경교수님, 윤종승박사님, 장필재 대학원생께 감사를 드립니다. 이 연구는 테라급 나노소자개발 2001년 프로그램에 의해 일부 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. S. Moodera, J. Nassar, G. Mathon, *Ann. Rev. Mater. Sci.* **29**, 381(1999).
- [2] D. Song, J. Nowak, M. Covington, *J. Appl. Phys.* **87**, 5197 (2000).
- [3] S. Cardoso, V. Gehanno, R. Ferreria, P. P. Freitas. *IEEE Trans. Magn.* **35**, 2952(1999).
- [4] A. T. A. Wee, K. Sin, S. X. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2528(1999).
- [5] J. J. sun, K. Shimazawa, N. Kasahara, K. Sato, S. Saruki, T. Kagami, O. Redon, S. Araki, H. Morita, and M. Matsuzaki, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 2424(2000).
- [6] R. C. Sousa, J. J. Sun, V. Soares, P. P. Freitas, A. King, M. F. da Silva, J. C. Soares, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3288(1998).
- [7] C. L. Platt, M. R. McCartney, F. T. Parker, A. E. Berkowitz, *Phys. Rev.* **B61**, 9633(2000).
- [8] T. E. Clark, F. B. Mancoff, S. X. Wang, B. M. Clemens, R. Sinclair, *IEEE Trans. Magn.* **35**, 2922(1999).

Junction Area Dependence of Tunneling Magnetoresistance in Spin-dependent Tunneling Junction with Natural Al₂O₃ Barrier

Sang-Suk Lee and Kungwon Rhie*

Dept. of Computer and Electronic Physics, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

**Dept. of Physics, Korea University, Chochiwon 339-700, Korea*

(Received 21 July 2001, in final form 3 October 2001)

Spin dependent tunneling (SDT) junction devices of Ta/NiFe/Ta/NiFe/FeMn/NiFe/CoFe/AlOx/CoFe/NiFe/Al with in-situ naturally oxidized Al barrier were fabricated using ion beam deposition and dc sputtering in UHV chamber of 10⁻⁹ Torr. The maximum tunneling magnetoresistance (TMR) and the product resistance by junction (R_A) are 16-17% and 50-60 Ωμm², respectively. The values of TMR and R_A with field annealing were slightly increased. The TMR and R_A dependence versus the junction area size was observed. These results were explained by using sheet resistance effect of bottom electrode and spin channel effects.

Key words : natural oxidation, spin-dependent tunneling, junction resistance (R_J), spin channel effect